

INTEGRAÇÃO DAS DIMENSÕES DA SUSTENTABILIDADE POR MEIO DE ITERAÇÃO DO MÉTODO AHP: IDENTIFICANDO QUAL O MELHOR PROCESSO DE MANUFATURA

**INTEGRATION OF SUSTAINABILITY DIMENSIONS THROUGH
ITERATION OF THE AHP METHOD: IDENTIFYING THE BEST
MANUFACTURING PROCESS**

INTEGRAÇÃO DAS DIMENSÕES DA SUSTENTABILIDADE POR MEIO DE ITERAÇÃO DO MÉTODO AHP: IDENTIFICANDO QUAL O MELHOR PROCESSO DE MANUFATURA

INTEGRATION OF SUSTAINABILITY DIMENSIONS THROUGH ITERATION OF THE AHP METHOD: IDENTIFYING THE BEST MANUFACTURING PROCESS

Leandro Dóro Tagliari¹ • Rodrigo Panosso Zeilmann²
Vandré Brião³

Data de recebimento: 17/02/2024

Data de aceite: 29/05/2024

¹ Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade de Passo Fundo, Especialista em Engenharia da Produção e Manufatura, Mestre em Engenharia e Doutor em Engenharia pela Universidade de Passo Fundo. É professor da Universidade de Passo Fundo nas faculdades de Engenharia Mecânica, Engenharia da Produção e no Curso Superior em Tecnologia em Fabricação Mecânica. Atualmente concluiu o curso de graduação em matemática.

E-mail: leandrotagliari@upf.br

² Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade de Passo Fundo, mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina e doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina e RWTH-Aachen. Atualmente é Professor Pesquisador da Universidade de Caxias do Sul.

E-mail: rpzeilma@ucs.br

³ Professor dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental e Ciência e Tecnologia de Alimentos da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo e dos cursos de graduação em Engenharia de Alimentos, Engenharia Ambiental e Engenharia Química. Engenheiro de Alimentos pela Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Mestre e Doutor em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá. Atualmente é professor titular da Universidade de Passo Fundo.

E-mail: vandre@upf.br

RESUMO

O estudo compara métodos de manufatura em termos de sustentabilidade. Para tal, dois processos de furação foram avaliados utilizando o método multicritério AHP (Analytic Hierarchy Process) e comparados, indicando qual pode ser considerado mais sustentável. Estes registros de fabricação foram coletados como um estudo de caso para a validação e comparação entre o software VIP analysys e o método proposto que utiliza planilhas desenvolvidas no software Excel do windows. Para realizar a avaliação da sustentabilidade os dois métodos propostos utilizam o método multicritério AHP. Os resultados da avaliação mostram que o software VIP análises apresenta índices ambientais, sociais e econômicos da sustentabilidade para cada um dos processos e o modelo proposto também traz uma grande contribuição para a fundamentação teórica que é a interação das três dimensões da sustentabilidade em um único índice qualitativo informando aos stakeholders qual dos processos pode ser considerado o mais sustentável considerando as três dimensões da sustentabilidade ambiental, social e econômico. Os resultados propostos validam a técnica perante o estado da arte e mostra que o processo de furação por escoamento apresenta índice de sustentabilidade de 0,58, enquanto o processo de furação convencional apresenta índice 0,42. A grande novidade científica é a interação das dimensões da sustentabilidade propiciando um único indicador de qual processo é o mais sustentável, possibilitando uma grande novidade para gestores industriais e stakeholders nas tomadas de decisões na escolha do melhor processo industrial podendo aplicar o modelo em qualquer processo produtivo.

Palavras-chave: Método AHP, sustentabilidade, Processos de Manufatura, Integração dimensões da sustentabilidade.

ABSTRACT

The study compares manufacturing methods in terms of sustainability. For this, two drilling processes were evaluated using the multicriteria method AHP (Analytic Hierarchy Process) and compared, indicating which one can be considered more sustainable. These manufacturing records were collected as a case study for the validation and comparison between the VIP analyzesys software and the proposed method that uses spreadsheets developed in the Windows Excel software. To carry out the sustainability assessment, the two proposed methods use the AHP multicriteria method. The evaluation results show that the VIP analysis software presents environmental, social and economic sustainability indices for each of the processes and the proposed model also makes a great contribution to the theoretical foundation, which is the interaction of the three dimensions of sustainability in a single qualitative index informing stakeholders which of the processes can be considered the most sustainable considering the three dimensions of environmental, social and economic sustainability. The proposed results validate the technique against the state of the art and show that the flow drilling process has a sustainability index of 0.58, while the conventional drilling process has an index of 0.42. The great scientific novelty is the interaction of the dimensions of sustainability, providing a single indicator of which process is the most sustainable, enabling great news for industrial managers and stakeholders in decision-making in choosing the best industrial process, being able to apply the model in any production process .

Keywords: AHP Method, sustainability, Manufacturing Processes, Integration dimensions of sustainability.

INTRODUÇÃO

A manufatura é a coluna vertebral de qualquer nação industrializada. O nível de manufatura de um país está diretamente relacionado com o nível de vida da população (KALPAKJIAN, 2002). A indústria de manufatura envolve diversos setores da economia que são classificados em 15 subdivisões, como a produção de alimentos, de máquinas e equipamentos, de produtos químicos, de produtos metálicos, entre outros. Sobre sua representatividade socioeconômica é responsável por empregar mundialmente cerca de 650 milhões de pessoas. Na Europa, representa 22% do produto interno bruto e 70% dos empregos diretos e indiretos (SILVA *et al.*, 2016).

Silva *et al* (2016) destacam a importância dos processos de produção e aplicações tecnológicas como fatores que ajudam as práticas de gerenciamento. Jabbour (2008) e Jabbour *et al.* (2012) evidenciaram as estratégias das empresas essenciais para associações entre setores da organização focados em atingir níveis de maturidade e a possibilidade de superar desafios. Para Silva *et al.* (2016), as empresas manufactureiras dizem respeito a diferentes setores econômicos que podem ser classificados em 15 subdivisões, como produção de alimentos, máquinas e equipamentos, produção de produtos químicos, produtos metálicos, entre outros. Esses setores respondem por empregos diretos e indiretos.

A usinagem por furação é utilizada em escala na indústria em geral, a mesma representa grande parte das operações de usinagem. É um dos processos de usinagem mais importantes de toda manufatura, 40% dos metais utilizados na indústria aeroespacial passam por processos de furação. Na década de 1990, a furação foi responsável por cerca de 50% dos produtos usinados nos Estados Unidos. Isto mostra a grande importância deste processo nos sistemas de fabricação. Mas por outro lado é considerado um processo pouco estudado, apresenta inúmeras dificuldades em sua compreensão, como variações de geometria e de velocidade ao longo do gume, geração de cavaco dentro do furo usinado, entre outros (BLACK J.T.,2007). A perfuração é um processo dinâmico e complexo afetado por vários fatores, incluindo parâmetros geométricos e materiais da ferramenta (KAPLUNOV, 2020).

A motivação à realização desta pesquisa surge da necessidade que gestores industriais, profissionais liberais, pesquisadores e estudantes tem, no ambiente de trabalho, de pesquisa e de estudo, de uma ferramenta de fácil utilização e acesso que seja uma estratégia empresarial na escolha e definição dos melhores processos de manufatura, considerando as três dimensões da sustentabilidade, aperfeiçoando técnicas e métodos e objetivando uma ferramenta de baixo custo, com eficiência na resolução de problemas complexos. Um dos processos multicritérios mais utilizados é o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*). É uma ferramenta que auxilia o usuário na tomada de decisão e pode ser aplicado em situações diversas aplicável em processo de manufatura.

Por isso, avaliou-se e comparou-se o método desenvolvido na pesquisa com o software VIP *análisis*, sendo que as duas metodologias utilizam o método AHP. O VIP *análisis* foi desenvolvido na Universidade de Coimbra, Portugal. Utilizaram-se dados práticos de um estudo de caso coletados e idealizados com base em um procedimento estruturado desenvolvido na área de fabricação de uma Universidade comunitária na região norte do estado do Rio Grande do Sul no Brasil, onde foram coletados os dados para dois processos de manufatura de furação.

Araújo, (2010) utiliza AHP para avaliar sustentabilidade do torneamento e retificação e afirma que os aspectos para avaliação da manufatura têm que ser condizentes com a realidade industrial. O Quadro 1 lista os principais modelos usadas para a avaliação da sustentabilidade na literatura:

Quadro 1 | Modelos utilizados para avaliar sustentabilidade

| Nº | MODELO/AUTORES | CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS | DIMENSÕES | ESCOPO |
|----|---|---|-----------------------|------------|
| 1 | Modelo Fiksel, Mc Daniel e Mendenhall | Não define aspectos específicos para avaliação de processos de manufatura, depende da experiência do técnico responsável | Triple bottom line | Ampla |
| 2 | Modelo Thoresen | Indicadores ambientais, considera alguns aspectos sociais, aplicação desenvolvimento produtos, processos e serviços sustentáveis | Ambiental | Ampla |
| 3 | Modelo Olsthoorn, Tyteca, Wehrmeyer e Wagner | Trabalha com indicadores populares na prática ou literatura, revisão de diferentes métodos | Ambiental e econômico | Ampla |
| 4 | Modelo Schwarz, beloff e beaver | Modelo que aplica quantidade mínima de indicadores | Econômico e Ambiental | Ampla |
| 5 | Modelo EPA US | Avalia os efeitos ambientais dos processos de manufatura e auxilia nas tomadas de decisões | Econômico e Ambiental | Manufatura |
| 6 | Modelo Hay e Noonam | Auxilia na avaliação e seleção de processos de manufatura amigáveis ao meio ambiente. | Ambiental | Manufatura |
| 7 | Modelo ISO 14031 | Utilizado para avaliação de desempenho da sustentabilidade ambiental, tem como objetivo entender, demonstrar e melhorar as operações das empresas | Ambiental e social | Manufatura |
| 8 | Modelo Labuschagne, Brent e Erck | Medição de desempenho reconhecendo a sustentabilidade nas práticas operacionais | Ambiental | Ampla |
| 9 | Modelo da Associação dos Engenheiros Alemães (VDI) | Segue o modelo <i>plan-do-check-act</i> (Ciclo PDCA) a fase de planejamento importante para definição dos indicadores de desempenho | Triple bottom line | Ampla |
| 10 | Modelo Global Reporting Initiative(GRI) | Utiliza relatórios de sustentabilidade, indicadores podem ser tanto quantitativos quanto qualitativos | Triple bottom line | Ampla |
| 11 | Modelo do Instituto dos Engenheiros Químicos (IchemE) | Indicadores que pudessem ser usados na avaliação da sustentabilidade de sistemas de produção | Triple bottom line | Ampla |
| 12 | Modelo do Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD) | Abordagem flexível, aplicável em diferentes setores empresariais para a medição de desempenho | Triple bottom line | Ampla |
| 13 | Modelo Veleva e Ellenbecker | Ferramenta para a promoção da sustentabilidade no negócio utiliza indicadores padronizados | Econômico e Ambiental | Ampla |
| 14 | Modelo Azapagic | Utiliza <i>framework</i> de indicadores de sustentabilidade para a mensuração do desempenho | Triple bottom line | Ampla |
| 15 | Pmais | Utiliza indicadores | Ambiental | Ampla |
| 16 | Masp-HIS | Utiliza indicadores | Ambiental e Social | Ampla |

Adaptado de Araújo, (2023).

Conforme o Quadro 1, nem todos os modelos avaliam os mesmos aspectos em virtude das características de sua aplicação. Alguns têm aplicação social, outros ambiental e outros econômicos, podendo ainda ter aplicação em uma, duas ou mesmo nas três dimensões da sustentabilidade.

O Quadro 2 resume a revisão recente da fundamentação teórica sobre assuntos relacionados à sustentabilidade e ao método AHP no setor de manufatura:

Quadro 2 | Recentes estudos AHP no setor manufatura

| Nome do autor: | Resumo do artigo: |
|---|---|
| Saaty, T. L. (1980) | Resumo abrangente, principalmente do pensamento e pesquisa do autor, sobre o Processo de Hierarquia Analítica e a tomada de decisão. Inclui teoria matemática avançada e diversas aplicações. |
| B. G. Hermann; C. Kroeze; W. Jawit (2006). | Apresentamos uma nova ferramenta analítica, chamada COMPLIMENT, que pode ser usada para fornecer informações detalhadas sobre o impacto ambiental geral de uma empresa, análise multicritério e indicadores de desempenho ambiental. |
| Nemerow, N.L. (2009). | Trata da Engenharia ambiental e novas tecnologias |
| Marins C.; Souza D.; Barros M. (2009). | Uso do método de análise hierárquica AHP na tomada de decisões gerenciais. |
| P. M. Jannuzzi, W. L. de Miranda, D. S. G. da Silva (2009). | Trata de aspectos metodológicos, operacionalização e aplicação de análise multicritério para tomada de decisão. |
| Finkbeiner, M.; Schau, E. M.; Lehmann, A.; Traverso, M. (2010). | Trata Sustentabilidade e Ciclo de vida de produtos e processos. |
| M. Herva, E. Roca (2012). | Analisa as vantagens de combinar ferramentas complementares de avaliação ambiental - pegada ecológica, avaliação do ciclo de vida e avaliação de riscos ambientais - que foram identificadas como abrangendo as características mais significativas que devem ser consideradas em avaliações corporativas. |
| Linkov, I.; Moberg, E. (2012). | Métodos multiatributos e estudos de caso. |
| Xiaojun Wang, Hing Kai Chan, Dong Li (2014). | Trata do desenvolvimento de produtos ecológicos considerando-se uma estratégia fundamental para muitas empresas. |
| John Willmer Escobar (2014). | Apresenta metodologia para tomada de decisão no mercado de ações utiliza AHP. |
| Allesch, a.; Brunner, p. h. (2014). | Trata dos métodos de avaliação e gerenciamento dos resíduos sólidos. |
| Wang, X., Chan, H.K., Li, D. (2015). | Estuda metodologias para produtos verdes. |
| X. Li; T. Liu; T. Song; X. Du; H. Lin; J. Xião; H=J. He; L. Liu; G. Zhu; W. Zeng; L. Guo; Z. Cao; W. Ma; and Y. Zhang (2017). | Um método de processo de hierarquia analítica (AHP) foi usado para desenvolver um modelo de avaliação de risco semiquantitativo do Zica Vírus. Após a seleção dos indicadores, convidamos especialistas em profissões relacionadas para identificar o peso do índice e com base em que uma estrutura hierárquica foi gerada. Em seguida, uma série de comparações entre pares foi usada para determinar a importância relativa dos critérios. Finalmente, o modelo ótimo foi estabelecido para estimar o risco de transmissão espacial e sazonal do Zica Vírus. |

Fonte: Autores, (2023).

A partir do Quadro 2 observa-se que, embora haja um bom número de estudos avaliando a sustentabilidade usando o método AHP, poucos trabalhos são apresentados na comparação de diferentes processos de manufatura e, mais precisamente, nenhum trabalho é apresentado na indústria, comparando dois processos de furação com base na sustentabilidade.

MATERIAIS E MÉTODOS

É importante destacar que a aplicação dos processos de furação é aplicado em larga escala nas indústrias e a pesquisa é desenvolvida para avaliar o desempenho da sustentabilidade e trazer inovação aos processos nas empresas manufatureiras. Portanto, para contribuir com a fundamentação teórica dos processos de furação, o objetivo desta pesquisa é realizar, através das planilhas Excel desenvolvidas, um método AHP aplicável a manufatura, que faz a mesma análise do VIP *analysis* de Portugal, mas apresenta um avanço ao “Estado da arte”, pela iteração que o método de planilhas Excel desenvolve. Este, unifica as três dimensões da sustentabilidade Ambiental, social e econômico de tal forma que possibilita a quantificação através de valores qual processo é considerado o mais sustentável.

Para Melaré *et al*, (2014), o número de pesquisas na área de processos de fabricação tem aumentado, criando situações de incertezas na tomada de decisão e, por mais que gestores tenham demonstrado grandes esforços para analisar, classificar e obter as melhores condições, é através de análise multicritério, como o AHP, que surgem possibilidades de obter os melhores resultados e avanços tecnológicos.

A metodologia desta pesquisa inclui a fundamentação teórica apresentada na introdução, que identifica lacunas da pesquisa e apresenta estratégias de sustentabilidade na coleta de informações do estudo de caso de furação convencional e de furação por escoamento. Estes dados foram coletados em tempo real durante as fabricações. Foi realizado também um teste para avaliar a pesquisa através de questionários e utilizou-se o software “Decisões+Simples”, criado por Salgado *et. al* (UNIFAL, 2019), para pesar os critérios. Esse sistema da Web facilita e aprimora a tomada de decisões com base no método AHP.

Um questionário foi elaborado e enviado para stakeholders, buscando ponderar os três critérios e os 13 subcritérios, com base na escala recomendada por (SAATY, 1980). As partes interessadas foram contatadas por e-mail, sendo profissionais dos setores de manufatura, engenharia industrial

e sustentabilidade. Os entrevistados foram instruídos a participar da pesquisa e receberam o link para o software, a fim de avaliar os critérios: ambiental, social e econômico e os treze subcritérios.

Seis foram os subcritérios para a dimensão ambiental: consumo de energia, produção de resíduos sólidos, uso de fluido lubrificante na usinagem, consumo de fluido hidráulico, desgaste e vida útil da ferramenta e usinagem por aquecimento. Na dimensão social destacam-se: relação do empregado no trabalho, saúde do empregado, segurança do empregado, segurança do empregado, treinamento do empregado, exposição do empregado à pressão sonora; e dimensão econômica: custo de treinamento dos funcionários, custo R\$ por furo.

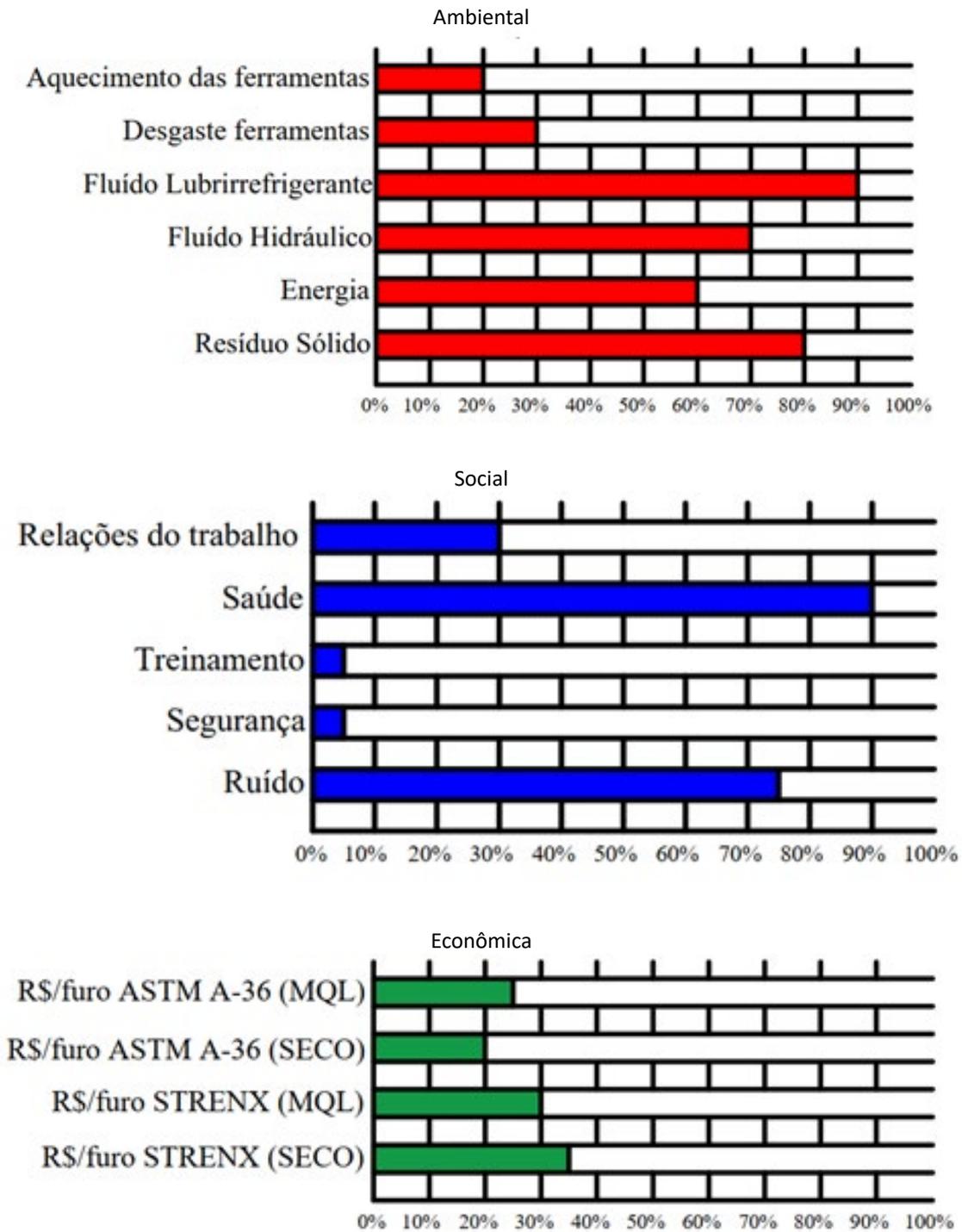
O procedimento pode ser adaptado a qualquer setor e aponta a oportunidade de aprofundar e detalhar a abordagem nas diversas áreas do conhecimento, apresentando suas diferentes aplicações, como em produtos. De Medeiros (2014) diz que um produto ambiental sustentável deve atender positivamente aos requisitos dos consumidores-alvo.

O questionário foi enviado a 120 pesquisadores da área. A taxa de retorno alcançou 30% e obteve-se através deste questionário uma maior clareza e entendimento da sustentabilidade nos processos de furação. As informações da pesquisa realizada junto aos especialistas e os dados gerados das manufaturas do estudo de caso alimentaram as planilhas Excel para avaliação da sustentabilidade nos processos de furação convencional e furação por escoamento no intuito de avaliar e validar as planilhas Excel desenvolvidas.

RESULTADOS

Detalha-se a sustentabilidade do estudo de caso dos processo de manufatura de furação convencional e do processo de manufatura de furação por escoamento de forma compacta e esboçada através de gráficos. Inicialmente monitoraram-se os aspectos no processo produtivo para o processo de furação convencional, conforme informações apresentadas na Figura 1:

Figura 1 | Índices monitorados Furação convencional

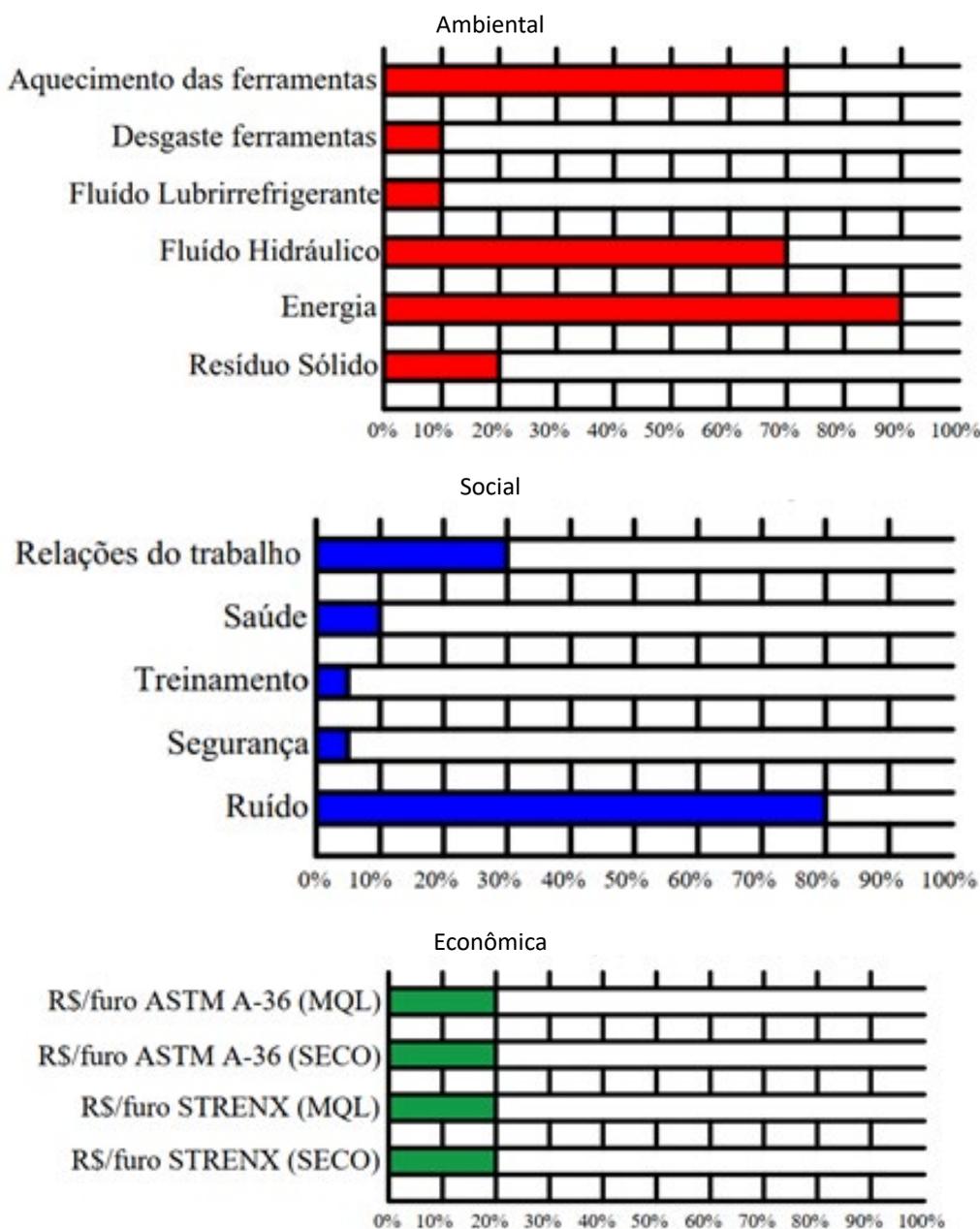


Fonte: Autores, (2023).

Matos *et al.* (2018) consideram importante avaliar todos os aspectos possíveis, desenvolver um modelo que permite considerar os aspectos, tendo em consideração os diferentes fatores de avaliação (ambiente, saúde, questões industriais) e na pesquisa buscou-se este delineamento técnico.

Matos *et al.* (2018) descrevem que situações práticas do operacional, auxiliam no intuito de ter-se melhores resultados com relação aos aspectos e critérios definidos no modelo. Neste sentido, realizaram-se as mesmas análises para o processo de Furação por escoamento conforme a Figura 2:

Figura 2 | Índices monitorados Furação escoamento

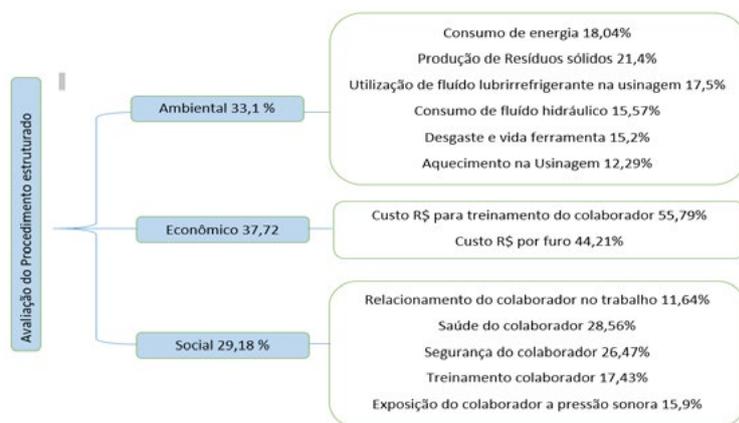


Fonte: Autores, (2023).

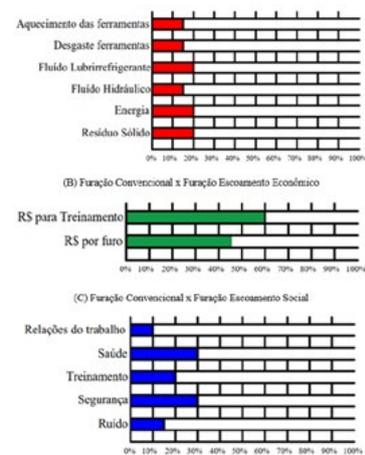
Os dados gerados das manufaturas seguem o procedimento definido apartir da metodologia da pesquisa e estes aspectos foram monitorados durante as operações de fabricação. Matos *et al.* (2018), utilizou a metodologia AHP proposta por Saaty (1980), na recuperação de minas abandonadas: estudo da intervenção em Portugal, montou a matriz de comparações e julgamentos e calculou o vetor coluna (vetor médio). Na metodologia do método AHP, esta análise pondera e avalia os aspectos e o resultado desta iteração são resultados prévios do método.

Na pesquisa desenvolvida avaliou-se cada aspecto linha x coluna considerando qual é o melhor um com relação ao outro (análise par a par) e o resultado pode ser positivo ou negativo para aqueles aspectos. Fujari *et al.* (2003), Visseret *al.* (2008) e Doran e Ryan (2012) observaram que o sucesso da pesquisa social e da pesquisa realizada com as partes interessadas depende da análise de comportamento aplicada a usuários e especialistas, que pode gerar maior ou menor satisfação. A entrevista realizada com os especialistas, visualiza-se os resultados conforme a Figura 3:

Figura 3 | Pesquisa realizada com os especialistas



Fonte: Autores, (2023).



As entrevistas com especialistas da área podem ser aplicadas em pesquisas baseadas no formato de estudo de caso, pois tem o potencial de relacionar benefícios, desafios, aspectos críticos e fatores de sucesso à realidade em um determinado cenário. Elas ainda ajudam a identificar novos fatores que podem ser incluídos nas dimensões ambientais, sociais e econômicas da sustentabilidade relacionadas aos processos de manufatura, além de destacar a evolução do estado da arte e sua contribuição para as referências bibliográficas, trazendo contribuições técnicas e mensuráveis às empresas, ao meio acadêmico, à pesquisa no campo ambiental e ao aprimoramento sustentável de

processos, produtos e serviços.

A dimensão econômica obteve na pesquisa o maior peso (37,72%), entre as três dimensões da sustentabilidade, seguida pela ambiental (33,1%) e sociais (29,18%). Isso caracteriza que a curto prazo o empresário considera muito importante o retorno das ações de manufatura (37, 72%), visando um lucro de maneira imediata.

A escolha deste cenário está interligada a sobrevivência da empresa, que prioriza os itens mais relevantes a sua própria existência e deixa em segundo plano aspectos que podem fazer a diferença e agregar valor, reduzir impactos e propiciar ganhos de sustentabilidade à corporação. No entanto, as ações ambientais aparecem em segundo lugar com 33,1%, demonstrando que a médio prazo já se pensa em adequar processos e realizar ações sustentáveis com técnicas de produção mais limpa, como, exemplo, o uso de energia renovável e limpa, utilizando tecnologias recentes como a energia solar e a vapor, reduzindo significativamente os impactos ambientais (SADA E JAFFAL, 2017).

A mitigação dos resíduos e buscar a utilização destes adequando-os para uma aplicação em novos produtos, trabalhando com a manufatura verde e manufatura sustentável, na maneira de pensar e na forma de projetar os produtos e depois do ciclo de vida na forma de desconstruir para reutilizar.

As ações sociais aparecem em terceiro lugar com (29, 18%), pensando no bem estar do colaborador que estão desenvolvendo as atividades nos processos de manufatura, solução possível a utilização de fluídos lubrificantes biodegradáveis, que não poluam o meio ambiente e que não venham a gerar doenças ocupacionais do trabalho, bem como no processo de fabricação com a utilização de condições de utilização como rotações e velocidades que gerem menores poluições como a Sonora, névoas que possibilitem ao colaborador maior bem estar durante a manufatura.

Resultados da sustentabilidade nas Furações (Média dos Índices): A avaliação da sustentabilidade em um processo requer uma análise ambiental, social e econômica. A pesquisa buscou comparar dois processos de fabricação e avaliar qual pode ser considerado mais sustentável e, por isso, foi necessária uma avaliação detalhada das dimensões da sustentabilidade, considerando aspectos definidos por especialistas por serem os mais importantes na meio industrial e a aplicação do método AHP. Para cada dimensão da sustentabilidade, com relação aos processos pesquisados, avaliou-se cada dimensão da sustentabilidade como descreve-se abaixo:

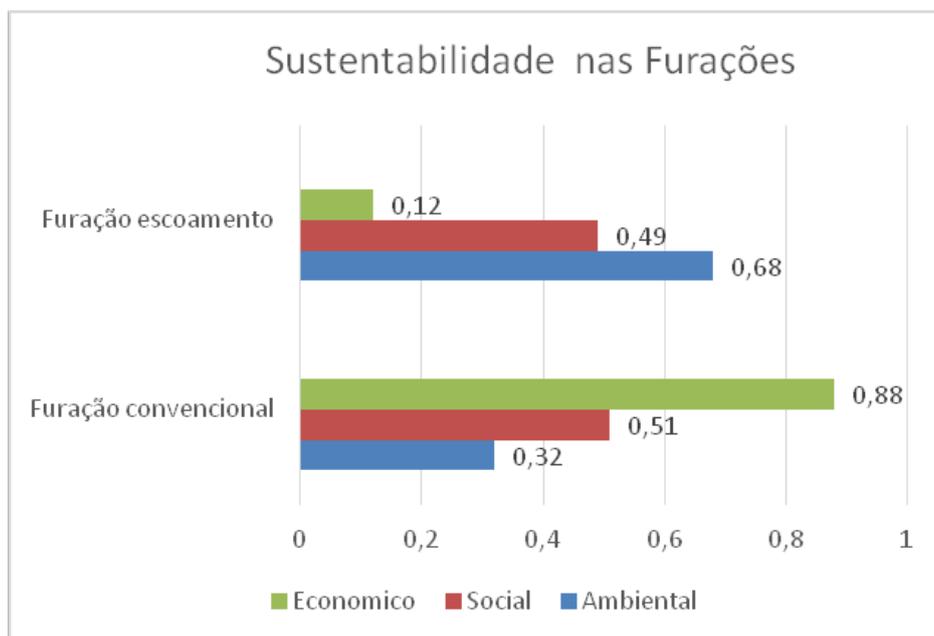
Dimensão Ambiental: Os aspectos ambientais, considerando os estudos de caso de furação convencional e furação por escoamento foram monitorados “*in loco*”, com a utilização de equipamentos como: amperímetros digitais para monitorar a energia consumida nos processos, balança digital para monitorar a massa em (Kg) como resíduo sólido gerado na forma de cavaco, imagens das ferramentas foram realizadas utilizando o estereoscópio para monitorar o desgaste das ferramentas em função da quantidade de perfurações realizadas. O consumo de óleo hidráulico e de fluido lubrificante foi monitorado em função da quantidade de perfurações realizadas e o aquecimento foi monitorado para mensurar a variação de temperatura nas perfurações.

Dimensão Social: Para a estruturação do procedimento social para a avaliação de desempenho em sustentabilidade utilizado na comparação de processos de manufatura de furação convencional e furação por escoamento foi desenvolvida pesquisa técnica por meio de entrevista com os colaboradores do setor de fabricação no intuito de obter-se as informações destes colaboradores com relação as questões sociais relacionadas aos processos de furação convencional e furação por escoamento. Também foram aplicadas Normas técnicas para o levantamento de dados sobre o ruído NR-15 (1990), ABNT NBR 10151 (2019), ABNT NBR 10152 (1987).

Dimensão Econômica: A determinação dos custos diretos de um determinado processo envolve uma série de levantamento de dados. Estas informações foram coletadas através de entrevista com o responsável técnico do setor e ao departamento de recursos humanos da instituição.

As depreciações dos equipamentos foram definidas com o apoio do setor contábil. As tomadas de preços das ferramentas e máquinas foram realizadas com fabricantes de equipamentos e ferramentas. Monitoraram-se as manufaturas dos componentes “*in loco*” com a utilização de cronômetro para monitorar os tempos de fabricação e os tempos de troca de componentes para determinar os custos envolvidos nos processos de furação convencional e furação por escoamento. Em comparação entre os dois processo de manufatura de furação convencional e de furação por escoamento, a avaliação da sustentabilidade apresentou a média dos índices que pode ser visualizada na Figura 4:

Figura 4 | Sustentabilidade nas Furações (Média dos Índices)



Fonte: Autores, (2023).

Com base nas características evidenciadas na Figura 8, é possível visualizar características distintas entre os dois processos de manufatura. O econômico, com furação escoamento (0,12) e furação convencional (0,88), caracterizando que a furação convencional é mais viável. Social, com furação escoamento (0,49) e furação convencional (0,51), apresentando maior valoração a furação convencional por retratar uma maior aplicabilidade na indústria e por ser mais difundido e conhecido. Ambiental, com furação escoamento (0,68) e furação convencional (0,32), que apresenta maior valoração a furação escoamento por não gerar resíduo durante o processo, apresenta menor impacto ambiental e é mais amigável ao meio ambiente.

A questão importante a ser discutida é que, a curto prazo, o empresário opta por um processo que atenda as suas necessidades e que propicie uma maior lucratividade, neste sentido o processo de furação convencional é o que melhor representa esta condição. A médio e longo prazo, com a escassez de recursos, possibilidades de fazer cada vez mais com menos faz com que este cenário se altere e a opção por um processo de manufatura capaz de reduzir impactos seja considerado o fator mais importante e surja outro fator facilitador da sua aplicabilidade que é o desenvolvimento das ferramentas em alta escala de produção, capaz de tornar o processo de furação por escoamento mais barato e tangível a aquisição das ferramentas para todas as empresas de manufatura.

DISCUSSÃO

A validação do modelo desenvolvido, foi realizada através da comparação de resultados entre o *software VIP analysis* desenvolvido na Universidade de Coimbra – Portugal e o modelo desenvolvido e, observou-se que, ambas tecnologias apresentam resultados similares quando avaliadas as dimensões da sustentabilidade tomando como estudo de caso os dados dos processos de manufatura de furação convencional e por escoamento.

No *software VIP analysis* se consegue gerar de forma automática gráficos, enquanto no modelo desenvolvido tem que utilizar os recursos do Excel do Windows em virtude do modelo utilizar esta plataforma. No modelo desenvolvido realizou-se a unificação do índice de sustentabilidade. Possibilitando a comprovação em números qual processo pode ser considerado mais sustentável e no *software VIP* análises a unificação não é direta sendo necessário estudo de como fazer esta unificação.

Para o entendimento do *VIP analysis* foi muito importante a experiência adquirida no desenvolvimento do modelo e facilitou o entendimento e a aplicação do *VIP analysis*. Se pode afirmar que tanto o *VIP analysis* como o modelo desenvolvido apresentam metodologias de fácil utilização e entendimento. Dias, (2000) desenvolve a metodologia multicritério com base no método AHP e o *software VIP analysis* suporta a tomada de decisão em problemas de escolha com um único decisor. Lucato, (2018) mensurou a sustentabilidade nos processos de manufatura, desenvolvendo um modelo conceito que realiza a medição a partir de coordenadas cartesianas e medição da área no gráfico tridimensional. Climaco *et al*, (2015) avalia 03 pacotes de softwares na sua pesquisa e constata que todas as metodologias analisadas desenvolvem métodos multicritérios mas nenhum unifica e quantifica a valoração em um único índice.

Os resultados da iteração demonstram as valorações das dimensões ambientais, sociais e econômicas da sustentabilidade para cada processo de manufatura estudado e os valores apresentados validam as planilhas excel desenvolvidas porque a aplicabilidade do estudo de caso no *software VIP analysis* apresenta os mesmos resultados.

A lacuna da pesquisa e contribuição para a fundamentação teórica descrita no caracteriza-se no desenvolvimento de tecnologia que realizei é a iteração das dimensões em um único índice de sustentabilidade. As planilhas Excel desenvolvidas apresentam os resultados da avaliação da sustentabilidade conforme a Figura 5:

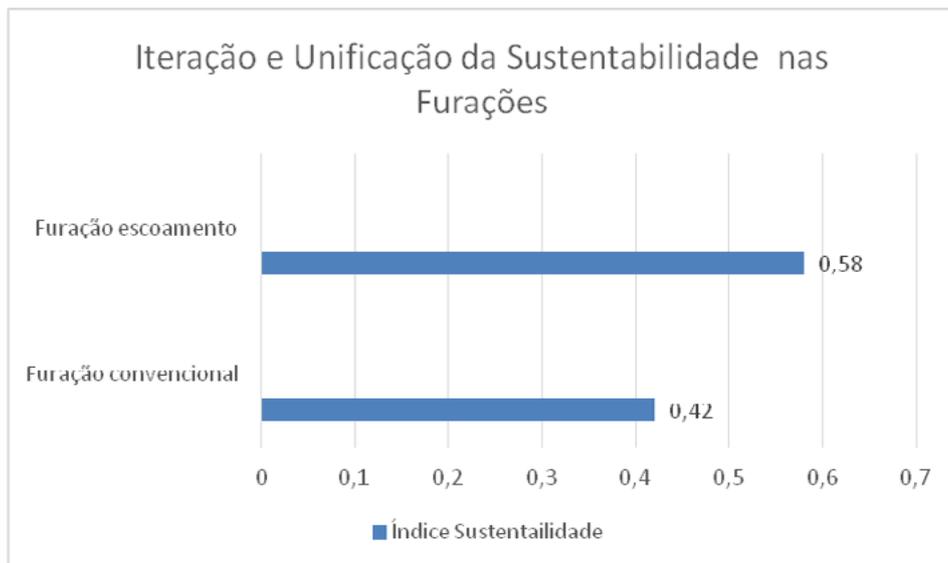
Figura 5 | Iteração da Sustentabilidade

| Furação Convencional | Ambiental | Social | Economico | |
|----------------------------|-----------|--------|-----------|-------------------------|
| Vetor Médio x Normalização | 0,32 | 0,51 | 0,88 | |
| Furação Escoamento | Ambiental | Social | Economico | |
| Vetor Médio x Normalização | 0,67 | 0,49 | 0,12 | |
| | | | | |
| | Ambiental | Social | Econômico | Índice Sustentabilidade |
| Furação Convencional | 0,32 | 0,51 | 0,88 | 0,42 |
| Furação Escoamento | 0,68 | 0,49 | 0,12 | 0,58 |
| Normalização (Média) | 0,33 | 0,05 | 0,37 | |

Fonte: Autores, (2023).

Esta iteração das dimensões da sustentabilidade apresentando a valoração em índices únicos para cada processo de manufatura se visualiza na Figura 6:

Figura 6 | Iteração da Sustentabilidade



Fonte: Autores, (2023).

Dias, (2000) desenvolve a metodologia multicritério com base no método AHP e o *software* VIP analysis suporta a tomada de decisão em problemas de escolha com um único decisor. Mas nenhum destes pacotes de *software* unificam e possibilitam valorar o que está sendo analisado e ao final possibilitar afirmar em valores que tal índice é melhor ou pior que o outro avaliado, considerando os valores de todos os sub-aspectos.

A manufatura pelo processo de furação por escoamento apresenta índice de sustentabilidade de (0,58), enquanto que o processo de furação convencional apresenta índice de sustentabilidade

de (0,42). Conclui-se que o processo de furação por escoamento é mais sustentável considerando as três dimensões da sustentabilidade ambiental, social e econômico e esta iteração do método AHP através das planilhas Excel apresentam uma grande contribuição para os gestores das indústrias nas definições dos processos de manufatura a curto, médio e longo prazo de implementação.

Na pesquisa com os *stakeholders* a metodologia implementada da UNIFAL, já calcula a relação de consistência em cada questionamento com relação à análise par a par com relação ao peso dos *stakeholders*. Ao definir a planilha Excel para o cálculo da matriz normalizada e iteração, pode ocorrer erros, estimados pelo usuário, neste sentido torna-se necessário o cálculo da relação de consistência.

A relação de consistência deve ser calculada para todos os aspectos em análise com relação aos subcritérios definidos de forma par a par (SAATY, 1980). Esta metodologia é importante que seja aplicada, porque sumarizando os resultados tem-se informações confiáveis.

Para a pesquisa desenvolvida obteve-se os resultados de IC (*Consistency Index* ou índice de consistência) e IR (*Consistency Ratio* ou Relação de consistência), conforme Tabela 1:

Tabela 1 | Relação de Consistência

| | Ambiental | | Social | Econômico | |
|-----------|-------------------|-----------------|--------------------|-------------------|-----------------|
| | Fur. Convencional | Fur. Escoamento | Fur. Conv.e scoam. | Fur. Convencional | Fur..Escoamento |
| IC | 0.10 | 0.05 | 0.10 | 0.10 | 0.02 |
| IR | 0.10 | 0.04 | 0.08 | 0.09 | 0.02 |

Fonte: Próprio Autor, (2023).

Muñoz, (2016) afirma que a análise da sensibilidade aplicada em metodologias multicritério como no método AHP considerando a metodologia desenvolvida em modelos é muito utilizada para estabilizar a sistemática da decisão da aplicação do método multicritério e reduzir o mínimo de subjetividade associada com a decisão do processo multicritério.

A Tabela 3, mostra o resultado da análise de sensibilidade para os processos pesquisados, identificando que as análises realizadas ficaram dentro do especificado pela técnica 0,10 (10%) e o resultado desta análise auxilia o tomador de decisão a visualizar possíveis caminhos em eventuais situações não previstas e que podem ser adequadas novamente a partir destes resultados.

CONCLUSÕES

Determinar os índices de sustentabilidade nas dimensões ambiental, social e econômico dos processos de manufatura de furação convencional e por escoamento no setor de manufatura e teve a intenção aplicar técnicas de avaliação de sustentabilidade integradas ao processo de tomada de decisão e melhoria dos processos.

As intervenções tecnológicas podem ser avaliadas quanto ao seu potencial de melhoria, e a contribuição das planilhas Excel realizaram a iteração das dimensões da sustentabilidade trazendo uma grande melhoria e, em seguida uma aplicabilidade, possibilitando ao gestor industrial avaliar pontos críticos dos processos, mitigá-los e reduzir impactos.

A unificação do índice de sustentabilidade para verificar qual processo pode ser considerado mais sustentável foi realizado e a furação convencional apresenta como resultado índice de sustentabilidade de (42%) e a furação por escoamento apresenta índice de sustentabilidade de (58%). A unificação das três dimensões da sustentabilidade ambiental, social e econômica em um único índice de sustentabilidade valorado e apresentado representa a evolução ao estado da arte e um ganho científico, porque a maioria dos modelos apresentam informações ambientais, sociais e econômicas da manufatura de forma pontual e isolada. Mas a unificação destes índices em um único indicador valorado em percentual e informando qual processo é o mais sustentável caracteriza a inovação e uma grande ferramenta de apoio a tomada de decisões empresariais.

Uma aplicação mais ampla pode ser desenvolvida, incluindo outro aspecto importante, ou seja, as preferências do consumidor, pode ser combinada para obter uma imagem de alta resolução da situação, bem como critérios de resistência, fadiga, como processos subsequentes no processo produtivo. Proporcionando outras análises e reduções de impactos sociais, ambientais e econômicos mitigando na fonte estas deficiências e apresentando soluções tangíveis e de baixo investimento.

Neste sentido, tem-se a contribuição para uma análise mais adequada da sustentabilidade nos processos de manufatura, desenvolvendo um modelo que pode ser aplicado em outros processos, aprimorando etapas de mensuração e de ponderação de aspectos nas dimensões ambientais, sociais e econômicas da manufatura por meio de análise multicritério e apoio à tomada de decisão para os gestores e *stakeholders* das indústrias.

AGRADECIMENTOS, DECLARAÇÃO DE CONFLITO DE INTERESSES E CONSIDERAÇÕES ÉTICAS

Os autores agradecem aos colaboradores do Laboratório de Engenharia Mecânica da UPF (Universidade de Passo Fundo) pelo apoio nos testes para o desenvolvimento da pesquisa, declaram que não tem conflito de interesses e informam que a pesquisa está em acordo com a Resolução 196/96 do Conselho Nacional de Saúde, aprovada pela Comissão de Ética da Instituição de origem, conforme Figura 7:

Figura 7 | Parecer Comitê de Ética



Fonte: Próprio Autor (2023).

REFERÊNCIAS

- ALLESCH, A.; BRUNNER, P. H. **Assessment methods for solid waste management: A literature review.** Waste Management & Research, v. 32 (6), p. 461-473, <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X14535653>. 2014.
- ARAÚJO, J. B. DE. **Avaliação de Processos de Manufatura considerando parâmetros de sustentabilidade.** EESC/USP, p.6, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10151:** acústica – avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10152:** níveis de ruído para conforto acústico. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- AZAPAGIC, A. **Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry.** Journal of Cleaner Production, 12, 2004, p. 639-662.
- BLACK J. T. **Asm metals handbook. Volume 16 – Machinig Process.** Auburn University, 2007.
- CLÍMACO, J.; DIAS, L.; ALMEIDA, L. A. **Uma revisão de três pacotes de software dedicados a problemas Multiatributo.** ENGE-VISTA, [S. l.], v. 17, n. 3, p. 288-307. 2015.
- COSTA, THIAGO C.; BELDERRAIN, MISCHEL C. N. **Decisão em grupo em métodos multicritério de apoio à decisão.** In: Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA XV ENCITA, 5, 2009, Anais. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 19 a 22.
- DE MEDEIROS, J.F., RIBEIRO, J.L.D., CORTIMIGLIA, M.N. **Success factors for environmentally sustainable product innovation: a systematic literature review.** J. Clean. Prod. 65, 76-86. <https://doi:10.1016/j.jclepro.2013.08.035>. 2014.

- DIAS, L. C.; CLIMACO, J. N. **Additive Aggregation with variable interdependent parameters: The VIP analysis software.** Journal of the Operational Research Society, [S. l.], v. 51, n. 9, p. 1070-1082. 2000.
- DORAN, J., RYAN, G. **Regulation and firm perception, eco-innovation and firm performance.** Eur. J. Innov. Manag. 15 (4), 421e441. <https://doi.org/10.1108/14601061211272367>. 2012.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY US. Environmental Management System Implementation: **Guide for the Shipbuilding and Ship Repair Industry, 2003.** Disponível em: <http://www.epa.gov/sustainableindustry/shipbuilding/module_05.pdf>. Acesso em: 18 de setembro, 2007.
- ESCOBAR J. W. **Metodología para la toma de decisiones de inversión em portafolio de acciones utilizando la técnica multicriterio AHP.** Contaduría y Administración 60 346-366. [https://doi.org/10.1016/S0186-1042\(15\)30004-8](https://doi.org/10.1016/S0186-1042(15)30004-8). 2015.
- FINKBEINER, M.; SCHAU, E. M.; LEHMANN, A.; TRAVERSO, M. **Towards on Life Cycle Sustainability.** Assessment. Sustainability, 2, p. 3309-3322. 2010.
- FIKSEL, J.; MCDANIEL, J.; MENDENHALL, C. **Measuring Progress towards Sustainability Principles, Process and Best Practices.** Ohio: Battelle Memorial Institute. 1999.
- GLOBAL REPORTING INITIATIVE. **Sustainability Reporting Guidelines, (2006).** Disponível em: <www.aeca.es/comisiones/rsc/documentos_fundamentales_rsc/gri>. Acesso em: 29 de outubro, 2007.
- HAY, J.E., NOONAN, M. **Anticipating the Environmental Effects of Technology: A Manual for Decision-Makers, Planners and other Technology Stakeholders.** United Nations Environment Program, Division of Technology, Industry and Economics Google Scholar. 2005.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14031: Environmental Performance Evaluation.** Berlin. 1999
- HAY, JOHN E. **Anticipating the Environmental Effects of Technology: A Manual for Decision-Makers, Planners and Other Technology Stakeholders.** Disponível em <<https://library.sprep.org/content/anticipating-environmental-effects-technology-manual-decision-makers-planners-and-other>>. Accessed 3 June 2024.
- HERMANN B. G.; KROEZE C.; JAWJIT W. (). **Assessing environmental performance by combining life cycle assessment, multi-criteria analysis and environmental performance indicators.** Science Direct, Journal of Cleaner Production 15 1787-1796. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.04.004>. 2007.
- HERVA, M.; ROCA, E. **Review of combined approaches and multi-criteria analysis for corporate environmental evaluation.** Journal of Cleaner Production, v. 39, p. 355-371, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.058>. 2013.
- INSTITUTION OF CHEMICAL ENGINEERS. () **The sustainability metrics: sustainable development progress metrics recommended for use in the process industries.** 2002. Disponível em: <www.icheme.org>. Acesso em: 29 de outubro, 2007.
- JABBOUR, C.J.C., **In the eye of the storm: exploring the introduction of environmental issues in the production function in Brazilian companies.** Int. J. Prod. Res. 48 (1), 6315e6339. <https://doi.org/10.1080/00207540802425401>. 2008.
- JABBOUR, C.J.C., SANTOS, F.C.A., FONSECA, S.A., NAGANO, M.S., **Green teams: understanding their roles in the environmental management of companies located in Brazil.** J. Clean. Prod. 46, 58e66. Jamali, D., 2006. Insights int <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.018>. 2012.
- JANNUZZI, P. M. MIRANDA, W.L., SILVA, D. S. G. **Análise Multicritério e Tomada de Decisão em Políticas Públicas: Aspectos Metodológicos, Aplicativo Operacional e Aplicações.** Revista Informática Pública. v. 11, p. 69 – 87. 2009.
- KALPAKJIAN S., STEVEN S. SCHMID. **Manufacturing Engineering and Technology**, 4th edition, Pearson Education, India. 2002.
- KAPLUNOV, J., KHAJIYEVA, L. A., MARTYNIUK, M., & SERGALIYEV, A. S. **On the dynamics of drilling.** International Journal of Engineering Science, 146, 103184. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2019.103184>. 2020.

LABUSCHAGNE, C.; BRENT, A.C.; VAN ERCK, R.P.G. **Assessing the sustainability performances of industries.** Journal of Cleaner Production, 13, p. 373-385. 2005.

LI X.; LIU T.; LIN L.; SONG T.; DU X.; LIN X.; XIAO J.; HE J.; LIU L.; ZHU G.; ZENG W.; GUO L.; CAO Z.; MA W.; ZHANG Y. **Application of the analytic hierarchy approach to the risk assessment of Zika virus disease transmission in Guangdong Province, China.** BMC infectious Diseases. 17:65. <https://bmcinfectdis.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12879-016-2170-2>. 2017

LINKOV, I.; MOBERG, E. **Multi-criteria Decision Analysis: Environmental Applications and Case Studies.** CRC Press. 2012.

MARINS C.; SOUZA D.; BARROS M. **O uso do método de análise hierárquica (ahp) na tomada de decisões gerenciais – um estudo de caso.** Rio de Janeiro. 2009.

MARQUES C. T. **Sustentabilidade empresarial aplicada à construção civil: identificação de estratégias para implantação.** Dissertação de mestrado. 2018.

Matos, p. *et al.* **The use of multi-criteria analysis in the recovery of abandoned mines: a study of intervention in Portugal.** Rausp Management Journal, [S. l.], v. 53, p. 214-224. 2018.

MELARÉ, AG. V. DE S.; GONZÁLEZ, S. M.; FACELI, K.; CASADEI, V. **Tecnologias e sistemas de suporte a decisão como apoio na gestão de resíduos sólidos: uma revisão sistemática.** Sorocaba: UFSCAR. 2014. Disponível em: <http://dcomp.sor.ufscar.br/wp-content/uploads/2016/05/DComp-TR-001.pdf>. Acesso em: 7 maio 2017.

MUÑOZ, B.; ROMANA, M. G.; ORDÓNEZ, J. **Sensitivity analysis of multicriteria decision making methodology developed for selection of typologies of Earth-retaining walls in an urban highway.** Transportation Research Procedia, [S. l.], v. 18, p. 135-139. 2016.

NEMEROW, N.L. **Environmental Engineering: Environmental Health and Safety for Municipal Infrastructure, Land Use and Planning, and Industry.** 6 ed. Wiley, Hoboken, N.J. 2009.

OLSTHOORN, X.; TYTECA, D.; WEHRMEYER, W.; WAGNER, M. **Environmental indicators for business: a review of the literature and standardization methods.** Journal of Cleaner Production, 9, p. 453-463. 2001.

WANG, XIAOLU, *Et al.* **Evaluating Patent Portfolios by Means of Multicriteria Analysis.** Revista de Contabilidad, vol. 14, no. 1, Jan. 2011, pp. 9–27, [https://doi.org/10.1016/s1138-4891\(11\)70020-6](https://doi.org/10.1016/s1138-4891(11)70020-6).

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Eco-efficiency creating more value with less impact.** Geneva: WBCSD, 2001

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process.** McGraw-Hill International: New York, NY, USA. 1980.

SADA GKA, JAFFAL HM. **Utilization solar energy for steam production.** 2017.

SCHWARZ, J.; BELOFF, B.; BEAVER, E. **Use Sustainability Metrics to Guide Decision- Making.** Chemical Engineering Progress, July. 2002.

SILVA, L., SILVA J. E., OMETTO R. A. **Green Manufacturing: An analysis of scientific production and trends for the future.** Production, 26(3), 642-655. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.032513>.

THORESEN, J. **Environmental Performance Evaluation - a Tool for Industrial Improvement.** Journal of Cleaner Production, 7, p. 365-370. 1999.

VELEVA, V.; ELLENBECKER, M. **Indicators of sustainable production: framework and methodology.** Journal of Cleaner Production, 9, p. 519-549. 2001.

UNIFAL. **Decisions + Simple.** Disponível em: <https://www2.bcc.unifal-mg.edu.br/ahp/registrar.php?link=0ddaab40fbd-9d55444de82b295b5c222>. Accessed 06 december 2019.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. VDI 407: **Nachhaltiges Wirtschaften in kleinen und mittelständischen Unternehmen: Anleitung zum Nachhaltigen Wirtschaften**. Berlin: Beuth Verlag. 2006.

VIEIRA, G. H. **Análise e comparação dos métodos de decisão multicritério AHP Clássico e Multiplicativo**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil. 2006.

WANG, X., CHAN, H.K., LI, D. **A case study of an integrated fuzzy methodology for green product development**. Eur. J. Oper. Res. v.241, p.212-223. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.08.007>. 2015.

WANG, X.; GARCIA F.; GUIJARRO F.; MOYA I. **Evaluating patente portfolios by means of multicriteria analysis**. Revista de Contabilidad Spanish Accounting, 2010.



UNITAU
Universidade de Taubaté