

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

STEPHAN SILVA SEIFERT

**FLUIDOS DE CORTE A BASE VEGETAL PARA USINAGEM:
TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA RANQUEAMENTO
COM BASE NAS PROPRIEDADES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2021

STEPHAN SILVA SEIFERT

**FLUIDOS DE CORTE A BASE VEGETAL PARA USINAGEM:
TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA RANQUEAMENTO
COM BASE NAS PROPRIEDADES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Profa. Dra. Janaina Fracaro de Souza Gonçalves

Co-orientador: Profa. Dra. Milena Chanes de Souza

LONDRINA

2021



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus de Londrina
Departamento de Mecânica
Coordenação do curso de Engenharia Mecânica
Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

**FLUIDOS DE CORTE A BASE VEGETAL PARA USINAGEM: TOMADA DE
DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA RANQUEAMENTO COM BASE NAS
PROPRIEDADES**

por

STEPHAN SILVA SEIFERT

Este(a) Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado(a) em 12 de agosto de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O(a) candidato(a) foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Janaina Fracaro de Souza Gonçalves
Prof.(a) Orientador(a)

Elizabeth Mie Hashimoto
Membro titular

Roger Nabeyama Michels
Membro titular

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais, Maria e Günther, por me apoiarem em todos os momentos bons e ruins da minha vida e por nunca me deixarem desistir de um sonho.

Agradeço a minha namorada, Mariana, pelo apoio, estímulo e compreensão pela minha ausência no tempo em que me dediquei aos estudos.

À minha orientadora, Janaina, pela dedicação, amizade e por sempre ter conduzido o ensino de forma tão leve.

Aos professores que de certa forma marcaram minha trajetória e foram importantes para a minha formação como engenheiro.

Agradeço também aos amigos e pessoas que de forma direta e indireta contribuíram para que esse desafio fosse vencido.

À Deus por ter me dado serenidade e sabedoria para enfrentar as adversidades e por não me deixar desviar de teu caminho. Agradeço também ao senhor por ter dado saúde aos meus familiares e por ter tranquilizado meu espírito, me mantendo focado nos objetivos.

RESUMO

SEIFERT, Stephan Silva. **Fluidos de corte a base vegetal para usinagem: Tomada de decisão multicritério para ranqueamento com base nas propriedades.** 2021. 60 p. Trabalho de Conclusão do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2021.

Uma grande preocupação da indústria de manufatura é com relação ao meio ambiente e a sustentabilidade dos fluidos de corte utilizados na usinagem. A dependência de óleo mineral no uso de lubrificantes em atividades industriais e seus efeitos danosos a saúde humana deram origem a discussões sobre os lubrificantes tradicionais, resultando em um aumento significativo nas pesquisas e estudos com lubrificantes a base vegetal. No sentido de classificar e criar um *ranking* dos fluidos testados, no presente trabalho utilizou-se a análise de decisão multicritério AHP para escolher o método de decisão mais apropriado de acordo com os critérios utilizados. O método TOPSIS foi classificado como a melhor opção por apresentar menor complexidade computacional e maior facilidade de aplicação dos pesos, se comparado com os demais métodos. Por fim, verificou-se com o método TOPSIS que o Fluido de corte U é o mais apropriado para usinagem em alta velocidade (HSM) por apresentar melhores resultados e por ser um fluido sustentável.

Palavras-chave: TOPSIS. AHP. Usinagem. Multicritérios. Fluidos ecológicos. Sustentável.

ABSTRACT

SEIFERT, Stephan Silva. **Bio-lubricants machining working fluids**: Multicriteria decision making for ranking based on properties. 2021. 60 p. Final Term Paper of Bachelor in Mechanical Engineering - Federal Technology University - Parana. Londrina, 2021.

Nowadays there is a big concern with the environment and with the sustainability of the machining working fluids. The dependence of mineral oil on lubricants industrial activities and its harmful effects on human health increased the discussion about the traditional lubricants, causing a significant increase in research and studies with bio-lubricant oils. In order to classify and create a ranking of the tested fluids, the present work uses the AHP multicriteria decision analysis method to choose the most appropriate decision method according to the selected criteria. The TOPSIS method was classified as the best option for presenting a less computational and simplified way to apply weights, when compared to other methods. Finally, it was verified with the TOPSIS method that the U cutting fluid is the most suitable for high-speed machining (HSM) applications because it presents better results and because it is a sustainable fluid.

Keywords: TOPSIS. AHP. Machinability. Multicriteria. Eco-Friendly Fluids. Sustainability.

LISTA DE SÍMBOLOS

F_c	Componente normal da força aplicada [N]
Q	Quantidade de calor gerada [W]
r_{ij}	Atributo normalizado
v_c	Velocidade de corte [m/min]
x_{ij}	Atributo a ser normalizado
x_j^{min}	Valor mínimo do atributo a ser normalizado no espaço amostral
x_j^{max}	Valor máximo do atributo a ser normalizado no espaço amostral

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Demanda global por lubrificantes em milhões de toneladas (Mt).....	13
Figura 2 - Classificação convencional dos fluidos	19
Figura 3 - Oito etapas do processo de tomada de decisão	21
Figura 4 - Classificação dos métodos MCDM	23
Figura 5 - Procedimentos para obtenção dos resultados	30
Figura 6 - Número de artigos publicados de assuntos gerais com MADM	34
Figura 7 - Quantidade de artigos MADM na seleção de propriedades de materiais .	34
Figura 8 - Gráfico condição 1, peso 60-40%, avanço de 0,05 mm/dente	46
Figura 9 - Gráfico condição 2, peso 60-40% e avanço de 0,15 mm/dente	47
Figura 10 - Gráfico condição 3, peso 60-40% e avanço de 0,30 mm/dente	48
Figura 11 - Gráfico condição 1, peso método entropia, avanço de 0,05 mm/dente ..	50
Figura 12 - Gráfico condição 2, peso método entropia, avanço de 0,15 mm/dente ..	51
Figura 13 - Gráfico condição 3, peso método entropia, avanço de 0,30 mm/dente ..	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre as propriedades dos fluidos	18
Tabela 2 - Escala fundamental de números absolutos.....	28
Tabela 3 - Índice de consistência aleatória	29
Tabela 4 - Matriz de comparação dos critérios.....	36
Tabela 5 - Análise do critério complexidade computacional.....	36
Tabela 6 - Análise do critério versatilidade.....	37
Tabela 7 - Análise do critério agilidade	37
Tabela 8 - Matriz de decisão	38
Tabela 9 - Fluidos testados no laboratório	38
Tabela 10 - Critérios classificados por grupo e subgrupo	40
Tabela 11 - Desempenho ideal, importância e peso do critério.....	45
Tabela 12 - Condição 1, peso 60-40% e avanço de 0,05 mm/dente.....	46
Tabela 13 - Condição 2, peso 60-40% e avanço de 0,15 mm/dente.....	47
Tabela 14 - Condição 3, peso 60-40% e avanço de 0,30 mm/dente.....	48
Tabela 15 - Pesos dos critérios segundo método da entropia	49
Tabela 16 - Condição 1, peso método entropia, avanço de 0,05 mm/dente	50
Tabela 17 - Condição 2, peso método entropia, avanço de 0,15 mm/dente	51
Tabela 18 - Condição 3, peso método entropia, avanço de 0,30 mm/dente	52

LISTA DE ABREVIATURAS

APC	Aresta postiça de corte
MQL	Mínima quantidade de lubrificante
MWF	<i>Metalworking Fluids</i>
N	<i>Newton</i>
ppm	Partes por milhão
TCC	Trabalho de conclusão de curso
W	<i>Watt</i>

LISTA DE SIGLAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANP	<i>Analytic Network Process</i>
BWM	<i>Best Worst Method</i>
COPRAS	<i>Complex Proportional Assessment</i>
DEMATEL	<i>Decision Making Trial and Evaluation Laboratory</i>
ELECTRE	<i>Elimination et Choice Translating Reality</i>
ISI	<i>The Institute for Scientific Information</i>
ISM	<i>Interpretive Structural Modelling</i>
MADM	<i>Multiple Attributes Decision Making</i>
MCDM	<i>Multiple Criteria Decision Making</i>
MODM	<i>Multiple Objectives Decision Making</i>
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations</i>
ROV	<i>Range of Value</i>
SAW	<i>Simple Additive Weighting</i>
SEM	<i>Structural Equation Modeling</i>
TOPSIS	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to ideal Solution</i>
VIKOR	<i>VlseKriterijumska Optimizacija I KOmpromisno Resenje</i>
WASPAS	<i>Weighted Aggregated Sum – Product Assessment</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.1.1 Gerais	14
1.1.2 Específicos.....	14
1.2 JUSTIFICATIVAS	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 MÉTODOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO	20
2.2 MÉTODOS DE DECISÃO DE MÚLTIPLOS ATRIBUTOS	23
2.2.1 Técnicas de Normalização e Sistemas de Pesos nos MADM	26
3 METODOLOGIA.....	30
4 DESENVOLVIMENTO.....	33
4.1 SELEÇÃO DO MÉTODO DE DECISÃO MADM	33
4.1.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP	35
4.2 FLUIDOS ANALISADOS.....	38
4.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO TOPSIS	40
4.3.1 Ponderação de acordo com os critérios mais importantes no fluido de corte .	45
4.3.2 Ponderação de acordo com o método da entropia	48
5 CONCLUSÃO.....	54
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1 INTRODUÇÃO

O processo de usinagem consiste na retirada de material sobre a forma de cavaco pela ferramenta com o objetivo de conferir acabamento e formato ao material. Como consequência do atrito entre a ferramenta e o cavaco, cerca de 98% da energia é convertida em calor contribuindo para adesão do cavaco à ferramenta, aumentando a potência requerida e prejudicando o acabamento superficial (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013). O efeito negativo das altas temperaturas vai além de alterar as propriedades mecânicas do material, contribui também para a inclusão de cavaco na ferramenta de corte, exigindo constante reafiação para manter-se a tolerância dentro dos padrões de qualidade exigidos (DE LISBOA, 2013).

Com o intuito de diminuir a quantidade de calor que vai para a ferramenta e peça, fluidos de corte são utilizados como lubrificante e refrigerante. A ideia de refrigerar o processo de usinagem surgiu de F. Taylor em 1890, quando percebeu que ao utilizar água para resfriar a ferramenta de corte o efeito da temperatura era reduzido, causando um aumento de 33% na velocidade de corte. Além de refrigerar, o fluido de corte também atua contra a oxidação e limpa a região usinada. Dessa forma a vida útil da ferramenta é prolongada consideravelmente.

No processo de manufatura os custos com fluidos de corte representam uma grande parcela do valor final. Se considerado os custos de manuseio e destinação correta dos resíduos afim de atender às exigências ambientais legais, esse valor pode chegar a até 20% dos custos totais de usinagem (ZEILMANN, 2010). Tendo em vista o alto custo com os fluidos, técnicas que visam a diminuição de quantidade de fluido têm sido amplamente utilizadas, como a de micro lubrificação chamada também de mínimas quantidades de lubrificante (MQL).

Por outro lado, estima-se que em 2019 foram consumidos em torno de 36,8 milhões de toneladas de óleo como lubrificante no mundo, sendo que desde os anos 2000, onde esse número era 36,4 milhões de toneladas, o único momento onde o consumo teve uma queda considerável foi de 2008/2009, conforme Figura 1. Além disso, o setor automobilístico é o maior consumidor de lubrificantes na atualidade, correspondendo ao consumo de mais da metade de todo óleo consumido no mundo (GARSIDE, 2020).

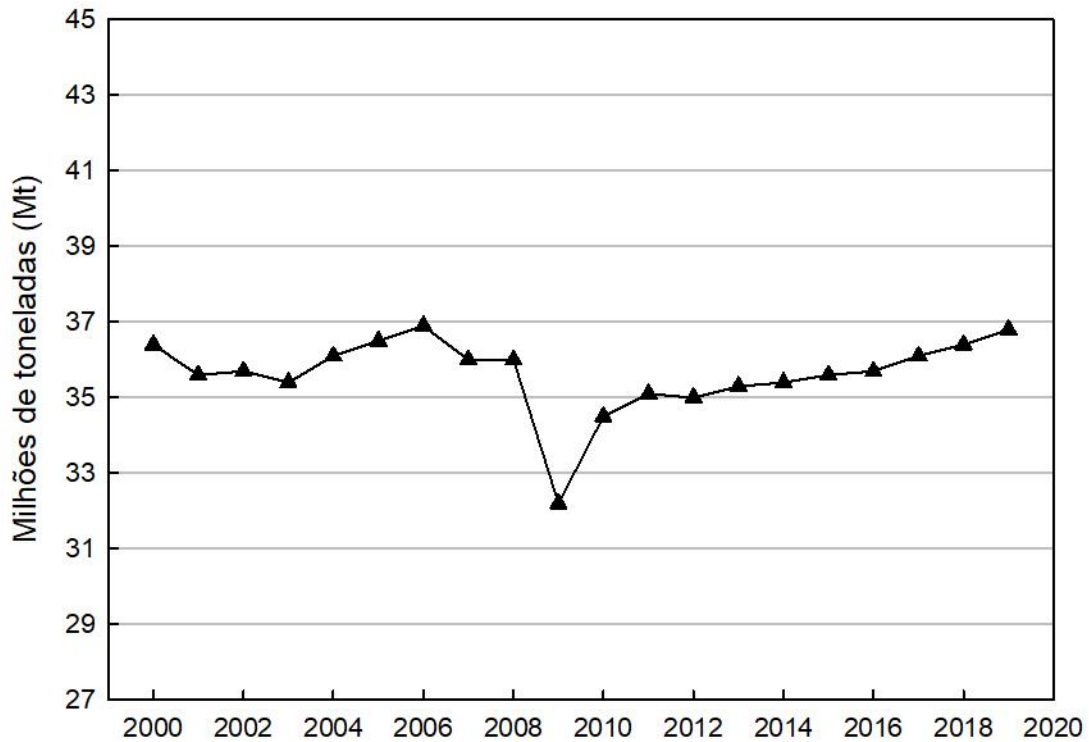


Figura 1 - Demanda global por lubrificantes em milhões de toneladas (Mt)
Fonte: Adaptado de Garside (2020)

Logo, a atual dependência de óleo mineral no uso de lubrificantes em atividades industriais e o reconhecimento dos efeitos danosos a saúde humana levaram a uma reconstrução dos lubrificantes tradicionais dando espaço aos lubrificantes a base vegetal, biodegradáveis e ecológicos, não tóxicos e em muitos casos apresentam ação superior aos óleos minerais. Pesquisas recentes indicam que óleos a base vegetal tem um alto potencial de substituição de óleos minerais (SOUZA, 2019).

A classificação dos fluidos de diferentes tipos é possível por meio de técnicas como a *MCDM* (sigla em inglês para Métodos de decisão Multicritério), no qual é possível fazer uma tomada de decisão levando em conta critérios de natureza técnica. Esse método é amplamente utilizada em situações onde múltiplas variáveis de diferentes produtos precisam ser classificadas para concluir se um produto é melhor ou pior que os demais em análise (SAARIKOSKI, 2016). Nesse âmbito, o presente trabalho propõe a utilização de um método de decisão multicritério para classificar quali-quantitativamente os fluidos dentre um universo de 31 fluidos analisados, com vista nas propriedades que impactam tanto em termos comerciais quanto em sustentabilidade.

Desta forma, o trabalho está organizado da seguinte forma: No próximo capítulo o principal objetivo desse estudo é apresentado seguido de sua justificativa. No segundo capítulo é apresentada a revisão da bibliografia utilizada disponível sobre o assunto na literatura. O capítulo três apresenta e descreve a metodologia utilizada. No capítulo quatro são apresentados os dados dos fluidos utilizados, aplicação do método AHP sobre os métodos mais utilizados para seleção do método a ser utilizado. Em seguida, o método selecionado, TOPSIS, é aplicado sobre os fluidos e o melhor fluido para usinagem em alta velocidade. Por fim, é apresentada a conclusão do trabalho.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Gerais

O objetivo principal deste trabalho é eleger o melhor fluido de corte a ser utilizado na usinagem de alumínio da série 7XXX, classe AA7050, quando avaliados os fatores químicos, microbiológicos e mecânicos.

1.1.2 Específicos

- Determinar os métodos de decisão de análise multicritério (MCDM) mais assertivos e adequados na análise dos dados obtidos nos experimentos com fluidos de corte;
- Determinar as propriedades físico-químicas e metrologicas testadas que garantem melhor usinabilidade de ligas de alumínio da série 7XXX, classe AA 7050;
- Possibilitar uma melhor compreensão das vantagens e desvantagens de cada fluido.

1.2 JUSTIFICATIVAS

Os primeiros estudos acerca dos fluidos de corte ocorreram em meados dos anos 1890, quando Frederick Taylor usou água como fluido refrigerante em um processo de furação. Seus estudos avançaram no sentido de obter soluções que não causassem excessiva oxidação e apresentassem uma melhor lubrificação para facilitar o corte. Com base nisso, soluções de água e sabão foram utilizadas e apresentaram desempenho superiores comparados aos da água. Desde então, muitas pesquisas no desenvolvimento de novos fluidos que apresentem ótimo desempenho, atendam às exigências legais tanto para a preservação da saúde humana quanto do meio ambiente e apresentem custos operacionais competitivos tem surgido (ALMEIDA, 2017). Diante de uma grande variedade de opções de produtos no mercado, é comum a dúvida das empresas sobre qual o melhor fluido para cada utilização e que atendam suas necessidades. A escolha do fluido deve levar em conta o tipo de material a ser usinado, velocidade e material da ferramenta de corte e tipo de máquina utilizada no processo para garantir a usinabilidade correta e resultar numa maior vida útil da ferramenta e do maquinário. Além disso, garantir maior eficiência do processo está relacionada diretamente com redução de custos.

Plewa, Rajagopalan e Wagner (2015) utilizaram MCDM para seleção de MWF (*Metalworking Fluids*, termo em inglês para fluidos de corte) que apresentassem menos riscos à saúde e fossem sustentáveis. Jee e Kang (2000) desenvolveram fatores de peso para diferentes materiais utilizando o método de MCDM TOPSIS (sigla em inglês de Técnica para Avaliar o Desempenho de Alternativas Através de Similaridade com a Solução Ideal). Apesar de já existirem estudos utilizando métodos de análise de decisão de multicritérios nas mais variadas áreas, o campo de estudo utilizando a técnica de análise de decisão para escolha de fluidos na usinagem de ligas de alumínio aeroespaciais ainda é pouco explorada. Devido aos elevados custos no processo de usinagem com fluidos de corte, ferramentas e manutenção do equipamento, estudos que classifiquem os fluidos de acordo com suas propriedades e aplicações envolvendo fluidos a base vegetal podem ser de grande utilidade para economia e utilização consumidor final.

A escolha do fluido de corte na usinagem de peças de alumínio aeronáutico deve considerar fatores que garantam uma boa refrigeração do processo, que não

apresentem em sua composição elementos donosos a saúde e meio ambiente ou agrida a estrutura da máquina. Além disso, é importante que o fluido não tenha em sua composição elementos que gerem corrosão e manchamento do revestimento metálico do maquinário.

O presente trabalho é uma continuidade dos trabalhos experimentais realizados por Souza (2019) acerca da usinabilidade da liga do alumínio da série 7XXX e classe AA7050, com 6,2% de Zn, 2,3% de Cu, 2,2% de Mg e 0,12% de Zr em sua composição química, utilizando variados parâmetros e também da continuidade a estudos de experimentos no desenvolvimento de lubrificantes a base de sementes de *Jatropha* (*Jatropha curcas L.*) e *Moringa* (*Moringa oleifera*), desenvolvidos por Chanes de Souza (2019). A necessidade de se classificar e ranquear os fluidos de acordo com os resultados experimentais obtidos nos experimentos citados deu origem ao objetivo central deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo uma breve revisão bibliográfica sobre o tema é apresentada abordando inicialmente a operação de usinagem, a importância dos fluidos de corte assim como sua influência na temperatura, potência, desgaste, acabamento superficial e outras propriedades são apresentadas. Por fim, métodos de decisão de análise multicritério são apresentados.

Segundo Almeida (2015), usinagem é um processo de fabricação mecânica que consiste na remoção do sobremetal da peça por meio de corte, seja por meio de máquinas ou ferramentas manuais. As máquinas possuem ferramentas de corte que são afiadas respeitando ângulos específicos. Sua penetração é controlada e resulta na remoção de resíduos de geometria irregular chamado de cavaco. O processo de retirada de material gera excessivo calor devido ao atrito entre a ferramenta e a peça usinada, dependendo do material e das condições de trabalho a temperatura pode ser superior à 900 °C. Experimentalmente é possível constatar que mais de 90% de todo trabalho mecânico realizado na usinagem é convertido em calor (FERRARESI, 1977). A quantidade de calor gerada (Q), medida em Watts, é proporcional com a velocidade de corte, ou seja,

$$Q = \frac{F_c \cdot v_c}{60} \quad [\text{W}],$$

em que F_c é a componente normal da força aplicada em newtons [N] e v_c é a velocidade de corte, medida em metros por minuto (m/min).

Assim, a medida que a temperatura aumenta, o desgaste na aresta de corte é maior, a pastilha de usinagem pode sofrer deformação plástica, diminuindo assim drasticamente sua vida útil, bem como a qualidade do acabamento da peça usinada. Nesse sentido a refrigeração é utilizada para reduzir a temperatura entre a peça e o inserto e, quando aplicada com alta pressão (a partir de 70 bar), atua na quebra de cavacos longos e enrolados (SANDVIK, 2020). Além disso, impede a adesão (fenômeno chamado de *Atrition*) do material na ferramenta de corte, prolongando a vida útil. O fenômeno de aderência na ferramenta contribui para a formação de aresta postiça de corte (APC), diminuindo a área de contato com o material. Dessa forma, a utilização de fluido de corte como lubrificante em processos de usinagem com

materiais de baixo coeficiente de atrito, como o nitreto de titânio, tem grande impacto no prolongamento da vida útil da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014)

Segundo Machado (2011) as principais funções dos fluidos de corte são:

- Lubrificação a baixas velocidades de corte;
- Refrigeração a altas velocidades de corte;
- Remoção dos cavacos da zona de corte;
- Proteção da máquina-ferramenta e da peça contra oxidação.

Apesar de as duas primeiras funções serem consideradas prioritárias, existem situações, como na furação profunda e no serramento, onde remoção do cavaco na zona de corte é fundamental para evitar o engripamento, e, conseqüentemente a falha prematura da ferramenta. Nesse caso, o fluido de corte precisa apresentar viscosidade e vazão mínima requerida para agir como quebra cavaco, já a capacidade de refrigerar ou lubrificar mais é inerente a cada tipo de fluido, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Comparação entre as propriedades dos fluidos

Propriedade do fluido de corte	Solução	Emulsões	Óleos
Poder Lubrificante	baixo	intermediário	alto
Poder Refrigerante	alto	intermediário	baixo
Velocidade de corte (Vc)	alta	alta	baixa
Admite aditivo EP	sim	sim	sim
Propriedades anticorrosivas	fracas	fracas	boas

Fonte: CIMM (2020)

Nos casos onde a velocidade de rotação é baixa, o fluido de corte desempenha função de lubrificante para evitar APC, uma vez que a temperatura é mais baixa. Como lubrificante, o fluido atua na redução do atrito entre ferramenta e cavaco e sua eficiência depende da capacidade de penetração na região de contato entre ferramenta e cavaco num curto período de tempo. Sob altas rotações, a situação se inverte e a temperatura desenvolvida é maior, fazendo-se necessário o fluido atuar na função de refrigerante para retirar calor da interface (MACHADO, 2011). A capacidade do fluido em ser mais eficiente na lubrificação, refrigeração e anticorrosão se deve a sua composição e a seu tipo. São classificados principalmente em três grupos: fluidos a base de óleo (óleos minerais, óleos animais e óleos vegetais), a

base de água e a base de gás (DESHPANDE; DESHPANDE, 2019), conforme Figura 2.

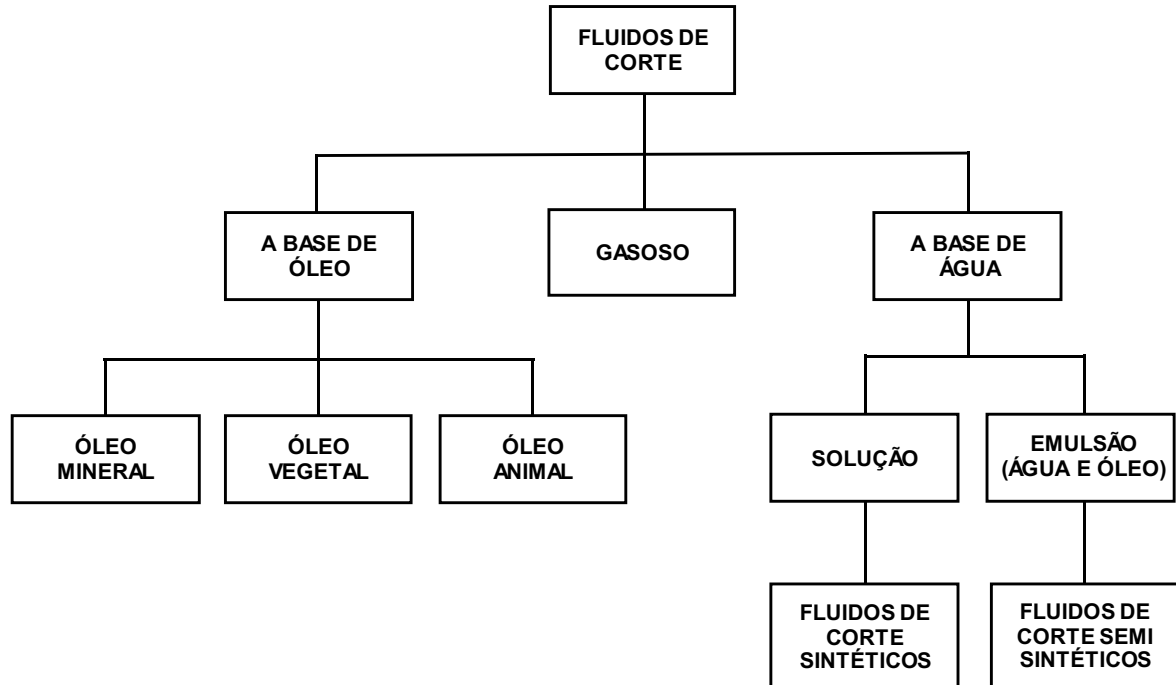


Figura 2 - Classificação convencional dos fluidos
Fonte: Adaptado de Deshpande, Deshpande (2019)

Dentre os tipos de fluidos de corte, os óleos minerais e os solúveis são os mais utilizados nos processos de usinagem na indústria atualmente. Os óleos solúveis tem uma limitação em relação aos óleos minerais, são corrosivos por apresentarem água em sua composição. Enquanto que os óleos minerais apresentam alta proteção contra corrosão, no entanto possuem uma capacidade reduzida de retirar calor (NASUTION, 2020). Devido ao grande impacto ambiental que os óleos a base mineral e os solúveis causam, os óleos a base vegetal são uma boa alternativa a serem utilizados na indústria. Óleos a base vegetal apresentam elevada viscosidade, ponto de fulgor e lubrificação superiores comparado aos demais, além de serem biodegradáveis. Por esse motivo, avaliações tribológicas de fluidos a base de óleos de sementes tem se tornado importante objeto de estudos como, por exemplo, o uso de semente de *Jatropha* e *Moringa* (CHANES DE SOUZA, 2019). Nesse estudo foram testados fluidos de corte de vários tipos, sintéticos minerais e vegetais sobre diversos parâmetros como por exemplo área de desbaste e potência requerida.

Diante de uma grande variabilidade da composição, os fluidos de corte no mercado competem principalmente em performance, aparência, preço e confiabilidade, variando essencialmente o tipo de material utilizado. Nesse contexto, a quantidade de estudos para desenvolvimento de fluidos e materiais na usinagem aumentou muito nos últimos anos. Entretanto, o processo de desenvolvimento deve envolver análises cautelosas para garantir a viabilidade da pesquisa e aumentar a probabilidade de sucesso (JAHAN; EDWARDS, 2013). Nessa análise é importante a utilização de análise de decisão multicritério na seleção dos materiais e processos utilizados para alcançar uma melhor qualidade com menor custo global. Segundo Vincke (1992), a vantagem em utilizar métodos multicritério consiste no fato de que não há decisões que sejam simultaneamente ótimas em diferentes pontos de análise, sendo impossível garantir que a escolha contemplou as melhores características em todos os pontos de análise, logo o auxílio de método para a melhor decisão baseada no objetivo final. Os métodos de análise de decisão multicritério levam em conta diferentes abordagens matemáticas onde cada método possui suas particularidades, seus pros e contras e assim, muitos resultados podem ser obtidos variando os métodos (BRIOZO; MUNETTI, 2015).

2.1 MÉTODOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

Métodos de decisão multicritério é uma classe de modelos de pesquisa operacional que lidam com problemas sobre a decisão envolvendo múltiplos critérios de análise. MCDM possibilita aos tomadores de decisão classificar, ranquear e escolher, considerando vários critérios para a tomada de decisão (MARDANI, 2015). As decisões são feitas levando em conta critérios que elencam as características mais importantes para o objetivo final, onde há conflito de escolha (MIRJAT, 2018). Em termos gerais, os métodos visam a resolução de problemas que obrigam uma escolha, onde o ganho em uma propriedade pode resultar na perda de outra, chamado de *tradeoff* (COLSON; DE BRUYN, 1989). Nos últimos anos, muitos estudos utilizaram-se de ferramentas de tomada de decisão para solucionar problemas nas mais variadas áreas, desde energia e desenvolvimento a sustentabilidade (MARDANI, 2015).

De forma geral, o processo de tomada de decisão pode ser dividido em oito etapas (SUN, 2014), conforme ilustrado na Figura 3. A obtenção de êxito nos resultados depende primeiramente de uma correta definição do problema, levando em conta os prós e contras de cada opção analisada.

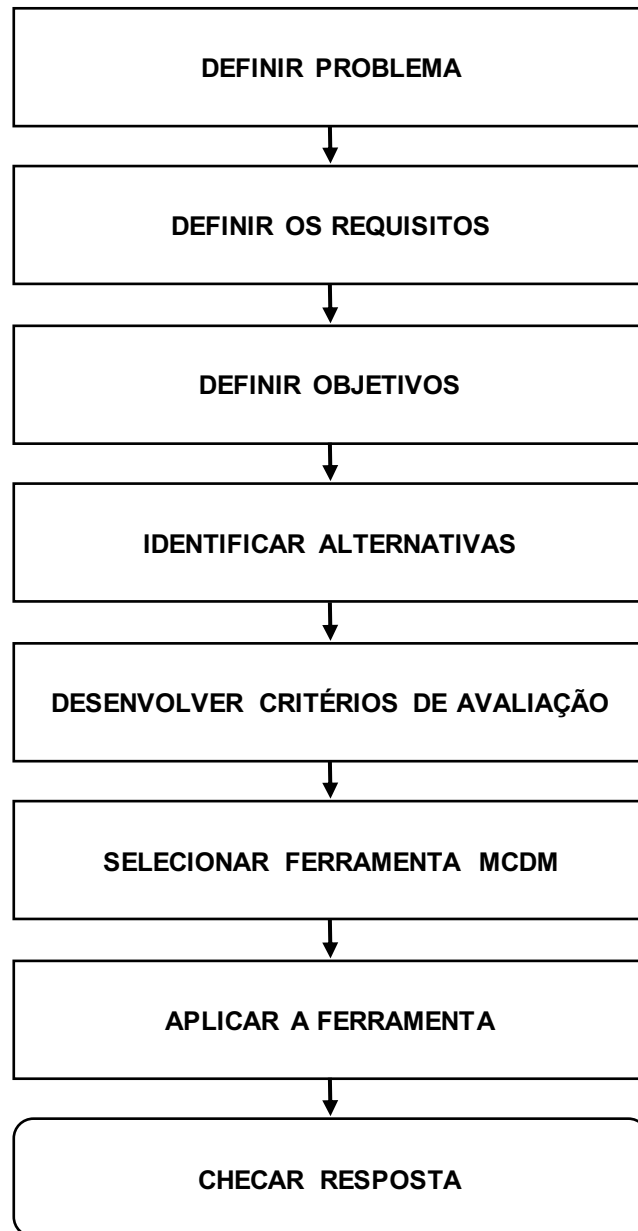


Figura 3 - Oito etapas do processo de tomada de decisão

Fonte: Adaptado de Singh (2014)

O segundo e o terceiro passo incluem listar os requisitos assim como as restrições, seguido da listagem dos objetivos de forma clara. A quarta etapa é sobre a definição das preferências nos critérios de avaliação, as alternativas, onde as

condições preliminares podem ser alteradas para chegar nos objetivos desejados. No processo de escolha, é comum que as alternativas não se encaixem perfeitamente aos objetivos traçados e uma seleção de MCDM deve ser escolhida, fazendo-se necessário adaptações nos conjuntos de critérios. Essa etapa permite identificar quais critérios tem mais prioridades sobre os demais e, portanto, maior impacto na escolha final. Os passos restantes incluem a seleção de um MCDM dentre os demais que passaram pelo processo de triagem por meio de formulação matemática seguido da aplicação do método e validação dos resultados. Caso o resultado não seja satisfatório, o processo deve ser refeito alterando alternativas e selecionando outros métodos (SINGH, 2014).

A maioria dos MCDM lidam com alternativas discretas, descritas por conjunto de critérios. Os critérios podem ser determinados por informações exatas ou seguir a lógica *fuzzy*, determinados em intervalos (MARDANI, 2015). Os MCDM podem ser divididos em dois grupos, Método de Decisão de Múltiplos Atributos (do inglês *Multiple Attributes Decision Making - MADM*) e Método de Decisão de Múltiplos Objetivos (do inglês *Multiple Objectives Decision Making - MODM*), onde MADM é um método discreto e MODM um método contínuo (FARAHANI; STEADIESEIFI; ASGARI, 2010). Nos problemas de MADM, o objetivo é projetar a melhor alternativa considerando número de alternativas explícitas fornecidas e finitas e a avaliação de todos atributos, que podem ser difíceis de quantificar, mensurar ou até mesmo de comparar (VINOGRADOVA, 2019). Já nos problemas de MODM, os atributos não são predeterminados, o objetivo é traçar a solução mais satisfatória e eficiente para um conjunto de funções objetivo sujeitas a um conjunto de restrições onde as series de alternativas efetivas são infinitas (LIOU, 2012). Nesse tipo de critério não é possível melhorar o desempenho de um objetivo sem degradar os demais (CASTRO; SILVA PARREIRAS, 2018).

Segundo estudo realizado por Castro (2018), dentre os dois principais grupos de MCDM, MADM aparece com mais frequência na literatura, em um total 91% dos artigos pesquisados contra 9% de MODM, onde foram analisados 186 artigos. O número de aparições de Métodos de Decisão de Múltiplos Atributos foi muito superior aos Métodos de Decisão de Múltiplos Objetivos pelo fato de MADM ser um método contínuo, de maior aplicação para os problemas cotidianos, nos quais é utilizado como uma ferramenta para tratar os dados obtidos nos experimentos.

2.2 MÉTODOS DE DECISÃO DE MÚLTIPLOS ATRIBUTOS

Liou (2012) classificou MADM em três grupos: avaliação ou escolha de modelos, modelos de ponderação e modelos de normalização. A Figura 4 ilustra os grupos MADM segundo os autores. Métodos MADM dependem da combinação pelo menos dois métodos de decisão, onde um método é responsável pela normalização e outro pela aplicação do sistema de pesos. O sistema de pesos é responsável por qualificar os vários atributos enquanto o sistema de normalização é responsável pela eliminação das unidades dos atributos (BAGHLA; BANSAL, 2015). A utilização de sistemas de pesos para análises quantitativas apresenta resultados confiáveis e distorcidas para análises qualitativas. Além de afetar consideravelmente o resultado de acordo com o peso utilizado, resulta numa grande variação entre os métodos (SABAEI; ERKOYUNCU; ROY, 2015).

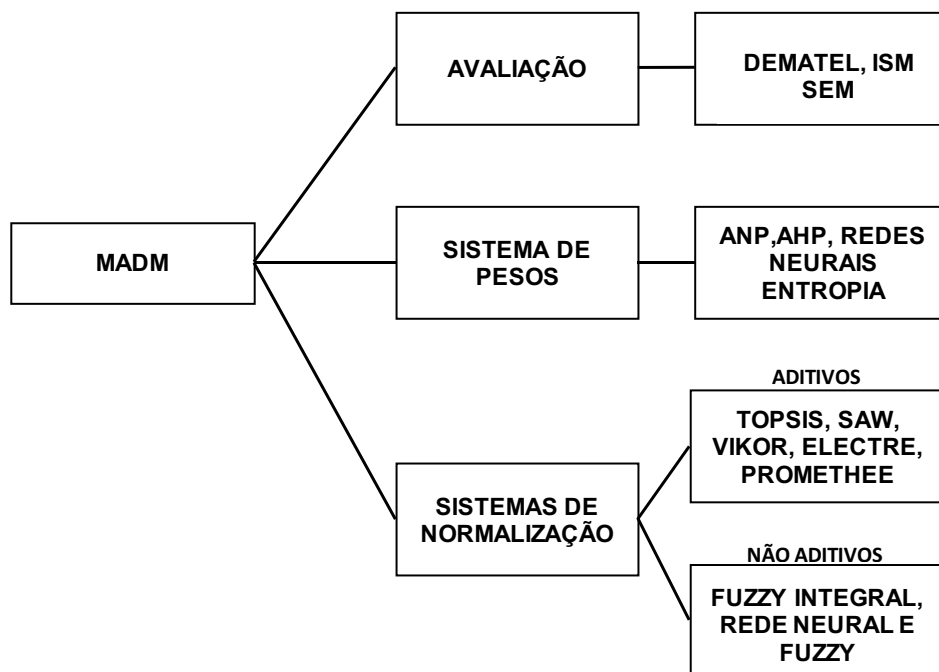


Figura 4 - Classificação dos métodos MADM

Fonte: Adaptado de Castro; Silva Parreiras (2018)

A grande maioria dos métodos apresentados tem sido muito utilizados em problemas de seleção de materiais (MOUSAVI-NASAB; SOTOUDEH-ANVARI, 2017) e não se tem clareza com relação a qual o melhor método para os problemas desse

tipo. Extrapolando para o campo dos fluidos de corte, poucos estudos utilizando métodos de decisão são encontrados na literatura. Madic, Radanovic e Manic (2016) utilizaram o método ROV (sigla em inglês para Faixa de valor) no problema de seleção de materiais por ser um método com código computacional mais simples que os demais justamente por não se ter clareza sobre o melhor método. Segundo estudos desenvolvidos por Loken (2007) e Wang (2016), a combinação de vários critérios de análise multicritério geram resultados mais confiáveis. Dentre esses tipos de análises combinadas, Mousavi-Nasab (2017) e Sotoudeh-Anvari (2017) sugerem uma associação dos métodos TOPSIS e COPRAS (sigla em inglês para Avaliação Proporcional Complexa) com a ferramenta DEA (sigla em inglês para Análise de Envoltório de Dados) como os melhores métodos para seleção de propriedades de materiais.

Dentre os principais métodos para decisões MADM, pode-se citar o método TOPSIS. Desenvolvido por Hwang e Yonn (1981), tem o objetivo de avaliar o desempenho de um conjunto de alternativas por meio de uma comparação com a solução tida como ideal, onde esse valor ideal é escolhido com base na menor distância euclidiana para a distância ideal (A+) ou mais distante da alternativa ideal (A-). O objetivo do método é possibilitar a classificação de similaridade por meio de um ranking, onde o maior índice possui maior similaridade e o menor apresenta mais disparidade com o ideal (PACHECO, 2016). A avaliação é feita a partir de uma matriz de decisão, no qual contém as alternativas ou propriedades, o atributo (se deseja o valor máximo ou mínimo) e o peso de cada alternativa. A aplicação do método prevê sete passos (MARANHÃO, 2016), são elas:

Passo 1: Preenchimento da matriz e normalização $P = [x_{ij}]m \times n$, onde m são as linhas e n as colunas. A normalização tem a finalidade de padronizar o desempenho de cada critério e garantir que todos os valores estejam no intervalo de 0 a 1

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n. \quad (1)$$

Passo 2: Determinar o peso, que pode ser subjetivo - definido pelo tomador de decisão, método AHP, método de Entropia dentre outros. As equações 2 e 3 indicam,

respectivamente, o valor da entropia para cada item da matriz P e o peso de cada critério (ZHU; TIAN; YAN, 2020).

$$e_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij})$$

$$w_i = \frac{1 - e_j}{\sum_{i=1}^m (1 - e_j)}$$

Passo 3: Calcular os valores normalizados a partir da aplicação do peso obtido no passo 2. Portanto, a matriz P assume o formato $V_{ij} = w_i \times p_{ij}$;

Passo 4: Definição da solução ideal positiva (A^+) e ideal negativa (A^-), onde serão definidos para cada propriedade se o valor esperado deve ser máximo ou mínimo;

$$A^+ = (p_1^+, p_2^+, \dots, p_n^+)$$

$$A^- = (p_1^-, p_2^-, \dots, p_n^-),$$

em que:

p_j^+ é o valor máximo de p_{ij} para critério benefício e valor mínimo para o critério custo;

p_j^- é o valor mínimo de p_{ij} para critério benefício e valor máximo para o critério custo.

Passo 5: Calcular as medidas de separação para as alternativas, distância euclidiana para a solução ideal positiva e negativa;

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - p_j^+)^2}$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - p_j^-)^2}$$

para $i = 1, \dots, m$.

Passo 6: Calcular o valor de similaridade para posição ideal positiva, ou seja, a alternativa mais próxima da solução ideal positiva e mais distante da solução ideal negativa;

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, \quad (2)$$

$$i = 1, \dots, m.$$

Passo 7: Organizar o ranking baseado no mais alto valor de C_i , o coeficiente de proximidades.

2.2.1 Técnicas de Normalização e Sistemas de Pesos nos MADM

Na literatura existem muitas definições para normalização, variando de acordo com a aplicação. Na estatística, a definição de padronização consiste no processo de transformar valores medidos de diferentes escalas para uma escala comum (SWENSON, 2018). Nos MADM o processo de normalização exerce um importante papel na tomada de decisão, pois transforma os dados de entrada em dados numéricos possíveis de comparação. Dessa forma, tornando possível a utilização de um MADM para criar um ranking e classificar as alternativas (VAF AEI; RIBEIRO; CAMARINHA-MATOS, 2016). As principais técnicas de normalização utilizadas em MADM são

- a) Método Euclidiano: Utilizado no método TOPSIS, representado abaixo pela equação 33 para critério benefício e 4 para benefício de custo.

$$rij = \frac{xij}{\sqrt{\sum_{i=1}^n xij^2}} \quad (3)$$

$$rij = 1 - \frac{xij}{\sqrt{\sum_{i=1}^n xij^2}} \quad (4)$$

- b) Método Máximo: Técnica utilizada no método SAW (sigla em inglês para Ponderação Simples Aditiva), representada pela equação 5 para critério de benefício e 6 para custo.

$$rij = \frac{xij}{x^{max}} \quad (5)$$

$$rij = 1 - \frac{xij}{x^{max}} \quad (6)$$

- c) Método Mínimo-Máximo: Técnica de normalização utilizada no método VIKOR (sigla que na tradução significa otimização multicritério e solução de compromisso), representada pela equação 7 para critério de benefício e 8 para custo, no qual cada atributo é subtraído do valor mínimo dos atributos analisados e dividido pela diferença entre o valor máximo e valor mínimo.

$$rij = \frac{xij - xj^{min}}{xj^{max} - xj^{min}} \quad (7)$$

$$rij = \frac{xj^{max} - xij}{xj^{max} - xj^{min}} \quad (8)$$

- d) Método da Adição: Técnica utilizada em métodos como o AHP (sigla em inglês para processo hierárquico analítico), conforme equação 9 para critério de benefício e 10 para custo, abaixo.

$$rij = \frac{xij}{\sum_{i=1}^n xij} \quad (9)$$

$$rij = \frac{\frac{1}{xij}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{xij}} \quad (10)$$

O sistema de pesos utilizados nos métodos MADM tem a função de classificar em ordem de importância o atributo analisado. Dentre os mais famosos, pode-se citar

o método da AHP, desenvolvido pelo professor Thomas Saaty em 1971, no qual classifica os atributos por meio de comparação aos pares, escala fundamental e hierarquização (SAATY, 2014). De modo geral, a aplicação do método consiste em separar os atributos por hierarquia, comparar critérios aos pares e separar vetores de prioridades a fim de obter a melhor alternativa. Outro método muito aplicado dentro do sistema de pesos é o ANP (sigla em inglês para Processo em Redes Analítico), desenvolvido também pelo professor Thomas Saaty em 1996, o método com estrutura parecida com o AHP permite criar uma classificação dos sistemas quando não é possível aplicar a estrutura de hierarquização na análise (SAATY, 2006). Segundo MARANHÃO et al. (2016), o modelo AHP prevê 7 etapas, são eles:

Etapa 1: Preenchimento da matriz de critérios par a par, de forma que o elaborador faça comparações de acordo com suas preferências seguindo a escala fundamental de intensidade descrita por Saaty na Tabela 2. A matriz deve satisfazer a condição recíproca, por exemplo se X é três vezes mais importante que Y, então Y é 1/3 vezes a importância de X;

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & a_{ij} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{ij} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \text{ com } a_{ij} \neq 0$$

Tabela 2 - Escala fundamental de números absolutos

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	Duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
2	Fraco ou leve	
3	Importância moderada	Experiência e julgamento favorecem ligeiramente uma atividade em detrimento de outra
4	Mais moderado	
5	Forte importância	Experiência e julgamento favorecem ligeiramente uma atividade em detrimento de outra
6	Importância mais forte	
7	Importância muito forte	Uma atividade é favorecida muito fortemente sobre outra; seu domínio é demonstrado na prática
8	Muito, muito forte	
9	Extrema importância	A evidência que favorece uma atividade sobre outra é da mais ordem possível de afirmação

Fonte: Adaptado de Saaty (2008)

Etapa 2: Normaliza-se cada coluna da matriz A, utilizando a equação 8;

Etapa 3: Aplica-se o conceito de autovetor para encontra os pesos locais e globais de cada critério. O autovetor é a média geométrica da linha, pode ser calculado pela forma a seguir:

$$w_i = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n a_{ij}}, \quad j = 1, \dots, n.$$

Etapa 4: Normaliza-se o autovetor, no qual consiste em dividir o valor do autovetor obtido pela soma total de autovetores da coluna;

Etapa 5: Calcula-se do autovalor máximo, no qual cada autovetor representado por T é multiplicado pela soma das colunas da matriz de comparação (w);

$$\lambda_{max} = T \times w$$

Etapa 6: Calcula-se o Índice de Consistência (IC) de cada alternativa;

$$IC = \frac{\lambda_{max} - N}{N - 1},$$

em que N é a ordem da matriz de critérios.

Etapa 7: Calcula-se a Razão de Consistência (RC), sendo que esse valor deve ser menor que 0,10. Caso o valor seja superior, os critérios devem ser ajustados de forma a satisfazer a condição;

$$RC = \frac{IC}{CA},$$

em que CA é o índice de consistência aleatória que leva em consideração a ordem da matriz, conforme tabela 3.

Tabela 3 - Índice de consistência aleatória

Ordem da matriz (N)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CA	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Fonte: Adaptado de Saaty (2008)

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os procedimentos metodológicos e estratégias utilizadas para eleger o melhor fluido de corte na usinagem de liga de alumínio da série 7XXX, classe AA7050. A Figura 5 apresenta uma sequência das atividades desde a obtenção dos dados em experimentos controlados em laboratório à elaboração dos resultados.

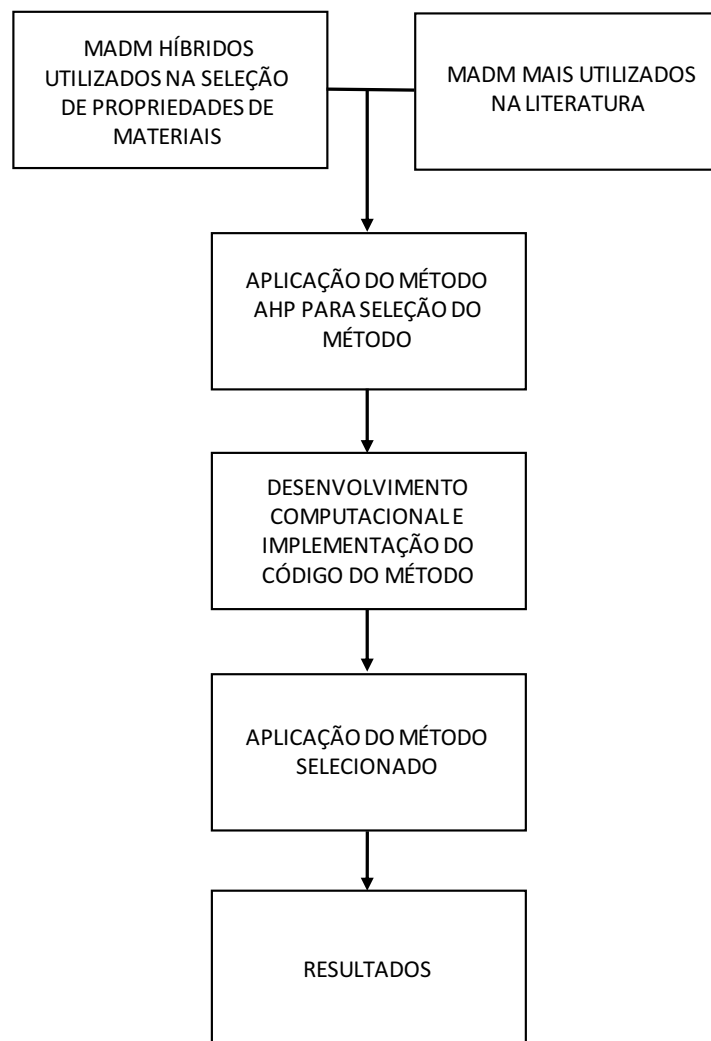


Figura 5 - Procedimentos para obtenção dos resultados

Fonte: Autoria própria (2020)

Os dados dos fluidos utilizados nesse trabalho foram obtidos experimentalmente em trabalhos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa de

Manufatura Sustentável¹ de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Londrina e sua obtenção não foi escopo deste trabalho. Os experimentos resultaram em um banco de dados de 31 tipos de fluidos de base semissintéticos, sintéticos e vegetal, no qual envolve dados do processo de usinagem como potência de desgaste em diversas condições, aspectos de microbiologia, tribologia e resultados físico-químicos de cada fluido.

Para a determinação do melhor fluido de corte foi necessário a utilização de um método de decisão multicritério que permitisse classificar e ranquear os fluidos. A escolha do método partiu do tipo de análise a ser utilizada e dos dados que seriam analisados. Nesse âmbito, o grupo de MCDM que permite o tratamento dos resultados quantitativos com maior acurácia dos dados no trabalho proposto foi o MADM, uma vez que o objetivo dependeu da análise de vários atributos conhecidos e parâmetros previamente estabelecidos. Para a determinação do melhor MADM a ser utilizado, foi realizada uma pesquisa da quantidade de artigos publicados na literatura científica que citaram ou utilizaram MADM para a tomada de decisão em assuntos das mais variadas áreas. A ferramenta utilizada para levantamento da base de dados dos métodos MADM mais citados na literatura foi o *Web of Science* desenvolvida pelo *Institute for Scientific Information (ISI)*. O *Web of Science* é um website que foi desenvolvido em 1997 e que fornece dados de citações para diferentes disciplinas acadêmicas.

A partir dos métodos mais comuns utilizados na literatura, selecionou-se três métodos de decisão multi-atributo e aplicou as diferentes combinações dos sistemas de pesos e normalização. Essa metodologia ajuda a selecionar os métodos comuns que aparecem com mais frequência nos artigos, entretanto, não leva em consideração os novos métodos híbridos que tem uma menor incidência por serem métodos adaptados com aplicações mais restritas. Yazdi (2020) utilizou uma combinação do BWM (sigla para *Best-Worst Method*) com o método WASPAS (sigla em inglês para Avaliação de Produto de Soma Agregada Ponderada) para estimar quais atributos tem maior e menor prioridade na análise. De semelhante modo, métodos robustos na seleção de propriedades dos fluidos foram selecionados.

¹ Grupo de Pesquisa de Manufatura Sustentável
Fonte: dgp.cnpq.br/dgp/espelhogrupo/9791418622035375

A escolha do melhor método dentre as opções de métodos mais comuns da literatura, assim como dos métodos híbridos utilizados na seleção de propriedades de fluidos, foi feita aplicando-se o método AHP para selecionar o método mais apropriado para o estudo. O método AHP foi escolhido por tratar-se de um método confiável muito utilizado na literatura na seleção de atributos simples. Os dados obtidos nos experimentos foram organizados e separados com auxílio do editor de planilhas *Excel* e o código com o método selecionado foi desenvolvido no software, *Python*. Os resultados apresentados pelos diferentes métodos foram então confrontados e o fluido que teve maior incidência nos resultados foi selecionado como melhor fluido para usinabilidade das ligas de alumínio AA 7050.

4 DESENVOLVIMENTO

Nesta seção são apresentados os fluidos, resultados e discussão sobre a escolha do MADM a partir da aplicação do método AHP sobre os métodos mais citados na literatura. Por fim, a aplicação de tal método sobre os fluidos de corte testados em laboratório.

4.1 SELEÇÃO DO MÉTODO DE DECISÃO MADM

A pesquisa pelos métodos de decisão multiatributo em artigos mais publicados que constam no acervo do site *Web of Science* é uma forma de avaliar quais métodos foram mais utilizados e citados até a realização deste trabalho. No entanto, a quantificação exata é de elevada dificuldade, pois nem todos artigos que utilizaram os métodos fizeram referência do método no título do artigo. Sendo assim, a pesquisa foi orientada para encontrar artigos que fizeram referência no título e no resumo. Além disso, a busca levou em conta a quantidade de artigos contendo o método, sendo ele híbrido ou não. Por esse motivo, as buscas foram feitas em duas etapas, primeiro considerando apenas os métodos simples e em seguida, considerando os métodos híbridos.

As buscas realizadas levando em conta assuntos das mais variadas áreas e buscando método na forma simples, ou seja, sem ser híbrido, resultaram em maior número no método AHP com 2249 artigos publicados, se considerado a busca por AHP sem citação dos termos *fuzzy*, *hybrid* e contendo o termo *analytical*. Em segundo lugar aparece o método TOPSIS com mais artigos referenciados, são 1649 aparições considerando que não haja citação dos termos *fuzzy*, *hybrid* e contendo o termo *TOPSIS*. Em seguida, métodos de multicritério utilizando redes neurais apareceram 643 vezes. Tratando-se de métodos híbridos, o que apareceu com mais frequência foi o método fuzzy AHP-TOPSIS, com 333 ocorrências. Cabe ressaltar que a quantidade de artigos publicados citados acima foi obtida para buscas orientadas nos filtros citados no texto. A Figura 6 ilustra o resultado obtido.

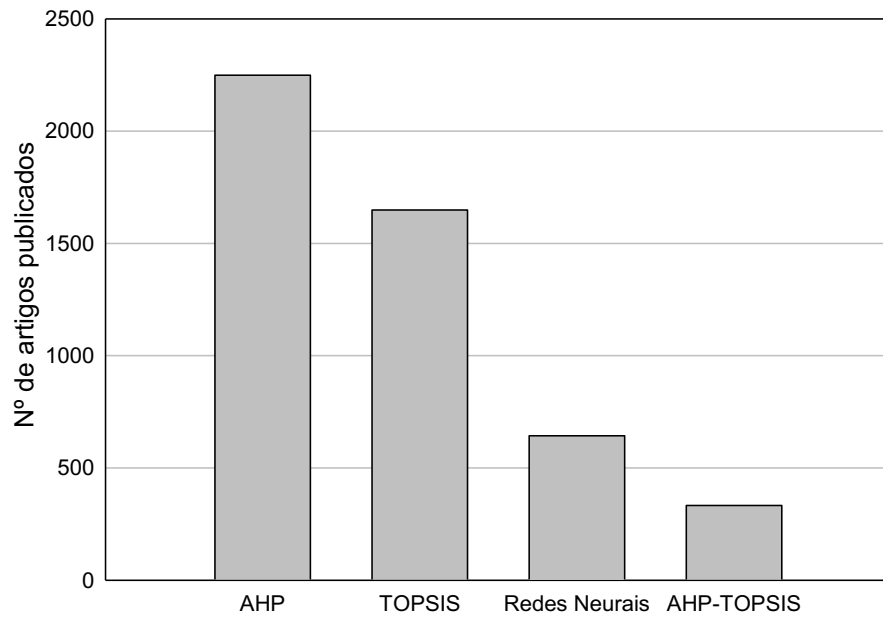


Figura 6 - Número de artigos publicados de assuntos gerais com MADM
Fonte: Autoria própria (2020)

Para o caso de utilização de métodos de decisão multiatributo na seleção de propriedades de materiais, o método que mais apareceu na busca incluindo os termos híbridos ou *fuzzy* e seleção de materiais foi redes neurais, com 306 resultados, seguido do método TOPSIS que apareceu 72 vezes e por fim o método AHP com 65. A Figura 7 ilustra os resultados obtidos.

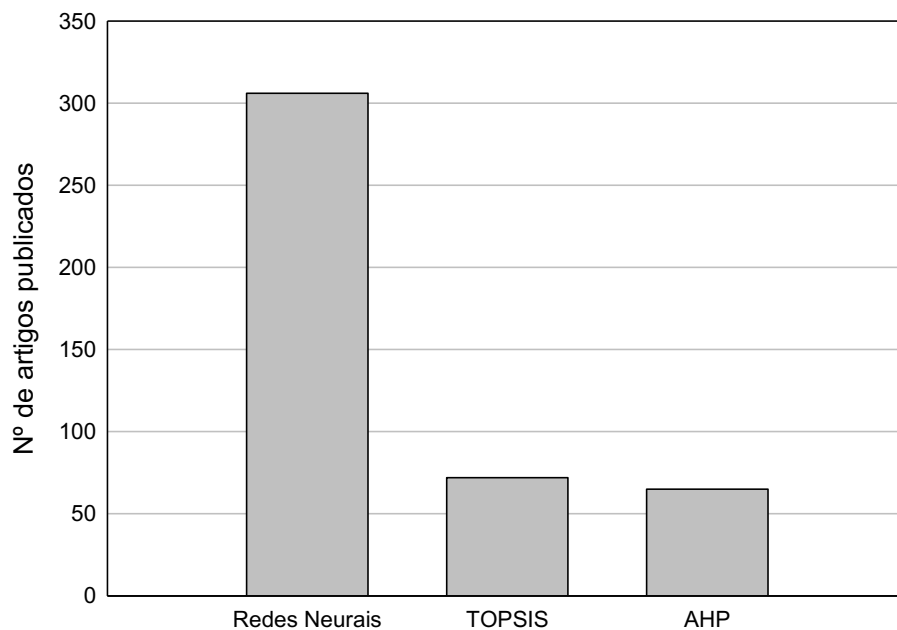


Figura 7 - Quantidade de artigos MADM na seleção de propriedades de materiais
Fonte: Autoria própria (2020)

4.1.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP

Uma vez reconhecidos os métodos mais utilizados na literatura e na seleção de propriedade dos materiais, aplicou-se o método AHP para selecionar o modelo ideal para o problema de seleção do melhor fluido de corte. O método AHP foi implementado no editor de planilhas *Excel* a partir de três etapas. A primeira etapa consiste na estruturação do problema em níveis hierárquicos, sendo a seleção do método MCDA o objetivo geral. O primeiro nível de hierarquia é composto pelos objetivos intermediários, enquanto o segundo e terceiro nível são compostos pelos critérios e alternativas respectivamente. A segunda etapa é a definição das prioridades e a terceira e última etapa, a consistência lógica.

Na segunda etapa, atribuiu-se pesos aos critérios conforme escala fundamental de números absolutos de Saaty (2008), indicados na Tabela 2, por meio da comparação aos pares. Foram adotados três critérios: a complexidade computacional, versatilidade e agilidade. O critério de complexidade computacional foi considerado na análise tanto para a implementação do código quando para a dificuldade de processamento. Já o critério de versatilidade leva em conta a variedade de problemas em que o método pode ser aplicado, considerando problemas com poucas e muitas variáveis. O critério agilidade leva em conta o tempo e dificuldade para criação da matriz, considerando problemas em que a matriz de decisão possui um grande número de variáveis. Além disso, visa comparar o tempo requerido para construção da matriz em cada método.

A comparação de cada critério na matriz ocorre aos pares, ou seja, é atribuído um peso de importância do critério em relação aos outros de acordo com a importância atribuída na escala fundamental representado pela Tabela 4. Os pesos de comparação abaixo da diagonal principal são o inverso dos correspondentes acima. Após preenchimento é feita a soma de cada coluna e calculado o autovetor, por exemplo, no *Excel* é feito por meio do comando de média geométrica. Em seguida, o autovetor foi normalizado dividindo-se cada valor pelo somatório de todos auto vetores, sendo esse resultado o peso de cada critério na decisão final aplicado na matriz de decisão.

Tabela 4 - Matriz de comparação dos critérios

	Complexidade computacional	Versatilidade	Agilidade	Auto vetor	Autovetor normalizado
Complexidade computacional	1,00	3,00	2,00	1,82	51,71%
Versatilidade	0,33	1,00	0,25	0,44	12,43%
Agilidade	0,50	4,00	1,00	1,26	35,86%
Σ	1,83	8,00	3,25	3,51	100,00%

Fonte: Aatoria própria (2021)

A verificação de consistência foi feita calculando inicialmente o autovalor máximo que consiste somatório da multiplicação do somatório de cada coluna pelo autovetor normalizado. O valor obtido foi 3,11 e em seguida calculou-se o índice de consistência (IC) e razão de consistência (RC). Para cálculo do RC, utilizou-se o valor de 0,58 indicado por Saaty para matriz de ordem 3.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - N}{N - 1} = 0,054 \quad (11)$$

$$RC = \frac{IC}{0,58} = 9,3\% \quad (12)$$

No qual N é a ordem da matriz. Valores de RC menor ou igual a 0,1 indicam que os valores assumidos não violam o diagrama de Pareto recomendado pelo autor.

Para o primeiro critério avaliado, atribuiu-se pesos de acordo com a complexidade em uma escala de 0-10, sendo 10 o mais complexo e 0 o menos complexo. Nesse caso, como o valor desejado é o menor, a simples normalização apresentaria valores inversos ao desejado. Dessa forma dividiu-se o somatório por cada alternativa e em seguida normalizou o resultado obtido. O resultado do critério complexidade computacional está representado na Tabela 5.

Tabela 5 - Análise do critério complexidade computacional

Alternativas	Complexidade computacional	$\frac{\Sigma}{x}$	Normalização
AHP	6	4,00	23%
TOPSIS	4	6,00	34%
AHP-TOPSIS	5	4,80	27%
Rede Neural	9	2,67	15%
Somatório (Σ)	24	17,47	100%

Fonte: Aatoria própria (2021)

A complexidade do código de rede neural é superior as demais uma vez que envolve conhecimentos de *Machine Learning*. Dentre os demais métodos, TOPSIS apresenta uma complexidade um levemente menor à AHP e ao método híbrido AHP-TOPSIS que utiliza o método de análise hierárquica para cálculo dos pesos.

De semelhante modo atribui-se pesos para os critérios versatilidade e agilidade. Nesse quesito, atribuiu-se um valor inferior para versatilidade do método rede neural devido a necessidade de treinamento e custo de implementação ser mais elevado, além de requerer mais tempo para alcançar alta assertividade (K, 2020). No quesito agilidade, o método TOPSIS se destacou devido a sua estrutura de matriz de decisão não necessitar comparação aos pares de cada alternativa com relação às demais para determinação do peso, o que permite uma aplicação mais rápida. A análise dos critérios versatilidade e agilidade estão representadas nas Tabelas 6 e 7, respectivamente.

Tabela 6 - Análise do critério versatilidade

Alternativas	Versatilidade	Normalização
AHP	7	26%
TOPSIS	8	30%
AHP-TOPSIS	7	26%
Rede Neural	5	19%
Somatório (Σ)	27	100%

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 7 - Análise do critério agilidade

Alternativas	Agilidade	Normalização
AHP	6	25%
TOPSIS	7	29%
AHP-TOPSIS	6	25%
Rede Neural	5	21%
Somatório (Σ)	24	100%

Fonte: Autoria própria (2021)

Com as relações dos critérios normalizados, aplicou-se os pesos de cada critério – 0,52 para complexidade computacional; 0,12 para versatilidade e 0,36 para agilidade – obtido na Tabela 4 e realizou-se a soma dos produtos de cada alternativa, conforme indicado na Tabela 8. O método de decisão mais adequado para a seleção do fluido de corte para usinagem com base na análise é o método TOPSIS.

Tabela 8 - Matriz de decisão

Critério/Alternativas	Complexidade computacional	Versatilidade	Agilidade	Vetor de decisão
Vetor dos critérios	0,52	0,12	0,36	-
AHP	23%	26%	25%	24%
TOPSIS	34%	30%	29%	32%
AHP-TOPSIS	27%	26%	25%	26%
Rede Neural	15%	19%	21%	18%

Fonte: Autoria própria (2021)

4.2 FLUIDOS ANALISADOS

Os dados dos fluidos de corte testados no laboratório foram inicialmente divididos em três grupos referentes a natureza – sintético, semissintético e vegetal. No total eram 31 fluidos, aqueles que atenderam aos requisitos mínimos impostos pelos pesquisadores avançaram para a etapa da seleção, os demais foram descartados. Nessa etapa, totalizou-se 15 fluidos, indicados na Tabela 9, que incluiu tanto os recomendados para HSM (*High Speed Machining*) termo em inglês para usinagem em alta velocidade quanto os não recomendados.

Tabela 9 - Fluidos testados no laboratório

Índice	Fluidos testados	Natureza
A	Fluido A	semissintético
B	Fluido B	semissintético
C	Fluido C	semissintético
D	Fluido D	sintético
E*	Fluido E	sintético
F*	Fluido F	semissintético
G	Fluido G	semissintético
H	Fluido H	vegetal
I*	Fluido I	sintético
J	Fluido J	semissintético
K	Fluido K	vegetal
L*	Fluido L	sintético
M	Fluido M	vegetal
N	Fluido N	vegetal
O*	Fluido O	sintético

* Fluidos de corte não recomendados para HSM

Fonte: Autoria própria (2021)

Os resultados obtidos por Chanes et. al (2019) para os testes dos fluidos foram classificados nos seguintes grupos: usinagem, microbiologia, tribologia e ensaios físico químicos. Em cada grupo foram analisados aspectos que incluem desde a capacidade de lubrificação no processo de desbaste de um passe de avanço pequeno da ferramenta à facilidade de formação de colônias de fungos e bactérias.

Para o grupo usinagem foram avaliados os parâmetros nas peças de liga de alumínio série 7XXX, classe AA 7050 usinadas como desbaste e potência para três condições, mantendo a rotação fixa em 12000 RPM e fazendo o avanço 0,05; 0,15 e 0,30 mm/dente na matriz. Condições na região estrutural da peça e condições na região de crista, ou seja, região de parede fina também foram avaliados. Para essas últimas duas regiões foi avaliado o erro de forma, potência e rugosidade (para parede fina).

Para o grupo de microbiologia analisado, contou-se com a utilização de um microscópio para realizar a contagem da quantidade de colônias de fungos e bactérias para determinar a Unidade Formadora de Colônias (UFC; em inglês, *colony forming unit*) em UFC/ml. Foi observado, também, a quantidade de dias até a formação do fubá, condição que torna a utilização do fluido inviável.

Nos testes de tribologia, foi utilizada a mesma liga de alumínio, AA 7050 com anel de carbeto a fim de avaliar o desgaste e formação da película de lubrificação na superfície por meio do teste de Reichert, conforme apresentado no estudo sobre o comportamento tribológico do óleo de Moringa em análises de lubrificação utilizando rugosímetro Reichert test por Lutfi et. al (2015). A rugosidade da peça foi quantificada por meio de um rugosímetro e a superfície de desgaste pôde ser observado com auxílio de um microscópio.

Para o último grupo, ensaios físicos químicos, foi utilizada uma emulsão de composição 20% de óleo analisado, 8% surfactante e 72% água para avaliar a capacidade de refrigeração e área de desgaste nos testes tribológicos. Onde a capacidade de refrigeração foi avaliada por meio dos termopares instalados nos pinos utilizados no teste de Reichert. A qualidade da água foi levada em conta na análise, uma vez que os testes foram realizados ao longo de meses e a água utilizada durante o processo teve sua composição alterada. Além desses, outros atributos foram testados no estudo realizado pelo Grupo de Pesquisa de Manufatura Sustentável e que foram utilizados na análise de decisão do melhor fluido. Os atributos utilizados estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Critérios classificados por grupo e subgrupo

Grupo	Teste	Critérios
Usinagem	Desbaste	Cond 1, 2 e 3 RPM 12000 Av 0,05 0,15 e 0,30mm (resultado m ³)
	Potência desbaste	Condição 1, 2 e 3
	Acabamento	A74 $v_c = 1885$, $f_z = 0,2$ mm/dente
	Condição na matriz $v_c = 1885 / f_z = 0,2$	A75 $v_c = 1885$, $f_z = 0,25$ mm/dente
		A76 $v_c = 1885$, $f_z = 0,3$ mm/dente
	Peça estrutural	Erro forma (mm) Potência (kW)
Peça crista (parede fina)		Erro forma (mm)
		Rugosidade (Ra)
		Potência (kW)
Microbiologia	Microbiologia	Fungos (UFC/ml) Bactérias (UFC/ml) Fubá (dias)
Tribologia	Reichert	Area de desgaste (mm ²)
		Molhabilidade (Ângulo °)
		Detergência
		Temperatura °C
Ensaio físico-químicos	Água	Forma de desgaste
		Espuma
		Corrosão
		Elementos inorgânicos proibidos
		Turbidez
	Emulsão	pH
		Alcalinidade
		Cloretos
		Dureza total
		Condutividade
Sólidos totais	Concentração média	
	Índice de refração	
	Estabilidade	
	Acidez	
Manchamento	Névoa	
	Natureza	

Fonte: Autoria própria (2021)

4.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO TOPSIS

A implementação do método de decisão TOPSIS foi feita por meio da linguagem de programação Python, versão 3.8, no qual o algoritmo² utilizado como

² Software <http://computacaointeligente.com.br/algoritmos/TOPSIS-tomada-de-decisao/>

base foi desenvolvido pelo programador André Pacheco. O código, disponível no repositório digital GitHub do programador, gratuito e livre para alteração, foi modificado para atender a análise desse estudo.

Conforme apresentado anteriormente, a construção do método TOPSIS se dá em 6 passos, que foram seguidos na implantação do código. Já para a aplicação do método são necessárias 3 etapas: Construir a matriz de decisão, determinar os pesos de cada critério e identificar qual a solução ideal, se é critério de benefício (valor máximo) ou se é critério de custo (valor mínimo). Abaixo seguem as 3 etapas.

Etapa 1: Construção da matriz de decisão;

O primeiro passo é a construção da matriz das alternativas viáveis a partir dos dados fornecidos pelo Grupo de Pesquisa e Manufatura Sustentável, que possui 15 linhas (fluidos) e 35 colunas (critérios).

Etapa 2: Ponderação da matriz normalizada;

A segunda etapa é a ponderação da matriz normalizada por meio dos pesos. Para essa etapa foram considerados duas formas, ponderação de acordo com os critérios mais impactantes nas características e ponderação por meio do método da Entropia. Na primeira forma os critérios foram divididos em dois grupos, os que foram considerados possuir relação direta com a qualidade do processo de usinagem e natureza do fluido, totalizando 15 critérios, e os critérios secundários, que foram considerados por impactar nas características do fluido de forma mais sutil, resultando em 20 critérios. Foi então considerado um peso igual para cada critério do grupo que mais impactam, correspondendo a 60% do peso total, portanto cada um dos 15 critérios teve peso na análise final de 0,04. Para o grupo que impacta menos foi feito de forma semelhante, cada um dos 20 fluidos foi responsável por um peso de 0,02 no valor final. Os pesos e prioridades de cada critério estão inseridos na Tabela 11.

Etapa 3: Identificação dos critérios;

A última etapa foi a identificação do critério cuja solução ideal é o maior valor positivo (A+) ou menor valor para a negativa (A-). A escolha do desempenho foi baseada em custo (onde o melhor desempenho é dado pelo menor valor) e benefício

de cada critério, no qual desempenho é dado pelo maior valor. Abaixo segue a classificação de cada critério (custo ou benefício) e breve explicação;

- Desbaste e potência: Para as condições 1, 2 e 3 é desejável que o fluido contribua positivamente para o desbaste, maior quantidade de material retirado consumindo menos potência. Por esse motivo, o critério desbaste é do tipo benefício enquanto todos os critérios de potência são do tipo custo, portanto devem ser minimizados;

- Acabamento na matriz: Para a condição na matriz, referente ao acabamento, é desejável que possua o menor valor, uma vez que valores mais altos quantificaram uma menor qualidade do acabamento. Critério de custo;

- Erro forma e rugosidade: Tanto na condição estrutural como na crista, os menores valores significam maior precisão da operação, portanto é desejável que o erro seja o menor passível. Para o critério rugosidade é interessante que possua um valor menor, pois dessa forma apresenta uma qualidade superficial melhor. Ambos são critérios de custo;

- Fungos, bactérias e fubá: É desejável que a quantidade de fungos e bactérias sejam mínimos possíveis nas emulsões. Por ficarem muito tempo armazenados, é interessante que exista uma resistência microbiológica. Portanto, são critérios de custo. Já o fubá é um critério de benefício, uma vez a durabilidade do fluido está relacionada também com a quantidade de dias que leva até sua inutilização;

- Área de desgaste e forma de desgaste: No ensaio do teste tribológico de Reichert, quanto menor a cicatriz de desgaste mais eficiente a lubrificação, portanto o critério é de benefício. Na forma de desgaste foi observado desgaste da forma de oxidação, abrasão e adesão, sendo oxidação a pior forma pelo fato de o fluido não proteger o material de degradação oxidativa. Para esse caso as formas foram padronizadas em escala de 0 a 1, sendo 1 a forma oxidativa de desgaste, enquanto as demais formas assumiram valor 0. Critério de custo;

- Molhabilidade (ângulo): O ângulo de molhabilidade, ou umectação, representa a habilidade de um líquido manter contato com uma superfície sólida. Portanto quanto menor for esse ângulo, melhor lubrificante apresentará o fluido. O critério é de custo;

- Detergência: O fluido com alta detergência ajuda a emulsão a umedecer a peça, portanto quando superior sua capacidade, melhor. Critério de benefício;

- Temperatura: A temperatura medida no teste de Reichert indica a capacidade do fluido de retirar calor do processo. Nesse sentido, quanto menor a temperatura no termopar acoplado no teste, maior a eficiência do fluido em refrigerar. O critério aplicado é de custo;

- Espuma: A existência de espuma no fluido resulta em lubrificação ineficiente, podendo causar cavitação e deficiente fluxo de óleo. Além disso, impacta negativamente na transferência de calor da ferramenta para o fluido. Portanto, sua aparição deve ser minimizada, logo o critério é de custo;

- Corrosão: Não é desejado que o fluido possua acidez elevada e agrida a ferramenta, tampouco o material a ser usinado. Portanto, o critério é de custo;

- Elementos inorgânicos proibidos (água): Apesar de todas as amostras estarem isentas de tais elementos, o ideal é que a água não esteja contaminada para que não tenha alterada sua composição e dureza. É um critério de custo;

- Turbidez (água): A turbidez da água, medida a partir de um nefelômetro, indica o quanto de refração ocorre na água devido a presença de partículas sólidas em suspensão. Um menor valor é desejado para uma água sem alteração de propriedades, portanto critério de custo;

- pH (água): Segundo alguns autores, os fluidos de corte devem estar na faixa de pH entre 8,8 e 9,2. Valores abaixo de 8 podem tornar a emulsão ácida e promover a corrosão do material. Os valores de pH medidos para a água estão entre 6,2 e 6,7. Considerando essa faixa, o critério é de benefício;

- Alcalinidade (água): Conforme indicado no item pH, o fluido deve apresentar um nível ideal de basicidade. Na escala de alcalinidade utilizada para medir (mg/l de $CaCO_3$), considerou-se os valores mais elevados de alcalinidade como o ideal, portanto critério considerado foi de benefício;

- Cloretos (água): Um valor elevado de cloreto contribui para corrosão do material e para odores desagradáveis, portanto o critério considerado é de custo;

- Dureza total (água): Para alguns fornecedores de fluidos de corte famosos como a Blaser, a faixa ideal recomendada é entre 5 – 15° dH (90 – 270 ppm), portanto de acordo com os valores medidos (entre 14,2 e 80 ppm) foi considerado critério de benefício;

- Condutividade (água): Um bom fluido de corte deve possuir alta capacidade de refrigeração, em outras palavras, o calor específico e condutividade térmica devem ser elevados. Critério de benefício;

- Sólidos totais (emulsão): A presença de sólidos totais como sais minerais e sais de dureza, principalmente cloretos e sulfatos, apresentam um poder corrosivo maior e surgimento de bactérias, portanto devem ser evitados. Critério de custo;

- Concentração média (emulsão): A Concentração da emulsão deve ser mantida em uma faixa ideal, não pode ser muito baixa pois favorece o surgimento de fungos e bactérias, além de resultar em uma baixa lubrificação, alto poder de fazer espuma e elevada corrosão. Entretanto, valor elevado pode causar irritação da pele humana. Para a faixa considerada, entre 5 e 9,3% foi considerado ideal o menor valor, logo critério de custo;

- Estabilidade (emulsão): A estabilidade do fluido é importante para mantê-lo homogêneo desde a estocagem até o uso na área de corte. É importante que apresente alta estabilidade, portanto, critério de benefício;

- Acidez (emulsão): Para valores de pH abaixo de 8, o fluido é mais corrosivo e menos eficiente por apresentar acidez elevada. Para a faixa de valores analisados, a quantidade de NaOH para chegar-se ao pH ideal deve ser a maior, portanto, o critério considerado foi benefício;

- Névoa (emulsão): É desejável que a quantidade de névoa formada seja a menor possível pelo fato das partículas finas que se propagam no ar serem nocivas à saúde. Para esse critério não foi medido valores de névoa, até mesmo pela dificuldade em se encontrar uma unidade. Dessa forma, utilizou-se uma padronização por meio de uma escala 0-1 onde 0 apresenta muita névoa e 1 pouquíssima névoa. Considerando essa padronização o critério é de benefício;

- Manchamento (emulsão): O alumínio possui uma camada natural contra corrosão, formada pela oxidação ao oxigênio do ar. Dependendo do nível de alcalinidade, a camada de oxidação pode ser atacada e resultar em manchas na peça. É indesejável que isso ocorra e apesar de não ter tido variações entre as alternativas testadas, o critério é considerado como custo;

- Natureza: Para o caso do critério natureza do fluido, foi considerado o fluido vegetal como mais desejado por agredir menos a natureza, seguido de semissintético e por fim sintético. Dessa forma, foi criada uma escala de 0 a 1 no qual foi atribuída

nota 1 para o fluido vegetal, 0,75 para semissintético e 0,5 sintético. Critério de benefício.

4.3.1 Ponderação de acordo com os critérios mais importantes no fluido de corte

Tabela 11 - Desempenho ideal, importância e peso do critério

Teste	Atributos	Importância	Peso	Desejável/ Ideal	Valor
Desbaste	Cond 1,2 e3 RPM 12000 Av 0,05; 0,15 e 0,30/lâmina (resultado M3)	++	0,04	MÁXIMO	1
Potência desbaste	Condição 1,2 e 3	++	0,04	MÍNIMO	0
Acabamento Condição na matriz	A74 $v_c = 1885$, $f_z = 0,2$	+	0,02	MÍNIMO	0
	A75 $v_c = 1885$, $f_z = 0,25$	+	0,02	MÍNIMO	0
	A76 $v_c = 1885$, $f_z = 0,3$	+	0,02	MÍNIMO	0
Peça estrutural	Erro forma	++	0,04	MÍNIMO	0
	Potência	++	0,04	MÍNIMO	0
Peça crista (parede fina)	Erro forma	++	0,04	MÍNIMO	0
	Rugosidade	++	0,04	MÍNIMO	0
	Potência	++	0,04	MÍNIMO	0
Microbiologia	Fungos	+	0,02	MÍNIMO	1
	Bactérias	++	0,04	MÍNIMO	0
	Fubá (dias)	++	0,04	MÁXIMO	1
Reichert	Area de desgaste	++	0,04	MÍNIMO	0
	Molhabilidade (Ângulo)	+	0,02	MÍNIMO	0
	Detergência	+	0,02	MÁXIMO	1
	Temperatura °C	+	0,02	MÍNIMO	0
	Forma de desgaste	+	0,02	MÁXIMO	1
Água	Espuma	++	0,04	MÍNIMO	0
	Corrosão	+	0,02	MÍNIMO	0
	Elementos inorgânicos proibidos	+	0,02	MÍNIMO	0
	Turbidez	+	0,02	MÍNIMO	0
	pH	+	0,02	MÁXIMO	1
	Alcalinidade	+	0,02	MÁXIMO	1
	Cloretos	+	0,02	MÍNIMO	0
	Dureza total	+	0,02	MÁXIMO	1
	Condutividade	+	0,02	MÁXIMO	1
	Sólidos totais	+	0,02	MÍNIMO	0
Emulsão	Concentração média	++	0,04	MÍNIMO	0
	Índice de refração	++	0,04	MÍNIMO	0
	Estabilidade	+	0,02	MÁXIMO	1
	Acidez	+	0,02	MÁXIMO	1
	Névoa	++	0,04	MÁXIMO	1
	Manchamento	+	0,02	MÍNIMO	0
	Natureza	++	0,04	MÁXIMO	1

Fonte: Autoria própria (2021)

O método foi aplicado para três condições diferentes variando o avanço e a potência de desgaste e mantendo os demais critérios constantes. A primeira condição analisada foi para um avanço de 0,05 mm/dente e 12000 RPM, conforme Tabela 12 e Figura 8.

Tabela 12 - Condição 1, peso 60-40% e avanço de 0,05 mm/dente

Índice	Fluido	Natureza	Coefficiente	Ranking
A	Fluido A	semissintético	0,6777	8°
B	Fluido B	semissintético	0,7029	6°
C	Fluido C	semissintético	0,6432	11°
D	Fluido D	sintético	0,7336	5°
E	Fluido E	sintético	0,6712	9°
F	Fluido F	semissintético	0,6465	10°
G	Fluido G	semissintético	0,5982	14°
H	Fluido H	vegetal	0,8030	1°
I	Fluido I	sintético	0,4415	15°
J	Fluido J	semissintético	0,7773	3°
K	Fluido K	vegetal	0,6253	12°
L	Fluido L	sintético	0,5991	13°
M	Fluido M	vegetal	0,7563	4°
N	Fluido N	vegetal	0,7008	7°
O	Fluido O	sintético	0,7988	2°

Fonte: Autoria própria (2021)

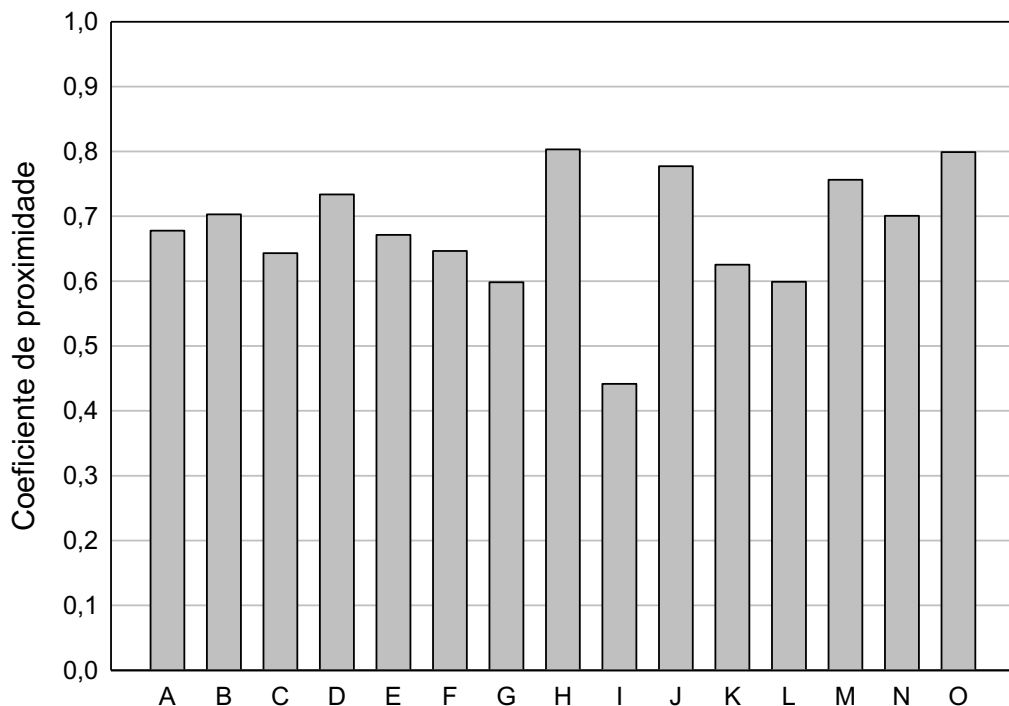


Figura 8 - Gráfico condição 1, peso 60-40%, avanço de 0,05 mm/dente
Fonte: Autoria própria (2021)

A segunda condição analisada foi para um avanço de 0,15 mm/dente e 12000 RPM, conforme Tabela 13 e Figura 9.

Tabela 13 - Condição 2, peso 60-40% e avanço de 0,15 mm/dente

Índice	Fluido	Natureza	Coefficiente	Ranking
A	Fluido A	semissintético	0,6391	8°
B	Fluido B	semissintético	0,6723	6°
C	Fluido C	semissintético	0,6205	11°
D	Fluido D	sintético	0,7040	4°
E	Fluido E	sintético	0,6343	9°
F	Fluido F	semissintético	0,6334	10°
G	Fluido G	semissintético	0,5775	14°
H	Fluido H	vegetal	0,8127	1°
I	Fluido I	sintético	0,4370	15°
J	Fluido J	semissintético	0,7242	3°
K	Fluido K	vegetal	0,6044	12°
L	Fluido L	sintético	0,5579	13°
M	Fluido M	vegetal	0,7030	5°
N	Fluido N	vegetal	0,6490	7°
O	Fluido O	sintético	0,7276	2°

Fonte: Autoria própria (2021)

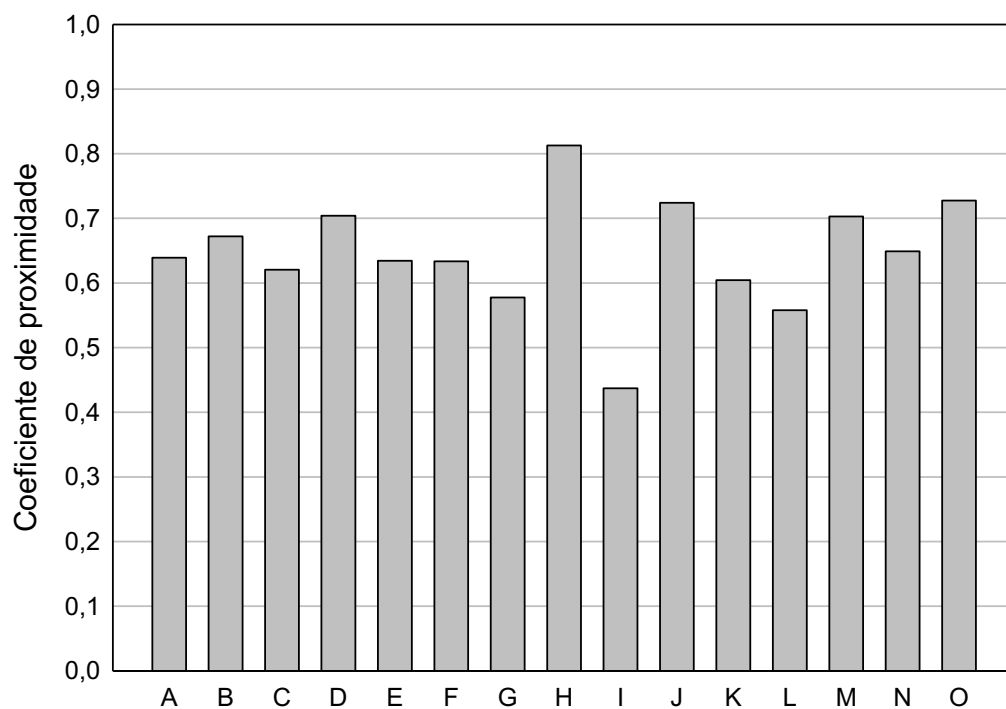


Figura 9 - Gráfico condição 2, peso 60-40% e avanço de 0,15 mm/dente
Fonte: Autoria própria (2021)

A terceira condição analisada foi para um avanço de 0,30 mm/dente e 12000 RPM, conforme indicado na Tabela 14 e Figura 10.

Tabela 14 - Condição 3, peso 60-40% e avanço de 0,30 mm/dente

Índice	Fluido	Natureza	Coefficiente	Ranking
A	Fluido A	semissintético	0,6314	8°
B	Fluido B	semissintético	0,6916	3°
C	Fluido C	semissintético	0,6046	11°
D	Fluido D	sintético	0,6800	5°
E	Fluido E	sintético	0,6295	9°
F	Fluido F	semissintético	0,5955	12°
G	Fluido G	semissintético	0,5919	13°
H	Fluido H	vegetal	0,8163	1°
I	Fluido I	sintético	0,4271	15°
J	Fluido J	semissintético	0,6862	4°
K	Fluido K	vegetal	0,6228	10°
L	Fluido L	sintético	0,5480	14°
M	Fluido M	vegetal	0,6666	6°
N	Fluido N	vegetal	0,6433	7°
O	Fluido O	sintético	0,7099	2°

Fonte: Autoria própria (2021)

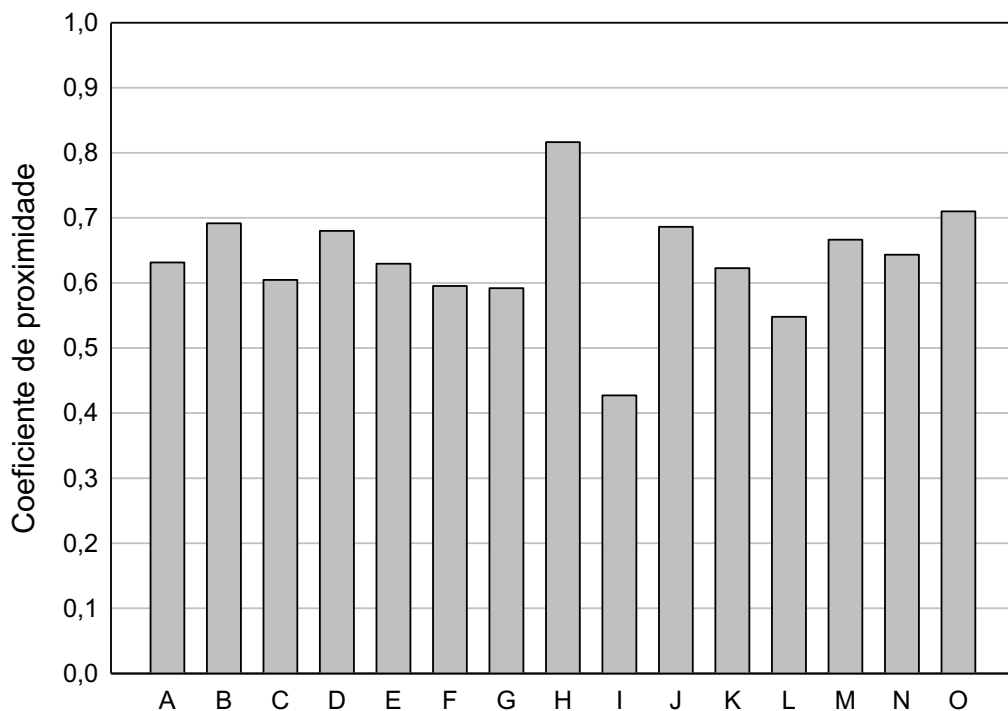


Figura 10 - Gráfico condição 3, peso 60-40% e avanço de 0,30 mm/dente
Fonte: Autoria própria (2021)

4.3.2 Ponderação de acordo com o método da entropia

Diferente do método da ponderação de acordo com critérios mais importantes, o método da entropia não leva em conta a subjetividade da escolha do peso para cada critério, haja vista que os pesos são determinados por fórmulas a partir da

normalização de cada critério, conforme mostrado anteriormente. Os pesos calculados para critério estão representados na Tabela 15.

Tabela 15 - Pesos dos critérios segundo método da entropia

Teste	Atributos	Peso	Desejável/ Ideal	Valor
Desbaste	Cond 1 RPM 12000 Av 0,05/lâmina (resultado M3)	0,0065	MÁXIMO	1
	Cond 2 RPM 12000 Av 0,15/lâmina (resultado M3)	0,0182	MÁXIMO	1
	Cond 3 RPM 12000 Av 0,3/lâmina (resultado M3)	0,0415	MÁXIMO	1
Potência desbaste	Condição 1	0,0080	MÍNIMO	0
Potência desbaste	Condição 2	0,0239	MÍNIMO	0
Potência desbaste	Condição 3	0,0243	MÍNIMO	0
Acabamento Condição na matriz	A74 v_c 1885, $f_z = 0,2$	0,1092	MÍNIMO	0
	A75 v_c 1885, $f_z = 0,25$	0,1212	MÍNIMO	0
	A76 v_c 1885, $f_z = 0,3$	0,1143	MÍNIMO	0
Peça estrutural	Erro forma	0,0139	MÍNIMO	0
	Potência	0,0053	MÍNIMO	0
Peça crista (parede fina)	Erro forma	0,0128	MÍNIMO	0
	Rugosidade	0,1521	MÍNIMO	0
	Potência	0,0060	MÍNIMO	0
Microbiologia	Fungos	0,0000	MÍNIMO	1
	Bactérias	0,1770	MÍNIMO	0
	Fubá (dias)	0,0021	MÁXIMO	1
Reichert	Área de desgaste	0,0042	MÍNIMO	0
	Molhabilidade (Ângulo)	0,0014	MÍNIMO	0
	Detergência	0,0269	MÁXIMO	1
	Temperatura °C	0,0027	MÍNIMO	0
	Forma de desgaste	0,0347	MÁXIMO	1
Água	Espuma	0,0233	MÍNIMO	0
	Corrosão	0,0000	MÁXIMO	1
	Elementos inorgânicos proibidos	0,0000	MÍNIMO	1
	Turbidez	0,0071	MÍNIMO	0
	pH	0,0000	MÁXIMO	1
	Alcalinidade	0,0001	MÁXIMO	1
	Cloretos	0,0021	MÍNIMO	0
	Dureza total	0,0101	MÁXIMO	1
	Condutividade	0,0001	MÁXIMO	1
	Sólidos totais	0,1243	MÍNIMO	0
Emulsão	Concentração média	0,0009	MÍNIMO	0
	Índice de refração	0,0032	MÍNIMO	0
	Estabilidade	0,0000	MÁXIMO	1
	Acidez	0,0002	MÁXIMO	1
	Névoa	0,0269	MÁXIMO	1
	Manchamento	0,0000	MÍNIMO	0
	Natureza	0,0034	MÁXIMO	1

Fonte: Autoria própria (2021)

Aplicou-se o método para a condição 1 de desbaste utilizando método de Entropia para determinação dos pesos, avanço 0,05 mm/dente e 12000 RPM e o resultado consta na Tabela 16 e Figura 11.

Tabela 16 - Condição 1, peso método entropia, avanço de 0,05 mm/dente

Índice	Fluido	Natureza	Coefficiente	Ranking
A	Fluido A	semissintético	0,9414	8°
B	Fluido B	semissintético	0,9543	4°
C	Fluido C	semissintético	0,9436	7°
D	Fluido D	sintético	0,9601	3°
E	Fluido E	sintético	0,7194	12°
F	Fluido F	semissintético	0,8553	9°
G	Fluido G	semissintético	0,6210	14°
H	Fluido H	vegetal	0,9725	1°
I	Fluido I	sintético	0,4375	15°
J	Fluido J	semissintético	0,8339	10°
K	Fluido K	vegetal	0,7589	11°
L	Fluido L	sintético	0,6746	13°
M	Fluido M	vegetal	0,9517	5°
N	Fluido N	vegetal	0,9463	6°
O	Fluido O	sintético	0,9636	2°

Fonte: Autoria própria (2021)

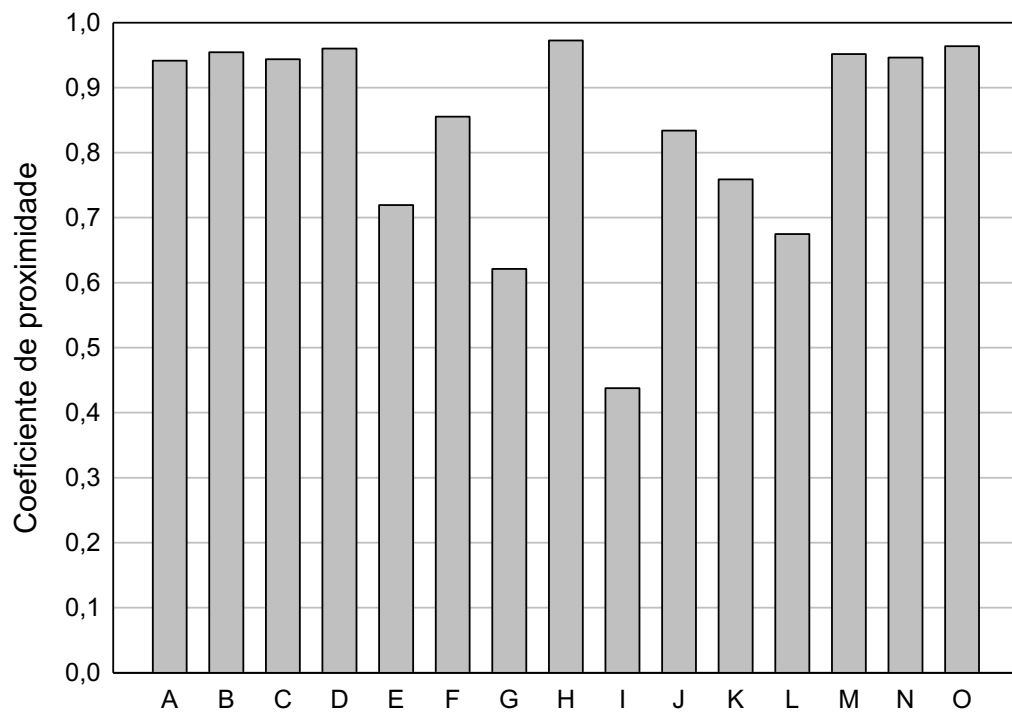


Figura 11 - Gráfico condição 1, peso método entropia, avanço de 0,05 mm/dente
Fonte: Autoria própria (2021)

De semelhante modo, aplicou-se o método para a condição 2 de desgaste utilizando método de Entropia, avanço 0,15 mm/dente e 12000 RPM e o resultado consta na Tabela 17 e Figura 12.

Tabela 17 - Condição 2, peso método entropia, avanço de 0,15 mm/dente

Índice	Fluido	Natureza	Coefficiente	Ranking
A	Fluido A	semissintético	0,9324	8°
B	Fluido B	semissintético	0,9452	4°
C	Fluido C	semissintético	0,9348	6°
D	Fluido D	sintético	0,9514	2°
E	Fluido E	sintético	0,7184	12°
F	Fluido F	semissintético	0,8523	9°
G	Fluido G	semissintético	0,6205	14°
H	Fluido H	vegetal	0,9704	1°
I	Fluido I	sintético	0,4377	15°
J	Fluido J	semissintético	0,8315	10°
K	Fluido K	vegetal	0,7558	11°
L	Fluido L	sintético	0,6727	13°
M	Fluido M	vegetal	0,9367	5°
N	Fluido N	vegetal	0,9330	7°
O	Fluido O	sintético	0,9509	3°

Fonte: Autoria própria (2021)

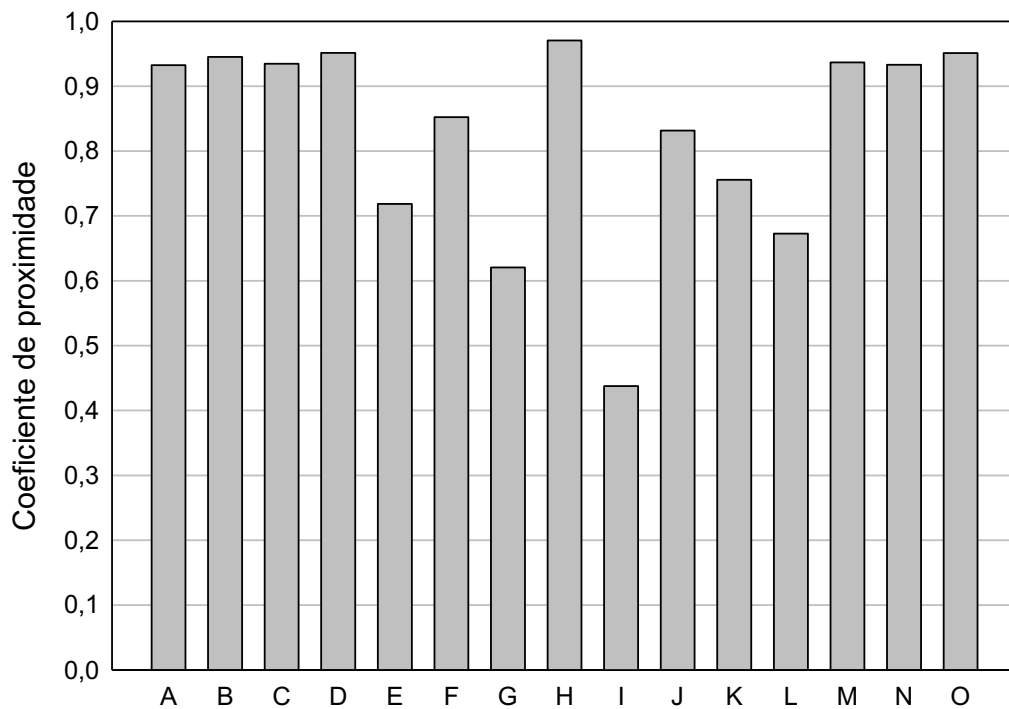


Figura 12 - Gráfico condição 2, peso método entropia, avanço de 0,15 mm/dente
Fonte: Autoria própria (2021)

Por fim, aplicou-se o método para a condição 3 de desgaste, avanço de 0,30 mm/dente conforme Tabela 18 e Figura 13.

Tabela 18 - Condição 3, peso método entropia, avanço de 0,30 mm/dente

Índice	Fluido	Natureza	Coefficiente	Ranking
A	Fluido A	semissintético	0,8987	6°
B	Fluido B	semissintético	0,9317	2°
C	Fluido C	semissintético	0,8962	7°
D	Fluido D	sintético	0,9125	3°
E	Fluido E	sintético	0,7141	12°
F	Fluido F	semissintético	0,8297	9°
G	Fluido G	semissintético	0,6202	14°
H	Fluido H	vegetal	0,9712	1°
I	Fluido I	sintético	0,4356	15°
J	Fluido J	semissintético	0,8155	10°
K	Fluido K	vegetal	0,7532	11°
L	Fluido L	sintético	0,6668	13°
M	Fluido M	vegetal	0,9001	5°
N	Fluido N	vegetal	0,8905	8°
O	Fluido O	sintético	0,9097	4°

Fonte: Autoria própria (2021)

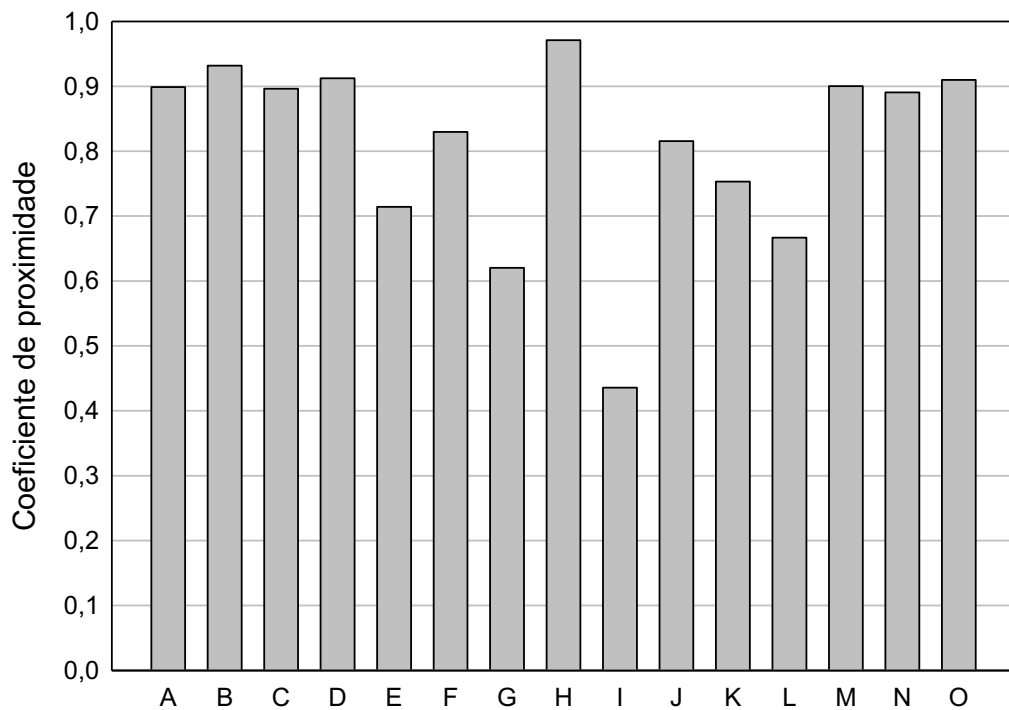


Figura 13 - Gráfico condição 3, peso método entropia, avanço de 0,30 mm/dente

Fonte: Autoria própria (2021)

Os resultados obtidos na aplicação do método TOPSIS para as três condições de desgaste, avanço de 0,05; 0,15 e 0,30 mm/dente, apresentaram o Fluido vegetal H, como o fluido mais próximo do ideal para os critérios apresentados. O resultado nos testes utilizando o sistema de peso pelo método da entropia garantiu que, de fato o fluido apresenta melhor performance que os demais com vista nos aspectos gerais, uma vez que o método não utiliza critérios subjetivos, como o sistema de pesos no qual foi arbitrado os pesos 60-40%. Entretanto, o método não leva em consideração no resultado critérios que talvez sejam interessantes para a finalidade e apresentem uma relevância maior na análise. É importante salientar que na maior parte dos problemas que motivaram a aplicação de um método de decisão apresentem critérios que possuem importância maior na análise, e, portanto, devem se sobressair nos pesos utilizados. O método híbrido AHP-TOPSIS leva em consideração o julgamento de cada critério em relação aos demais para encontrar um peso que realmente ressalte os pontos importantes da análise. Nesse trabalho, porém, o método AHP não foi utilizado na construção dos pesos pois em muitos critérios a comparação entre eles é muito sensível e de difícil mensuração, e como o método exige a comparação de cada critério com os demais aos pares, a tarefa se tornaria extremamente trabalhosa e com muitos fatores de subjetividade. Outro fator crucial para a aplicação do método AHP é o conhecimento aprofundado sobre cada critério em relação aos demais, sendo que a falta dele pode tornar a análise errada e apresentar um alvo incorreto.

5 CONCLUSÃO

Os métodos de análise multicritério datam do início dos anos 80 e são usados para as mais variadas aplicações. Diante da grande quantidade de métodos foi necessária uma seleção dos mais comuns na literatura e dos métodos híbridos mais aplicados na seleção de materiais. A partir da seleção aplicou-se o método AHP e identificou-se que o método TOPSIS seria o mais apropriado para a definição do melhor fluido com base nas propriedades testadas.

A aplicação do método TOPSIS levou em consideração duas metodologias diferentes para sistema de peso – método da Entropia e ponderação de acordo com o julgamento das propriedades mais importantes – e concluiu-se que para ambas metodologias o Fluido vegetal H é o mais indicado para usinagem da liga de alumínio da série 7XXX, classe AA 7050 dentre as opções analisadas. Além disso, quando as diferenças entre as propriedades não são sutis, o método de ponderação de acordo com o julgamento das propriedades pode ser mais interessante por dar mais importância aos critérios que devem ser priorizados no processo de escolha.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, P. S. DE. **Lubrificação Industrial - Tipos e métodos de lubrificação**. 1. ed. [s.l.] Saraiva Educação S.A., 2017.

BAGHLA, S.; BANSAL, S. Effect of normalization techniques in VIKOR method for network selection in heterogeneous networks. 2 set. 2015.

BRIOZO, R. A.; MUSETTI, M. A. Método multicritério de tomada de decisão: aplicação ao caso da localização espacial de uma Unidade de Pronto Atendimento – UPA 24 h. **Gestão & Produção**, v. 22, n. 4, p. 805–819, 29 set. 2015.

CASTRO, D.; SILVA PARREIRAS, F. A Review on Multi-Criteria Decision-Making for Energy Efficiency in Automotive Engineering. **Applied Computing and Informatics**, 1 abr. 2018.

CHANES DE SOUZA, M. et al. Use of Jatropha and Moringa oils for lubricants: Metalworking fluids more environmental-friendly. **Industrial Crops and Products**, v. 129, p. 594–603, 1 mar. 2019.

CIMM. **Qualidades e propriedades desejáveis nos fluidos de corte - Aditivos | Usinagem** | CIMM. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/4831-qualidades-e-propriedades-desejaveis-nos-fluidos-de-corte-aditivos>. Acesso em: 3 set. 2020.

COLSON, G.; DE BRUYN, C. Models and methods in multiple objectives decision making. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 12, n. 10, p. 1201–1211, 1 jan. 1989.

DE LISBOA, F. C. Fluidos de corte: uma abordagem geral e novas tendências. **Fluidos de corte: uma abordagem geral e novas tendências**, p. 16, 2013.

DESHPANDE, S.; DESHPANDE, Y. A Review on Cooling Systems Used in Machining Processes. **Materials Today: Proceedings**, 9th International Conference of Materials Processing and Characterization, ICMPC-2019. v. 18, p. 5019–5031, 1 jan. 2019.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 9 ed. ed. [s.l.] Artliber, 2014.

FARAHANI, R. Z.; STEADIESEIFI, M.; ASGARI, N. Multiple criteria facility location problems: A survey. **Applied Mathematical Modelling**, v. 34, n. 7, p. 1689–1709, 1 jul. 2010.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. [s.l.] Editora Edgard Blücher, 1977.

GARSDIE, M. **Lubricants demand worldwide 2019**. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/411616/lubricants-demand-worldwide/>>. Acesso em: 6 out. 2020.

JAHAN, A.; EDWARDS, K. L. VIKOR method for material selection problems with interval numbers and target-based criteria. **Materials & Design**, v. 47, p. 759–765, 1 maio 2013.

JEE, D.-H.; KANG, K.-J. A method for optimal material selection aided with decision making theory. **Materials & Design**, v. 21, n. 3, p. 199–206, 1 jun. 2000.

K, D. **Top 5 advantages and disadvantages of Decision Tree Algorithm**. Disponível em: <<https://dhirajkumarblog.medium.com/top-5-advantages-and-disadvantages-of-decision-tree-algorithm-428ebd199d9a>>. Acesso em: 22 jul. 2021.

KIMINAMI, C. S.; CASTRO, W. B. DE; OLIVEIRA, M. F. DE. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. [s.l.] Editora Blucher, 2013.

LIU, J. J. H.; TZENG, G.-H. Comments on “Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: an overview”. **Technological and Economic Development of Economy**, v. 18, n. 4, p. 672–695, 20 dez. 2012.

LOKEN, E. **Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning models** | Request PDF. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/223219511_Use_of_multicriteria_decision_analysis_methods_for_energy_planning_models>. Acesso em: 10 set. 2020.

Lutif, S. Y. S., Souza, M. C., Gonçalves, J. F. de S., Cardoso, K. P., & Gomes, J. de O. (2015). Comportamento do óleo de monringa em análises de lubrificação utilizando tribometro Reichert test. **Revista Tecnológica**, 257-264. Disponível em: <<https://doi.org/10.4025/revtecnol.v0i0.26071>>. Acesso em: 23 jul. 2021.

MACHADO, Á. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. [s.l.] Blucher, 2011.

MADIĆ, M.; RADOVANOVIĆ, M.; MANIĆ, M. Application of the ROV method for the selection of cutting fluids. **Decision Science Letters**, v. 5, n. 2, p. 245–254, 2016.

MARANHÃO, C. **TOPSIS VERSUS AHP: MÉTODOS MULTICRITÉRIO APLICADOS EM UM ESTUDO DE CASO**. Monografia de Final de Curso—[s.l.] PUC/RIO, 22 dez. 2016.

MARDANI, A. et al. Multiple Criteria Decision Making Techniques and Its Applications—A Review of the Literature from 2000 to 2014. **Ekonomika Istraživanja / Economic Research**, v. 28, 5 out. 2015.

MIRJAT, N. et al. Multi-Criteria Analysis of Electricity Generation Scenarios for Sustainable Energy Planning in Pakistan. **Energies**, v. 11, p. 757, 27 mar. 2018.

MOUSAVI-NASAB, S. H.; SOTOUDEH-ANVARI, A. A comprehensive MCDM-based approach using TOPSIS, COPRAS and DEA as an auxiliary tool for material selection problems. **Materials & Design**, v. 121, p. 237–253, 5 maio 2017.

NASUTION, A. R. et al. Effect of vegetable oils as cutting fluid on wear of carbide cutting tool insert in a milling process. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 796, p. 012001, 7 abr. 2020.

PACHECO, A. **TOPSIS - Um algoritmo de tomada de decisão - Computação Inteligente**. Disponível em: <<http://computacaointeligente.com.br/algoritmos/TOPSIS-tomada-de-decisao/>>. Acesso em: 23 jul. 2021.

PLEWA, M.; RAJAGOPALAN, N.; WAGNER, E. D. Greening Metalworking Fluids Purchasing Using Multicriteria Methodologies. mar. 2015.

RIBEIRO JUNIOR, Elson Heraldo; PENTEADO, Rosangela de Fatima Stankowitz. **Modelo para formatação de trabalhos acadêmicos da UTFPR**. Ponta Grossa, 2011. (Apostila).

SAARIKOSKI, H. et al. Multi-criteria decision analysis (MCDA) in ecosystem service valuation. **Multi-criteria decision analysis (MCDA) in ecosystem service valuation**, p. 6, 2016.

SAATY, T. L. The Analytic Network Process. In: **Decision Making with the Analytic Network Process**. International Series in Operations Research & Management Science. [s.l.] Springer US, 2006. v. 95p. 1–26.

SAATY, T. L. Analytic Heirarchy Process. In: **Wiley StatsRef: Statistics Reference Online**. [s.l.] American Cancer Society, 2014.

SABAEI, D.; ERKOYUNCU, J.; ROY, R. A Review of Multi-criteria Decision Making Methods for Enhanced Maintenance Delivery. **Procedia CIRP**, CIRPe 2015 - Understanding the life cycle implications of manufacturing. v. 37, p. 30–35, 1 jan. 2015.

SANDVIK. **Aspectos da refrigeração**. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com:443/pt-pt/knowledge/machine-tooling-solutions/tooling-considerations/pages/coolant.aspx>>. Acesso em: 12 out. 2020.

SINGH, A. Major MCDM Techniques and their application-A Review. **IOSR Journal of Engineering**, v. 4, p. 15–25, 1 maio 2014.

SOUZA, M. C. DE et al. Tribological evaluation of the Jatropha and Tung-based oils as bio-lubricants on Al-7050-T7451 alloy. **Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 1 jun. 2019.

SUN, X. et al. Intelligent Multicriteria Decision Support System for Systems Design. **Journal of Aircraft**, v. 51, n. 1, p. 216–225, jan. 2014.

SWENSON, D. W. H. **Probability Distribution Functions**, 2018. Disponível em: <<http://www.cchem.berkeley.edu/chem120a>>. Acesso em: 16 set. 2020

VAF AEI, N.; RIBEIRO, R. A.; CAMARINHA-MATOS, L. M. Normalization Techniques for Multi-Criteria Decision Making: Analytical Hierarchy Process Case Study. In:

CAMARINHA-MATOS, L. M. et al. (Eds.). . **Technological Innovation for Cyber-Physical Systems**. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Cham: Springer International Publishing, 2016. v. 470p. 261–269.

VINCKE, P. Multicriteria Decision-Aid. **IMA Journal of Management Mathematics**, v. 4, n. 3, p. 301–302, 1 jan. 1992.

VINOGRADOVA, I. Multi-Attribute Decision-Making Methods as a Part of Mathematical Optimization. **Mathematics**, v. 7, n. 10, p. 915, out. 2019.

WANG, P.; ZHU, Z.; WANG, Y. A novel hybrid MCDM model combining the SAW, TOPSIS and GRA methods based on experimental design. **Information Sciences**, v. 345, p. 27–45, 1 jun. 2016.

YAZDI, A. K. et al. Oil project selection in Iran: A hybrid MADM approach in an uncertain environment. **Applied Soft Computing**, v. 88, p. 106066, 1 mar. 2020.

ZEILMANN, R. P. et al. Redução da utilização de fluidos de corte: uma abordagem ecológica na gestão de processos de usinagem. p. 8, 2010.