



AVALIAÇÃO E SELEÇÃO DE PROCESSO DE SOLDAGEM EM UMA EMPRESA DO SETOR METALÚRGICO POR MEIO DE MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

Versão do autor aceita publicada online: 15 fev. 2023

Publicado online: 08 mar. 2023

Como citar esse artigo - American Psychological Association (APA):

Faria, I. C. S., Filleti, R. A. P., Oliveira, M. C., & Heleno, A. L. (2023). Avaliação e seleção de processo de soldagem em uma empresa do setor metalúrgico por meio de métodos de tomada de decisão multicritério. *Exacta*. doi: <https://doi.org/10.5585/2023.21649>



Isabella Cristina Souza Faria

Mestre em Engenharia de Produção / Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP
Piracicaba, São Paulo – Brasil



Remo Augusto Padovezi Filleti

Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP / Piracicaba, São Paulo – Brasil



Maria Célia de Oliveira

Doutora em Engenharia de Produção / Universidade Presbiteriana Mackenzie / São Paulo, São Paulo – Brasil



André Luís Helleno

Doutor em Engenharia de Produção / Universidade Presbiteriana Mackenzie / São Paulo, São Paulo – Brasil

Resumo

Devido às diferentes características das tecnologias de soldagem disponíveis, é importante para uma empresa dispor de métodos que auxiliem na escolha da melhor opção para cada aplicação, de modo a promover o uso eficiente de recursos, bem como otimizar a produção da aplicação avaliada. Assim, esse trabalho visa propor um método de tomada de decisão para a seleção de tecnologia de soldagem baseado na ferramenta AHP COPRAS. Uma pesquisa de campo foi realizada em uma empresa multinacional do ramo metalúrgico para se identificar quais eram os critérios mais relevantes relacionados ao processo de soldagem. Por meio de entrevistas com especialistas da parte de soldagem, foi possível identificar e quantificar quatro critérios: Segurança e Ergonomia, Qualidade, Produtividade e Custo. A partir destes critérios, aplicou-se

a ferramenta AHP COPRAS e verificou-se que, para o caso analisado, o processo automatizado era a melhor alternativa, quando comparado com o processo manual.

Palavras-chaves: Soldagem. Automação. Soldagem robotizada. Método AHP COPRAS.

EVALUATION AND SELECTION OF WELDING PROCESS TECHNOLOGY IN AN AUTOMOTIVE COMPANY USING MULTICRITERIA DECISION-MAKING METHODS

Abstract

Due to the distinctive characteristics of the existing welding technologies, it is important for a company to have methods that supports the selection of the best welding option for each application, to promote the efficient use of resources, as well as to optimize the production of the evaluated application. Thus, this work aims to propose a decision-making method for the selection of welding technology based on the AHP COPRAS tool. Field research was conducted in a metallurgical multinational company to identify which were the most relevant criteria related to the welding process. Through interviews with welding specialists, it was possible to identify and quantify four different criteria: Safety and Ergonomics, Quality, Productivity, and Cost. Based on these criteria, the AHP COPRAS tool was applied, and the results found that, for the case analyzed, the automated process was the best alternative when compared to the manual process.

Keywords: Welding. Automation. Robot welding. AHP COPRAS method.

1 Introdução

Um grande desafio das companhias é se manterem competitivas e eficientes. Os custos dos processos produtivos devem ser reduzidos para se alcançar uma maior eficácia. São vários os fatores que influenciam na eficiência de um processo, tais como: quebras de máquinas levando a paradas indesejadas, mão-de-obra sem qualificação gerando tempos de ciclos mais longos e acidentes no trabalho, layouts ineficientes ocasionando um longo tempo de movimentação ao longo do ciclo. Todos esses problemas devem ser controlados para tornar a produção mais eficiente e garantir a satisfação do cliente quanto à qualidade do produto, mantendo-se um custo de produção reduzido (Pinto *et al.*, 2019).

Sendo assim, a busca pela melhoria contínua é relevante para qualquer tipo de processo, visando, ao mesmo tempo, a redução de desperdícios/custos e o aperfeiçoamento de seus produtos e processos. Para o processo de solda, isso não é diferente. Em linhas gerais, essa atividade é realizada por um operador, o qual realiza a união de materiais metálicos por meio da aplicação de calor a um substrato ligante. Apesar das indicações do uso desse processo desde a antiguidade, houve pouca variação na tecnologia utilizada na soldagem ao longo dos anos (Weman, 2012; Faria, Filleti, & Helleno, 2022).

Foi somente a partir do advento da automação industrial, no final do século XX, que se observou a possibilidade de substituir o trabalho manual do soldador pelo de robôs industriais, com o intuito de se melhorar a repetibilidade e acuracidade da operação. A partir do século XXI, os sistemas de soldagem robotizados evoluem e começam a integrar tecnologias que possibilitam, ao mesmo tempo, uma maior flexibilidade e produtividade nas operações, tais como sistemas de controle de costura de solda (*Seam tracking*), realidade virtual, realidade aumentada e detecção de juntas e desenvolvimento de trajetórias de solda (Faria, Filleti, & Helleno, 2022). Xue *et al.* (2019), por exemplo, desenvolveram um sistema de detecção de juntas no qual um laser é projetado na superfície da peça de trabalho e uma luz auxiliar é utilizada para iluminar continuamente a peça. Por meio desse conjunto laser-luz, o sistema captura as imagens da superfície da peça, processa essas informações, calcula a posição 3D da junta e redefine os parâmetros de soldagem através de um algoritmo, adaptando a solda às variações da geometria peça.

Também existem sistemas automatizados de soldagem que permitem a colaboração entre homem e robô, utilizando a experiência e habilidade de um soldador em conjunto com a precisão de um robô. O trabalho de Wang, Cheng, Jiao, Johnson e Zhang (2019) apresenta um sistema de realidade virtual em que um operador observa a atividade de soldagem do robô e consegue alterar a velocidade do movimento e posicionamento da tocha de solda. É utilizado um algoritmo para, em tempo real, fazer as correções de corrente e tensão elétrica. Esse sistema permite que o processo se torne mais adaptativo e flexível às variações da peça, além de manter o operador em segurança, sem contato direto com os fumos provenientes do processo de soldagem.

O surgimento de diferentes formas/tecnologias de execução do processo de soldagem nos últimos tempos, puxados pelo desenvolvimento da indústria manufatureira, ampliou consideravelmente a gama de opções disponíveis para a execução da soldagem, com diversos níveis de automação/robotização, desde o processo manual puro até o processo automatizado e integrado às tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, como os sistema físicos-cibernéticos (Silva & Silva, 2018).

Nesse contexto, a seleção, por parte de uma empresa, do nível de automação/robotização mais adequada para suas atividades pode se tornar uma tarefa complexa. Ainda é muito comum que tal seleção seja feita de maneira não padronizada, variando de acordo com a peça em questão e a experiência dos funcionários (engenheiros e analistas de processo). Em várias situações, costuma-se fazer um benchmark com outras plantas da empresa para verificar qual processo

elas usam, e é feito o levantamento do custo de cada uma das células (manual ou automatizada). Também são feitas estimativas do tempo de ciclo do processo para cada um dos casos.

A fim de padronizar a seleção de um processo e/ou alternativa, algumas empresas utilizam métodos multicritério de tomada de decisão. Esses métodos são capazes de agregar todas as características importantes de um processo para permitir a transparência e sistematização da tomada de uma decisão. Um exemplo de método multicritério é o AHP (*Analytical Hierarchy Process*) COPRAS (*Complex Proportional Assessment*), que usa um procedimento de priorização escalonada e de avaliação de alternativas em termos da significância e do grau de utilidade (Polat, Bingol, & Var, 2017).

O trabalho de Goswami e Mitra (2020) utiliza uma aplicação do AHP COPRAS, em paralelo com o AHP-ARAS (*Additive Ratio Assessment*), para avaliar e priorizar dez modelos diferentes de telefones celulares, considerando atributos como preço, memória interna, memória RAM e marca. Os autores identificaram que a priorização usando tais modelos foi similar tanto para os celulares mais bem posicionados quanto para aqueles que foram considerados piores. Variações sutis de resultados ocorreram para modelos que ficaram nas posições medianas da priorização. Sproesser *et al.* (2016) apresentam um modelo matemático de seleção multicritério para tecnologias de soldagem (manual ou automatizado) em conjunto com ferramentas de avaliação ambiental (Avaliação de Ciclo de Vida - ACV) e de custos (Função de Custo). Na seleção, foram considerados duas categorias de impacto ambiental (Potencial de Aquecimento Global – GWP e Potencial de Eutrofização – EP), bem como os custos do equipamento e da mão-de-obra. O modelo foi aplicado a três cenários diversos e os resultados mostraram que, dependendo do cenário e do peso dado à categoria de potencial de eutrofização, a alternativa mais adequada poderia variar.

Assim, considerando necessidade de uma análise multicritério para a seleção de tecnologias de soldagem em diferentes situações e levando em conta aplicabilidade do método AHP COPRAS para priorização de alternativas em situações com vários critérios a se considerar (como o da seleção de modelos de celulares), o objetivo deste trabalho é propor um método de tomada de decisão baseado no AHP-COPRAS para selecionar a tecnologia de soldagem (manual, automatizada) mais adequada de acordo com diferentes critérios. Para esse fim, foi feito um estudo de caso em uma empresa multinacional do ramo metalúrgico.

O presente trabalho foi estruturado em cinco partes. O primeiro capítulo apresenta a introdução, com a contextualização do problema, justificava e definição dos objetivos do trabalho. O segundo capítulo contém uma revisão da literatura com ênfase nos conceitos básicos desta pesquisa. O terceiro capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados. No quarto capítulo,

são apresentados os resultados e a discussão destes. Por fim, o capítulo 5 fornece as considerações finais da pesquisa.

2 Revisão da Literatura

Essa seção é dividida em duas partes. Na primeira parte, é feita uma breve descrição do processo de soldagem. Na segunda parte, é feita uma descrição do método multicritério de tomada de decisão AHP COPRAS.

2.1 Processo de soldagem

O processo de soldagem é um método de união de materiais metálicos baseado em forças microscópicas em que a união é conseguida pela aproximação dos átomos ou moléculas das peças a ser unidas ou destes e de um material intermediário adicionado à junta. O método se baseia na aplicação localizada de calor na região da junta a ser soldada até a sua fusão e do metal de preenchimento, quando utilizado. Como resultado desta fusão, as superfícies entre as peças são eliminadas e, com a solidificação do metal fundido, a solda é formada. Os principais benefícios desse processo são: a versatilidade, a qualidade e o custo competitivo. A soldagem pode ser utilizada para diferentes tipos de materiais e aplicada em diferentes campos da indústria, podendo atender a diferentes requisitos de qualidade e sendo economicamente viável na maioria dos processos, conforme Marques, Modenesi e Bacarense (2009).

Os processos de soldagem podem ser classificados baseando-se no método utilizado: (a) processos de soldagem por pressão e (b) processo de soldagem por fusão. O primeiro grupo consiste na soldagem por forjamento ou fricção, normalmente utilizado para soldagem de chapas finas. O segundo grupo consiste no aquecimento do material base ou de um material de preenchimento até sua fusão, exemplos desse tipo de processo são: soldagem por eletro-escória, soldagem a arco submerso, soldagem com eletrodo revestido e soldagem a plasma. Como o material fundido tende a reagir com os gases atmosféricos, normalmente no processo de soldagem por fusão, são utilizados gases de proteção para reduzir essas reações (Marques, Modenesi, & Bacarense, 2009).

Na maioria dos casos, a soldagem é feita manualmente, ou seja, toda a operação é realizada e controlada manualmente pelo soldador. Nesses casos, é necessário o uso de roupas de proteção, visto que o processo envolve temperaturas elevadas, exposição à uma alta quantidade de radiação e contato com gases tóxicos liberados durante a operação.

Apesar da predominância do uso da soldagem manual na indústria, há um crescimento na implementação de processos automatizados de soldagem. O processo de soldagem automatizado é realizado por robôs e auxiliado por sensores, garantindo acuracidade do

processo, aumento da velocidade de ciclo, qualidade da solda e redução da interferência humana, visto que o operador só tem contato com a célula de soldagem quando vai posicionar/remover a peça do processo, quando inicializar o programa e quando realizar a inspeção visual das soldas ao final do processo (Bolmsjö, 1988; Rout, Deepak, & Biswal, 2019). Uma estação de soldagem automatizada/robotizada consiste em um braço robótico alimentado com arame revestido, um posicionador onde a peça a ser soldada deve ser presa, uma máquina de soldagem e a cabine de controle do sistema, que faz a integração entre os sensores, o programa e a máquina de solda. É também na cabine de controle que o soldador inicializa o programa, bem como pode acompanhar o tempo de ciclo, mensagens de erro e dados sobre os sistemas de manutenção e segurança da célula de soldagem (Bolmsjö, 1988; Rout, Deepak, & Biswal, 2019).

Entre a operação complementar manual e a operação totalmente automatizada, há uma grande variação de tecnologias disponíveis, com diferentes graus de automação/participação do operador. Para além da automação, já existem tecnologias que visam a digitalização do processo de soldagem, com o intuito de transformá-lo em um sistema físico cibernético (Silva & Silva, 2018).

Considerando as diferentes tecnologias e métodos utilizados no processo de soldagem, Correia e Ferraresi (2007) apresentam um modelo de seleção de processo de soldagem considerando os critérios: custo operacional e custo da não-qualidade. Foi feito um estudo de caso comparando os métodos SAW (*Submerged Arc Welding*) e GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) e os resultados indicaram que apesar de os custos com não-qualidade serem um pouco maior para o SAW, eles são compensados pelo baixo custo operacional, o que leva esse método a ser a melhor opção para a aplicação.

O trabalho de Sproesser *et al.* (2016) apresenta um outro modelo de seleção de tecnologia de soldagem através de um método de tomada de decisão multicritério. Foram considerados os critérios: impacto ambiental em termos de potencial de aquecimento global em 100 anos e potencial de eutrofização do equipamento; custo inicial do equipamento e custos com mão-de-obra, eletricidade materiais e consumíveis. O modelo foi aplicado a três cenários e os resultados mostraram que, dependendo do peso dado ao subcritério potencial de eutrofização, a alternativa adequada pode ser alterada. Para uma determinada faixa de valores, o método manual é mais adequado e para outra faixa não o é.

2.2 Método multicritério AHP COPRAS

O método AHP foi introduzido por Thomas Saaty (1980) e consiste em um método de tomada de decisão multicritério baseado na avaliação de alternativas em termos de importância relativa, de acordo com os critérios adotados. Esse método usa uma combinação de critérios qualitativos e quantitativos ao mesmo tempo.

Três princípios guiam a solução de problemas a partir do método: decomposição, comparação e síntese das prioridades. O princípio da decomposição é aplicado para a estruturação do problema, com uma hierarquia de objetivos, critérios, subcritérios e alternativas (Figura 1).

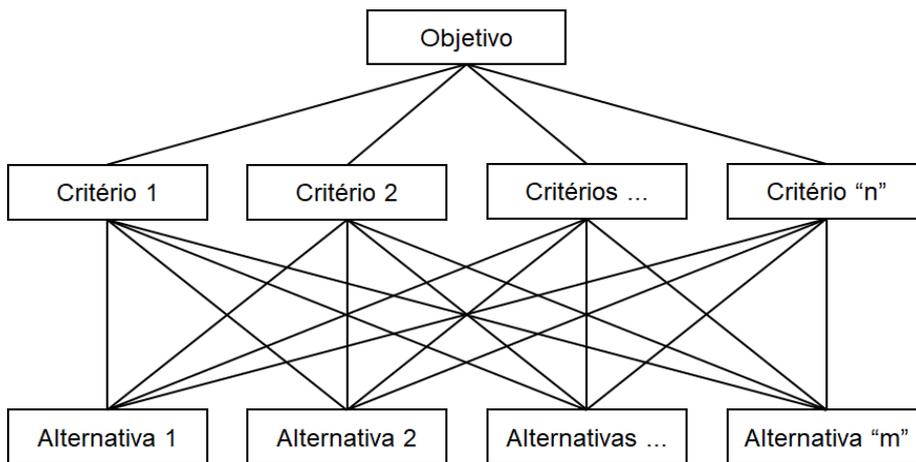


Figura 1 – Estrutura Hierárquica Básica

Fonte: Adaptado de Saaty (1980).

Já o princípio da comparação é aplicado para a comparação em pares da importância relativa dos critérios, resultado na matriz comparação e seu autovetor. A matriz de comparação é construída utilizando a escala de níveis da Tabela 1, no qual é feita uma comparação par a par de cada um dos critérios utilizados. Sendo assim, a diagonal da matriz comparação é diretamente definida como “1”, já que consiste na comparação de um critério com ele mesmo.

Tabela 1 – Escala de níveis Saaty

1	Igual importância	As duas contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o juízo favorecem uma atividade em relação a outra
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o juízo favorecem fortemente uma atividade em relação a outra
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação a outra. Pode ser demonstrada na prática
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação a outra, com o grau mais alto de segurança
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições

Fonte: Saaty (1987).

Por fim, o princípio da síntese consiste na multiplicação da matriz comparação dos critérios pelo seu autovetor de priorização (Saaty, 1987).

Desde sua criação, esse método tem sido amplamente usado para tomada de decisões em situações comuns à indústria, como na seleção do melhor método de retrabalho de tubulações de água (Aschilean, Badea, Giurca, Naghiu, & Iloaie, 2017), seleção do melhor provedor logístico para logística de terceirização - 3PL para uma empresa (Gurcan, Yazici, Beyca, Arslan, & Eldemir, 2016), classificação dos fatores críticos para a melhoria do processo produtivo, sob a ótica da Manutenção Produtiva Total – TPM (Sousa, Melo, Aquino, & Jerônimo, 2021) e seleção de processos de conformação mecânica a serem utilizados (Bologa, Breaz, & Racz, 2018).

O COPRAS é um outro método de tomada de decisão multicritério que foi desenvolvido inicialmente em 1994. Esse método usa o ranqueamento escalonado e um procedimento de avaliação das alternativas com base na sua significância e grau de utilidade (Zavadskas, Turkis, Tamosaitiene, & Marina, 2008). Para isso, a aplicação do COPRAS necessita que os valores das alternativas sejam quantitativos, sendo assim, é preciso transformar as variáveis qualitativas ou linguísticas em variáveis quantitativas, por meio, por exemplo, de uma Tabela de Números *Fuzzy* (Pitchipoo, Vincent, Rajini, & Rajakarunakaran, 2014).

O primeiro passo do método COPRAS consiste na construção da matriz de decisão, na qual são ordenadas as alternativas. Em seguida, o cálculo dos pesos dos critérios definidos é feito por meio do método AHP convencional. Nesse método, é importante compreender quais critérios são benéficos e quais não o são para o caso analisado. O terceiro e último passo consiste em ordenar as alternativas segundo os critérios estabelecidos e, assim, verificar qual a alternativa é mais adequada para o caso analisado.

Pitchipoo, Vincent, Rajini e Rajakarunakaran (2014) apresentam a aplicação desse método na seleção do design mais adequado de transporte público para permitir a eliminação de pontos-cegos e, assim, reduzir acidentes. Os resultados da aplicação do método COPRAS foram comparados com uma simulação matemática de entropia e os resultados foram semelhantes.

Já o trabalho de Sen, Bhattacharjee e Mandal (2016) apresenta um estudo de caso no qual são comparados alguns métodos de tomada de decisão multicritério, dentre eles o método COPRAS, na seleção do material mais adequado para a fabricação de bielas. Foram considerados critérios como: tensão de ruptura, dureza, limite de fadiga e tensão de escoamento.

Os resultados mostraram que os diferentes métodos utilizados levaram a um ranking de materiais similar.

3 Materiais e Métodos

O estudo de caso realizado nesse trabalho foi feito em uma empresa multinacional de grande porte do setor metalúrgico localizada na região em Piracicaba (SP). Entre os vários produtos que ela fabrica, é feita a produção de chassis de tratores, incluindo processos de tratamento térmico, soldagem, rebarbação e usinagem.

Dentre as operações realizadas, foi selecionado o processo de soldagem para uma peça específica de tratores, a qual faz uso tanto de processos manuais quanto de automatizados de soldagem. A peça escolhida para a análise é mostrada pela Figura 2. Conforme é possível observar, a peça necessita de uma solda com preenchimento de 14 mm no chanfro da junta em 1/2V mais uma solda filete de 20mm em todo o contorno da junta e dos dois lados da peça.

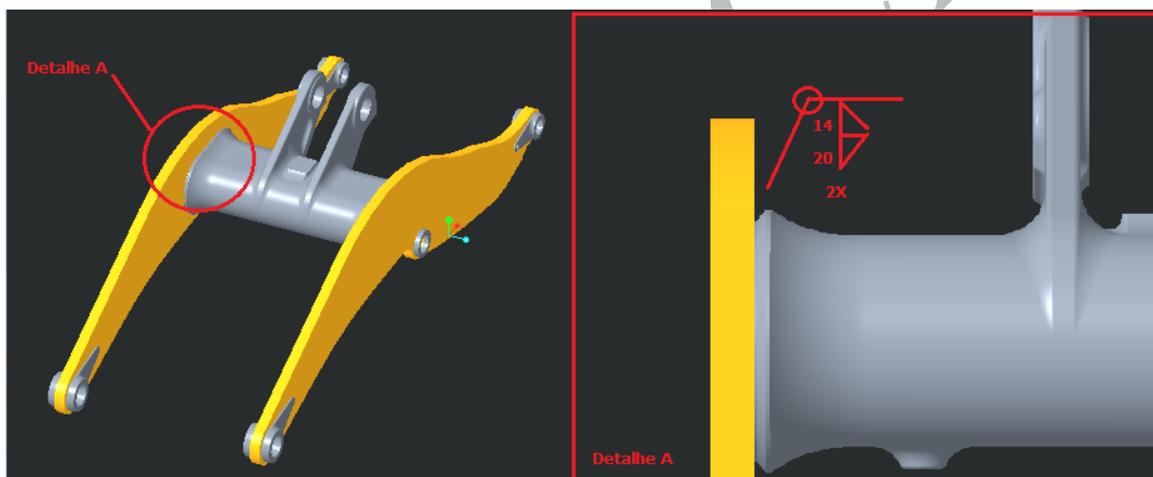


Figura 2 – Peça a ser soldada por um dos processos sugeridos neste trabalho

Fonte: Autores.

De acordo com a empresa, o processo manual foi recentemente substituído pelo processo automatizado, porém o primeiro ainda funciona como um “processo tampão”. Assim, é feita soldagem manual da peça em casos de quebra do robô, paradas para manutenção ou caso a demanda de produção de peças seja maior que a capacidade do robô. A utilização do método AHP COPRAS feita nesse estudo servirá como parâmetro de validação da tomada de decisão pela escolha da tecnologia de soldagem mais adequada ao processo (manual ou automatizado).

Para a coleta de dados do processo, foi necessária a realização de visitas na planta fabril da empresa. Durante as visitas, realizou-se o levantamento dos processos internos, a coleta de dados sobre os processos de soldagem manual e automatizado por meio da observação sistemática (observação da estrutura e equipamentos das células de soldagem, dos

equipamentos de proteção individual utilizados em cada um dos processos, da posição de trabalho do soldador e ergonomia, da qualidade das soldas e do tempo de ciclo do processo) e análise documental de informações de cada um dos processos.

Juntamente com quatro especialistas do processo de soldagem da empresa analisada (três engenheiros de solda e um analista de processo de soldagem), foram definidos os quatro critérios mais importantes nessa atividade: Segurança e Ergonomia, Qualidade, Produtividade e Custo - baseados nos critérios globais já utilizados pela empresa. Durante a tomada de decisão ou durante a resolução de algum problema, os funcionários são motivados pela norma interna da empresa analisada a sempre priorizar a Segurança e Ergonomia, seguido de Qualidade, Produtividade e, por fim, Custo. Essa prática reforça o quão importante é para a empresa manter os funcionários seguros e saudáveis, seguido do comprometimento com a qualidade do produto e satisfação dos clientes. Sendo assim, os critérios definidos para análise foram:

- **Segurança e ergonomia:** durante a soldagem, há a emissão de gases tóxicos, bem como a ocorrência de temperaturas elevadas na linha de solda. Além disso, dependendo da geometria da peça, pode haver problemas de ergonomia para o soldador, já que essa atividade é repetitiva e nem sempre a posição de trabalho é adequada. Por esse motivo, a atividade é avaliada pela área de EHS (*Environmental, Health & Safety*, “Meio ambiente, Saúde e Segurança” em português) e pontuada de acordo com o SFMEA (*Safety Failure Modes and Effects Analysis*, “Análise de modo e efeito de falha” em português) para se identificar e classificar os riscos da atividade em baixo, médio ou alto.
- **Qualidade:** quando é verificada alguma não-conformidade durante a inspeção de uma peça, ela é enviada novamente à área de fabricação onde é feito o retrabalho da solda e, em seguida, é feito o retoque a pintura. Além disso, é aberto um evento de qualidade para registrar a não-conformidade, nesse documento constam informações como número da peça, número de série de fabricação, descrição da não-conformidade e tempo total gasto no retrabalho. Com base nas ocorrências desses eventos, considerou-se, como indicador para o critério de qualidade, o gasto anual com retrabalho interno de não-conformidades de solda da peça analisada, tanto para a soldagem manual, quanto para a soldagem automatizada.
- **Produtividade:** o tempo de ciclo do processo de soldagem representa a quantidade de tempo necessário para se finalizar a realização do processo em uma peça e é um item de grande importância na seleção da tecnologia de soldagem, visto que impacta na eficiência da atividade. Como parâmetro de Produtividade, contudo, decidiu-se selecionar o inverso do

tempo de solda, uma vez que essa medida representaria a quantidade de ciclos de processo realizados por hora. Quanto menor o tempo de ciclo, maior a produtividade do processo, pois um maior o número de peças que podem ser produzidas em um turno de trabalho.

- **Custo:** nesse critério, utilizou-se como indicador o tempo de *payback* de cada tecnologia de soldagem avaliada. Nesse sentido, tanto o custo de instalação das tecnologias de soldas avaliadas quanto os de operação e de manutenção de ambas foram avaliadas ao longo do tempo.

A partir da definição dos critérios de avaliação, foi possível realizar a aplicação do AHP COPRAS. O primeiro passo para a aplicação do método consiste na definição da matriz de comparação X_{att} . Essa matriz é feita de acordo com o número de critérios. A diagonal é definida automaticamente como “1”, devido à comparação do critério com ele mesmo. Além disso, os elementos na matriz de decisão são recíprocos de acordo com sua direção na diagonal, conforme mostra a Equação 1:

$$X_{att} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde a_{ij} é o elemento da matriz localizado na linha i ($i = 1, 2, \dots, n$) e na coluna j ($j = 1, 2, \dots, n$). Esses elementos são resultado da comparação binária entre os elementos, na qual um elemento pode ser preferível ou indiferente a outro. É válido salientar a característica recíproca das comparações par-a-par: se um parâmetro A é 3 vezes mais importante que um parâmetro B, tem-se que B possui 1/3 da importância de A. Sendo assim, somente metade das comparações são necessárias (diagonal superior da matriz), já que cada elemento da metade restante (diagonal inferior) pode ser calculado como o inverso de seu elemento simétrico.

Após definir a matriz de comparação, ela é normalizada, dividindo cada elemento pela soma das respectivas colunas (Equação 2).

$$N_{att} = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & \cdots & N_{1n} \\ N_{21} & N_{22} & \cdots & N_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{n1} & N_{n2} & \cdots & N_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$N_{ij} = \frac{a_{ij}}{T_j}, \quad T_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}, \quad 1 \leq j \leq n \quad (3)$$

tal que, \mathbf{N}_{att} é a matriz de decisão normalizada; \mathbf{N}_{ij} é o termo da matriz normalizada localizado na linha \mathbf{i} ($i = 1, 2, \dots, n$) e na coluna \mathbf{j} ($j = 1, 2, \dots, n$); \mathbf{a}_{ij} é o termo da matriz de decisão localizado na linha \mathbf{i} ($i = 1, 2, \dots, n$) e na coluna \mathbf{j} ($j = 1, 2, \dots, n$); e \mathbf{T}_j é a soma dos elementos da coluna \mathbf{j} ($j = 1, 2, \dots, n$).

Em seguida, é obtido o autovetor de prioridade \mathbf{W}_{att} através da média aritmética de cada linha da matriz normalizada (Equação 4).

$$W_{att} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix}, \quad w_j = \frac{\sum_{i=1}^n N_{ij}}{n} \quad (4)$$

onde w_j é a prioridade/peso de cada critério, referente à coluna \mathbf{j} ($j = 1, 2, \dots, n$) da matriz normalizada; e \mathbf{N}_{ij} é o termo da matriz normalizada localizado na linha \mathbf{i} ($i = 1, 2, \dots, n$) e na coluna \mathbf{j} ($j = 1, 2, \dots, n$);

Após a definição do autovetor, deve-se verificar a consistência da matriz de comparações, para identificar possíveis contradições nas entradas, provenientes de problemas como definição vaga do sistema; informações insuficientes; informações incertas; falta de conhecimento/foco do decisor. Para isso, é necessário calcular o índice de consistência (CI) e a taxa consistência (CR).

O índice de consistência é calculado pela Equação 5:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

onde λ_{max} é o máximo autovalor e n é o número de critérios de decisão do problema. A taxa de consistência (CR) é computada a partir da Equação 6:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

tal que RI se refere ao índice randômico, que varia a depender do número de critérios analisados (Polat, Bingol, & Var, 2017).

Para que a matriz atinja um nível de consistência aceitável, a sua taxa de consistência (CR) da matriz deve ser menor que 0,1 (ou seja, 10%), em uma escala de 0 a 1. A razão disso está no

fato de o método aceitar apenas um certo nível de contradições, de modo a mitigar o efeito de contradições nas comparações. Caso a CR atinja valores maiores que 0,1, a matriz de comparação deve ser revisada. Caso a CR da matriz seja menor 0,1, é feita a classificação ou ranqueamento das alternativas a partir do autovetor.

Diferentemente do método AHP convencional, no qual o próximo passo seria o desenvolvimento da matriz de comparação das alternativas, de acordo com a comparação par a par de cada uma delas em relação aos critérios envolvidos; no método AHP COPRAS é feito o desenvolvimento de uma matriz de decisão através das informações quantitativas e qualitativas de cada uma das alternativas.

Segundo Pitchipoo, Vincent, Rajini e Rajakarunakaran (2014), o método AHP COPRAS inicia-se com a ordenação das alternativas segundo os critérios avaliados. São coletados os dados das alternativas e são inseridos em uma matriz de decisão \mathbf{X} , conforme mostrado pela Equação 7:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

tal que, x_{ij} é o termo da matriz de decisão com as alternativas e atributos localizado na linha \mathbf{i} ($i = 1, 2, \dots, n$) e na coluna \mathbf{j} ($j = 1, 2, \dots, m$).

Em seguida essa matriz é normalizada dividindo cada elemento pela soma das respectivas colunas, conforme Equação 8:

$$\bar{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \bar{x}_{11} & \bar{x}_{12} & \cdots & \bar{x}_{1m} \\ \bar{x}_{21} & \bar{x}_{22} & \cdots & \bar{x}_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{n1} & \bar{x}_{n2} & \cdots & \bar{x}_{nm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

tal que, $\bar{\mathbf{X}}$ é a matriz de decisão normalizada das alternativas e atributos; e \bar{x}_{ij} é o termo da matriz normalizada localizado na linha \mathbf{i} ($i = 1, 2, \dots, n$) e na coluna \mathbf{j} ($j = 1, 2, \dots, m$);

O próximo passo é multiplicar essa matriz normalizada das alternativas pelo autovetor W_{att} de prioridades da matriz dos critérios, conforme indicado nas Equações 9 e 10:

$$\hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{11} & \hat{x}_{12} & \cdots & \hat{x}_{1m} \\ \hat{x}_{21} & \hat{x}_{22} & \cdots & \hat{x}_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{x}_{n1} & \hat{x}_{n2} & \cdots & \hat{x}_{nm} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\hat{x}_{ij} = \bar{x}_{ij} * W_{att} \quad (10)$$

onde, \hat{X} é a matriz de decisão ponderada das alternativas e atributos; \hat{x}_{ij} é o termo matriz ponderada das alternativas e atributos, localizado na linha i ($i = 1, 2, \dots, n$) e na coluna j ($j = 1, 2, \dots, m$); \bar{x}_{ij} é o termo da matriz normalizada localizado na linha i ($i = 1, 2, \dots, n$) e na coluna j ($j = 1, 2, \dots, m$); e W_{att} é o autovetor de prioridades.

Depois, é feita a determinação do índice de maximização P_j e do índice de minimização R_j , indicados pelas Equações 11 e 12:

$$P_j = \sum_{i=1}^k \hat{x}_{ij} \quad (11)$$

$$R_j = \sum_{i=k+1}^m \hat{x}_{ij} \quad (12)$$

tal que, P_j é o índice de maximização para j ($j = 1, 2, \dots, n$); R_j é o índice de minimização para j ($j = 1, 2, \dots, n$); \hat{x}_{ij} é o termo matriz ponderada das alternativas e atributos; e k é o número de atributos que deve ser maximizado.

Os critérios utilizados para na composição de P_j são aqueles que quanto maior o seu valor, melhor será o resultado da alternativa. Os critérios usados para a composição do R_j , por outro lado, são o inverso: Quanto menor o valor, melhor será o resultado da alternativa.

Por último, é feita a determinação do peso relativo para cada alternativa (Q_j), que é o que possibilita a priorização das alternativas: quanto maior o valor de Q_j , melhor será a alternativa (Equação 19).

$$Q_j = P_j + \frac{\sum_{j=1}^n R_j}{R_j \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_j}} \quad (13)$$

onde, Q_j é peso relativo da alternativa j ($j = 1, 2, \dots, n$); P_j é o índice de maximização para j ($j = 1, 2, \dots, n$); e R_j é o índice de minimização para j ($j = 1, 2, \dots, n$).

4 Resultados e Discussão

Após as definições dos critérios, realizou-se a coleta de informações na empresa, por meio de entrevistas com especialistas (analistas e engenheiros do processo de soldagem, e profissionais de EHS) e análise de dados dos processos, possibilitando a quantificação dos quatro critérios de seleção das tecnologias de soldagem: Segurança e Ergonomia, Qualidade, Produtividade e Custo.

4.1. Segurança e ergonomia

A partir do uso da ferramenta SFMEA, identificou-se que o processo de soldagem manual da peça escolhida possuía risco médio, já que a posição de soldagem do soldador não era adequada, a atividade era repetitiva e, em alguns momentos, o soldador precisa se posicionar por debaixo da peça. A Figura 3 mostra a posição do soldador para a operação de soldagem manual:



Figura 3 – Posição do soldador durante o processo de soldagem manual

Fonte: Autores.

No caso da soldagem automatizada, por outro lado, a avaliação do SFMEA indicou que o processo possuía risco baixo, já que o soldador só entra em contato com a peça quando coloca ela na célula de soldagem e quando vai removê-la.

A partir da avaliação qualitativa dos riscos ocupacionais das duas tecnologias de soldagem, realizou-se a quantificação desses riscos conforme apresentado no trabalho de Rao (2013), que apresenta uma regra de conversão de variáveis linguísticas em valores Fuzzy. A Tabela 2 apresenta os resultados, tanto qualitativos quanto quantitativos, das tecnologias de soldagem estudadas para o critério “Segurança e Ergonomia”.

Tabela 2 – Resultados quantitativos para o indicador de Segurança e Ergonomia – Qualificação SFMEA

Tecnologia	Risco	Valor Fuzzy [-]
Soldagem manual	Médio	0,5
Soldagem automatizada	Baixo	0,3182

Fonte: Autores.

4.2 Qualidade

Avaliando os dados de produção da empresa, verificou-se a quantidade de horas de retrabalho interno por ano foi de 5 horas para a soldagem manual e de 3 horas para a soldagem automatizada, considerando a mesma produção anual de peças para os dois casos. Além disso, identificou-se que o custo da hora de retrabalho também era a mesma nos dois casos (R\$ 200,00). A partir desses valores, foi possível calcular o custo anual total de retrabalho para as duas tecnologias de soldagem, conforme mostra a Tabela 3:

Tabela 3 – Resultados para o indicador de Qualidade – Custo de retrabalho interno

Tecnologia	Tempo total de retrabalho [h]	Custo por hora de retrabalho [R\$]	Custo de retrabalho interno [R\$]
Soldagem manual	5	R\$ 200,00	R\$ 1.000,00
Soldagem automatizada	3	R\$ 200,00	R\$ 600,00

Fonte: Autores.

4.3 Produtividade

Após análise dos dados de produção dos dois tipos de tecnologia, verificou-se que tempo médio de ciclo da soldagem manual foi de 3,79 horas, enquanto para a soldagem automatizada esse tempo foi de 1,45 horas. A partir dessas informações, determinou-se o indicador de produtividade para cada caso, calculando-se o inverso dos tempos médios de ciclo (Tabela 4).

Tabela 4 – Resultados do indicador de Produtividade – Ciclos de soldagem por hora

Tecnologia	Tempo médio de ciclo [h]	Produtividade [ciclos/h]
Soldagem manual	3,79	0,264
Soldagem automatizada	1,45	0,690

Fonte: Autores.

4.4 Custo

A Tabela 5 apresenta os dados gerais de faturamento, custos e impostos mensais referentes aos processos de soldagem manual e de soldagem automatizado.

Tabela 5 – Resultados do indicador de Custo – Cálculo do tempo de *payback* em meses, a partir dos dados de faturamento, custos, impostos mensais, investimento cumulativo, receita líquida cumulativa mensal para as duas tecnologias de soldagem avaliadas.

Parâmetro	Soldagem Manual	Soldagem Automatizada
Produtividade [peça/h]	0,264	0,690
Horas trabalhadas em um dia [h/dia]	16	16
Dias trabalhados em um mês [dia/mês]	21	21
Horas trabalhadas em um mês [h/mês]	336	336

Capacidade de produção mensal [peças/mês]	88,67	231,83
Faturamento por peça [R\$/peça]	R\$ 17.721,94	R\$ 17.721,94
Faturamento Mensal Total [R\$]	R\$ 1.571.404,42	R\$ 4.108.477,35
Custo Mensal por Operador [R\$/mês]	R\$ 4.884,45	R\$ 4.884,45
Números de operadores [-]	3	2
Custo mensal com mão de obra [R\$]	R\$ 14.653,35	R\$ 9.768,90
Custo de material por peça [R\$/peça]	R\$ 11.847,40	R\$ 11.847,40
Custo mensal com material [R\$]	R\$ 1.050.508,96	R\$ 2.746.582,74
Custo mensal com retrabalho [R\$]	R\$ 83,33	R\$ 50,00
Outros Processos [R\$]	R\$ -	R\$ -
Custos Mensais Totais [R\$]	R\$ 1.065.245,64	R\$ 2.756.401,64
IRPJ - Alíquota 15% [R\$]	R\$3.000,00	R\$ 3.000,00
IRPJ - Alíquota 25% [R\$]	R\$34.967,05	R\$86.338,67
CSLL [R\$]	R\$14.388,14	R\$32.881,92
PIS [R\$]	R\$22.478,88	R\$58.774,67
COFINS [R\$]	R\$103.539,09	R\$270.719,68
ICMS [R\$]	R\$208.988,93	R\$546.435,34
Impostos Anuais Totais[R\$]	R\$387.362,08	R\$998.150,28
Investimento Cumulativo do Processo [R\$]	R\$ 135.169,42	R\$ 1.329.731,26
Receita Líquida Cumulativa mensal [R\$]	R\$ 118.796,70	R\$ 353.925,43
Período de Payback [meses]	2	4

Fonte: Autores.

Em ambos os casos, considerou-se que um mês possui 21 dias úteis e que cada dia útil tinha dois turnos de trabalho, totalizando 16 horas diárias. O custo mensal por operador (R\$ 4.884,45), o custo de material por peça produzida (R\$ 11.847,40) e o faturamento por peça (R\$ 17.721,94) também foram considerados os mesmos para os dois casos.

Para cada tipo de processo, considerou-se o indicador de produtividade apresentado pela Tabela 4. O custo mensal com retrabalho foi o mesmo utilizado como indicador de qualidade para os processos (Tabela 3). Um ponto importante de diferença entre os processos foi a necessidade de um operador a menos para o processo automatizado, em comparação com o processo manual. A partir dos dados mensais ajustados de faturamento, custos e impostos, mantendo-se o investimento cumulativo necessário tanto para a soldagem manual quanto para a automatizada, foi possível calcular o período de *payback* em meses para cada um dos processos, métrica esta usada como parâmetro de Custo.

É possível identificar da Tabela 5 que o período de *payback* para a soldagem manual foi de 2 meses e o da soldagem automatizada de 4 meses.

4.5 Aplicação do método AHP COPRAS

A primeira etapa da aplicação do método AHP COPRAS foi a construção da matriz de comparação por parte dos especialistas entrevistados, os quais definiram os elementos da matriz

por meio de um processo de consenso. A Equação 14 representa a matriz de comparação obtida e a Equação 15 apresenta a mesma matriz normalizada:

$$\begin{bmatrix} 1 & 7 & 8 & 9 \\ 0,14 & 1 & 4 & 5 \\ 0,13 & 0,25 & 1 & 2 \\ 0,11 & 0,20 & 0,5 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} 0,73 & 0,83 & 0,59 & 0,53 \\ 0,10 & 0,12 & 0,30 & 0,29 \\ 0,09 & 0,03 & 0,07 & 0,12 \\ 0,08 & 0,02 & 0,04 & 0,06 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Em seguida, foi definido o vetor de priorização dos critérios W_{att} , conforme mostrado pela Equação 16:

$$\begin{bmatrix} 0,669 \\ 0,203 \\ 0,078 \\ 0,05 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Após a matriz de preferência estar completa, deve-se verificar a sua consistência para identificar possíveis contradições nas entradas. Para essa avaliação, foram calculados o índice de consistência $CI = 0,088$ e, posteriormente, a taxa de consistência $CR = 0,097$. Como a taxa de consistência CR encontrada foi menor que 0,1, deu-se continuidade aos cálculos.

Em seguida, foram coletadas as informações de Segurança e Ergonomia, Qualidade, Produtividade e Custo para a criação da matriz de decisão (Equação 17) e a matriz de decisão normalizada (Equação 18).

$$\begin{bmatrix} 0,5 & 1000 & 0,264 & 2 \\ 0,3182 & 600 & 0,690 & 4 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} 0,61 & 0,63 & 0,28 & 0,33 \\ 0,39 & 0,38 & 0,72 & 0,67 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Realizou-se, então, a multiplicação da matriz de decisão normalizada (Equação 18) pelo vetor de priorização dos critérios W_j (Equação 16). O resultado consiste na matriz ponderada das alternativas com relação aos critérios definidos anteriormente (Equação 19).

$$\begin{bmatrix} 0,41 & 0,13 & 0,02 & 0,02 \\ 0,26 & 0,08 & 0,06 & 0,03 \end{bmatrix} \quad (19)$$

A partir da matriz ponderada de decisão (Equação 19), foi feita a determinação do índice de maximização P_j , através dos somatórios dos critérios benéficos, e do índice de minimização R_j , através do somatório dos critérios não-benéficos.

Foi considerado benéfico o critério **Produtividade**, uma vez que quanto maior o seu valor, maior é a eficiência do processo e menor o tempo de ciclo necessário para se produzir uma peça. Foram considerados não-benéficos os critérios: **Segurança e Ergonomia**, já que quanto maior o valor numérico para a alternativa, pior é o seu resultado no SFMEA; **Qualidade**, porque quanto maior o custo do retrabalho no ano, maior é a ocorrência de não-conformidades no processo de solda; **Custo**, uma vez que quanto maior o período de *payback* para a implementação de uma tecnologia, menos atrativa ela é.

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para P_j e R_j e Q_j :

Tabela 6 – Determinação de P_j , R_j e Q_j dos processos de soldagem avaliados.

	P_j	R_j	Q_j
Soldagem manual	0,02	0,56	0,39
Soldagem automatizada	0,06	0,37	0,61

Fonte: Autores.

Como esperado, o P_j das duas alternativas foi composto apenas pelos resultados ponderados de Produtividade, presentes na terceira coluna da matriz ponderada das alternativas (Equação 19). O R_j das duas alternativas, por sua vez, foi formado a partir de uma composição ponderada dos outros três critérios, com maior participação da Segurança e Ergonomia (73,2% para a soldagem manual e 70,3% para a soldagem automatizada), seguida pela Qualidade (23,2% para a soldagem manual e 21,6% para a soldagem automatizada) e pelo Custo (3,6% para a soldagem manual e 8,1% para a soldagem automatizada).

Por último, de acordo com os resultados de Q_j , o processo automatizado é o mais adequado para soldagem da peça tomada como base nesse estudo de caso.

4.6 Discussão

O vetor de priorização W_{att} (Equação 16) indica que, para os especialistas entrevistados, o grau de importância dos critérios, do maior para o menor, se dá da seguinte forma: Segurança e Ergonomia, Qualidade, Produtividade e Custo. Tal priorização possui grande aderência com as

diretrizes e normas internas da empresa de sempre considerar a Segurança e Ergonomia dos colaboradores em primeiro lugar.

A Qualidade também é compreendido como de alto grau de importância por parte da empresa, uma vez que esta precisa se adequar às normas nacionais e internacionais e deve garantir a satisfação do cliente. Além disso, o processo deve ter alta confiabilidade e repetibilidade de modo a evitar retrabalhos e inspeções. Também é importante comentar que existe uma recomendação do design da peça para que as soldas sejam feitas de modo automatizado/robotizado, uma vez que isso reduz o tempo de ciclo do processo e proporciona soldas com alto desempenho à fadiga. A soldagem automatizada também permite melhor aparência e penetração de solda.

A Produtividade e o Custo, apesar de terem sido considerados de menor importância, permitem verificar a eficiência produtiva e financeira do processo. Se o projeto de um novo processo de manufatura não proporciona a redução de tempo de ciclo, de custo operacional (e.g., mão-de-obra, insumos) ou se o custo de implantação dele é muito alto, ele pode ser inviabilizado, mesmo estando de acordo com os itens de Qualidade e de Segurança e Ergonomia.

Quanto ao resultado da aplicação do método AHP COPRAS para o estudo de caso escolhido, identificou-se que a soldagem automatizada é mais adequada, alcançando melhores desempenhos nos três critérios mais relevantes:

- 1) Segurança e ergonomia:** o processo automatizado obteve uma classificação menor de risco dentro do SFMEA da operação, devido à redução da interação homem-peça, ausência de posições não-ergonômicas do operador durante a atividade e ausência de contato direto do operador com gases e fumos gerados pelo processo. Além disso, para garantir a segurança do operador do robô, o sistema de segurança da célula de soldagem conta com barreira de luz e scanner (para certificar que ninguém esteja dentro da célula ao ser resetado e reiniciado), portas de segurança, botões de emergência e botão de habilitação para movimentação em modo manual.
- 2) Qualidade:** o processo automatizado gerou menos não-conformidades, levando a uma redução no custo com retrabalho interno devido a defeitos nas soldas. Tal indicador garante maior repetibilidade do processo, eliminando as variações de tamanho e direcionamento do arame. É importante ressaltar que, enquanto o processo manual é feito em 20 passes de solda, o processo automatizado é feito em 7 passes, o que reduz a chance de gerar não-conformidades de solda.

O robô também conta com recursos para acompanhamento de junta, assim toda a trajetória na junta da peça é orientada por meio de pontos contidos na mesma. O robô faz a correção

da trajetória a partir da variação da corrente elétrica obtida durante o movimento de costura (*weave*). Ele permite compensar os desvios dimensionais e as distorções da peça durante o processo de soldagem (Rout, Deepak, & Biswal, 2019). Isso ajuda a garantir a qualidade da solda, reduzindo/eliminando problemas como: falta de fusão, solda com pernas desiguais, sobreposição e mordedura.

Além disso, a ferramenta *search* do robô permite corrigir a variação das peças desde o primeiro ponto, antes de iniciar a soldagem. O arame é energizado e dirigido lentamente à junta afim de obter a diferença de posição (x, y, z) em relação à peça de referência e, conseqüentemente, atribuir essa diferença em todos os pontos dessa junta (Rout, Deepak, & Biswal, 2019).

- 3) **Produtividade:** com o uso da célula de soldagem automatizada/robotizada, foi possível reduzir em 61,7% o tempo de ciclo da soldagem cada peça e, assim, aumentar a capacidade produtiva do processo. Além disso, o robô dentro da célula automatizada permite movimentos livres mais rápidos e tempos reduzidos de parada para manutenção e de troca de peça (Bolmsjö, 1988; Rout, Deepak, & Biswal, 2019).
- 4) **Custo:** apesar de ter apresentado um desempenho pior nesse quesito, o peso relativo desse critério representou apenas 8,1% do índice R_j da soldagem automatizada, não impactando, assim, substancialmente seu índice Q_j . Vale salientar que, apesar de a soldagem automatizada ter apresentado um período maior de *payback*, ela possibilita a redução direta e indireta dos custos operacionais do processo, tais como a redução de mão-de-obra, redução do consumo de equipamentos de proteção individual, melhora o fluxo de produção com diminuição do tempo de ciclo e diminuição das paradas do processo.

Um possível trabalho futuro nessa linha de pesquisa seria a realização de uma análise de sensibilidade, considerando diferentes pesos para cada um dos critérios e verificando quais seriam os diferentes resultados que poderíamos alcançar – como foi feito no artigo de Sproesser *et al.* (2016) para seleção de processo de soldagem. Uma outra possibilidade seria além de utilizar o método AHP COPRAS, aplicar outros métodos de tomada de decisão multicritério, tais como MOORA, TOPSIS e VIKOR, para compreender suas diferenças, como foi feito em Sen, Bhattacharjee e Mandal (2016) para seleção de material para fabricação de bielas.

5 Considerações Finais

O presente trabalho propôs um método de tomada de decisão baseado no AHP-COPRAS para selecionar a tecnologia de soldagem (manual, automatizada) mais adequada, a partir da definição e quantificação de diferentes critérios relevantes para o processo.

Como meio de verificar a aplicabilidade desse método, um estudo de caso foi realizado em uma empresa multinacional do ramo metalúrgico. Durante o estudo de caso, foram definidos quatro critérios a serem considerados para a seleção, i.e., Segurança e Ergonomia, Qualidade, Produtividade e Custo, de acordo com as orientações de engenheiros e especialistas do processo de soldagem da empresa estudada.

A partir da aplicação do método proposto, foi quantificar os indicadores das diferentes categorias avaliadas, bem como identificar a melhor solução tecnológica de soldagem para o caso avaliado. Nesse sentido, a soldagem automatizada se mostrou mais adequada, pois obteve o melhor resultado de Q_j , devido ao melhor desempenho nos três critérios de maior importância: Segurança e Ergonomia, Qualidade e Produtividade. Apesar do desempenho da soldagem automatizada ter sido pior no critério Custo, seu resultado nesse critério representou apenas 8,1% do índice R_j , não ocasionando um impacto substancial no seu índice Q_j .

Para além dos resultados encontrados, sugere-se a investigação futura dos resultados encontrados a partir de uma análise de sensibilidade dos parâmetros encontrados pelo AHP COPRAS, bem como aplicação de outros métodos de tomada de decisão multicritério (e.g., MOORA, TOPSIS e VIKOR) como próximas etapas da presente pesquisa.

Por fim, assim como o método AHP COPRAS foi aplicado na seleção do processo de soldagem para essa peça do estudo de caso, uma outra proposta de trabalho futuro seria aplicá-lo em outros casos/peças, considerando, evidentemente, as especificidades para a produção individuais de cada processo/peça, como requisitos de geometria e desenho, pontuação no SFMEA, custos de investimento e operacionais, bem como o atendimento às exigências de qualidade e tempo de processo.

Referências

- Aşchilean, I., Badea, G., Giurca, I., Naghiu, G. S., & Iloaie, F. G. (2017). Choosing the Optimal Technology to Rehabilitate the Pipes in Water Distribution Systems Using the AHP Method. *Energy Procedia*, 112, 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1109>
- Bolmsjö, G. S. (1988). Robotic Arc Welding – Programming and Control. *IFAC Proceedings Volumes*, 21(16), 541–546. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)54665-0](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)54665-0)
- Bologa, O., Breaz, R.-E., & Racz, S.-G. (2018). Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) and fuzzy logic to evaluate the possibility of introducing single point incremental

forming on industrial scale. *Procedia Computer Science*, 139, 408–416.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.262>

Correia, D. S., & Ferraresi, V. A. (2007). Welding process selection through a double criterion: Operational costs and non-quality costs. *Journal of Materials Processing Technology*, 184(1–3), 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.006>

Faria I. C. S., Filleti R. A. P., & Heleno A. L. (2022). Evolução dos Processos de Automação em Células de Soldagem: Uma Revisão da Literatura. *Soldagem & Inspeção*, 27, 1–16.
<https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI27.04>

Goswami, S. S., & Mitra, S. (2020). Selecting the best mobile model by applying AHP-COPRAS and AHP-ARAS decision making methodology. *International Journal of Data and Network Science*, 4(1), 27–42. <https://doi.org/10.5267/j.ijdns.2019.8.004>

Gürcan, Ö. F., Yazıcı, İ., Beyca, Ö. F., Arslan, Ç. Y., & Eldemir, F. (2016). Third Party Logistics (3PL) Provider Selection with AHP Application. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 235, 226–234. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.11.018>

Marques, P. V., Modenesi, J. P., & Bracarense, A. Q. (2009). *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia*. 3ª ed. Belo Horizonte: Editora UFMG.

Pinto, G. F. L., Silva, F. J. G., Campilho, R. D. S. G., Casais, R. B., Fernandes, A. J., & Baptista, A. (2019). Continuous improvement in maintenance: a case study in the automotive industry involving Lean tools. *Procedia Manufacturing*, 38, 1582–1591.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.127>

Pitchipoo, P., Vincent, D. S., Rajini, N., & Rajakarunakaran, S. (2014). COPRAS Decision Model to Optimize Blind Spot in Heavy Vehicles: A Comparative Perspective. *Procedia Engineering*, 97, 1049–1059. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.383>

Polat, G., Bingol, B. N., & Var, O. (2017). An Integrated Multi-criteria-decision-making Tool for Mechanical Designer Selection. *Procedia Engineering*, 196, 278–285.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.200>

- Rao, R. V. (2013). *Decision Making in Manufacturing Environment Using Graph Theory and Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods*. Londres: Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4375-8>
- Rout, A., Deepak, B.B.V.L., & Biswal, B.B. (2019). Advances in weld seam tracking techniques for robotic welding: A review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 56, 12–37. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.08.003>
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process - what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. Nova York: McGraw-Hill.
- Sen, B., Bhattacharjee, P., & Mandal, U. K. (2016). A comparative study of some prominent multi criteria decision making methods for connecting rod material selection. *Perspectives in Science*, 8, 547–549. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.06.016>
- Silva, G. V., & Silva, G. C. (2018). Virtual Prototyping of an Automotive Manufacturing Cyber-Physical System based on Artificial Neural Network. *Journal of Production and Automation (JPAUT)*, 1(2), 41–58. Disponível em: <https://jpaut.com.br/wp-content/uploads/2018/12/VENTURA-SILVA-CANUTO-DA-SILVA-2018-V1.pdf>
- Sousa, J. V., Melo, F. J. C., Aquino, J. T., & Jerônimo, T. de B. (2021). Using AHP to improve manufacturing processes in TPM on industrial and port complex. *Exacta*, 19(3), 523–549. <https://doi.org/10.5585/exactaep.2021.16693>
- Sproesser, G., Schenker, S., Pittner, A., Borndörfer, R., Rethmeier, M., Chang, Y.-J., & Finkbeiner, M. (2016). Sustainable Welding Process Selection Based on Weight Space Partitions. *Procedia CIRP*, 40, 127–132. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.077>
- Wang, Q. Y., Cheng, Y. C., Jiao, W. H., Johnson, M. T., & Zhang, Y. M. (2019). Virtual reality human-robot collaborative welding: A case study of weaving gas tungsten arc welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 48(5), 210–217. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.10.016>
- Weman, K. (2012). *Welding processes handbook*. 2^a ed. Cambridge: Woodhead Publishing.

Xue, B., Chang, B., Peng, G., Gao, Y., Tian, Z., Du, D., & Wang, G. (2019). A Vision Based Detection Method for Narrow Butt Joints and a Robotic Seam Tracking System. *Sensors*, 19(5), 1144. <https://doi.org/10.3390/s19051144>

Zavadskas, E. K., Turkis, Z., Tamosaitiene, J., & Marina, V. (2008). Selection of construction project managers by applying COPRAS-G method. *Computer Modelling and New Technologies*, 12(3), 22–28. Disponível em: http://www.cmnt.lv/upload-files/ns_3912_3_cmnt2008.pdf

ARTIGO ACEITO