

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E  
SISTEMAS

**RAFAEL DAROS**

**2SM: MÉTODO DE TRIAGEM MULTICRITÉRIO LINGUÍSTICO PARA  
APLICAÇÃO NO PROCESSO DE SELEÇÃO DE MATERIAIS**

**PATO BRANCO**

**2021**

RAFAEL DAROS

**2SM: MÉTODO DE TRIAGEM MULTICRITÉRIO LINGUÍSTICO PARA  
APLICAÇÃO NO PROCESSO DE SELEÇÃO DE MATERIAIS**

**2SM: multi-criteria linguistic screening method for application in the material  
selection process**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Gestão dos Sistemas Produtivos. Orientador: Prof. Dr. Dalmarino Setti

**PATO BRANCO**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite apenas que outros façam download dos trabalhos licenciados e os compartilhem desde que atribuam crédito ao autor, mas sem que possam alterá-los de nenhuma forma ou utilizá-los para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Pato Branco



---

RAFAEL DAROS

**2SM: MÉTODO DE TRIAGEM MULTICRITÉRIO LINGUÍSTICO PARA APLICAÇÃO NO PROCESSO DE SELEÇÃO DE MATERIAIS**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia De Produção E Sistemas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Gestão Dos Sistemas Produtivos.

Data de aprovação: 31 de Agosto de 2021

Prof Dalmarino Setti, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Fabiano Oscar Drozda, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof Gilson Adamczuk Oliveira, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 31/08/2021.

À minha família, em especial à minha namorada Karine  
pelo apoio incondicional

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela vida e todas as inúmeras oportunidades que me proporcionou.

Ao meu orientador, Dr. Dalmarino Setti, por acreditar no meu potencial, por seu profissionalismo, empenho e disponibilidade para o desenvolvimento dessa dissertação.

Ao professor e membro da banca Dr. Gilson Adamczuk Oliveira, por ter incentivado e acreditado nesta pesquisa, pelas orientações, contribuições e análise crítica.

Ao membro externo da banca Dr. Fabiano Oscar Drozda, pelas contribuições e sugestões para melhoria da pesquisa.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela oportunidade.

Aos demais professores e servidores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco.

À Fersul Manufaturados de Ferro, em especial Eleomar Nichelle e Evandro Neri, pelo incentivo, apoio e compreensão.

## RESUMO

Em razão da existência de um grande número de materiais, combinada com complexas relações entre os parâmetros envolvidos, a seleção de materiais tem sido desenvolvida por diferentes métodos e abordagens. Apesar dessa diversidade, as etapas de triagem e classificação são comuns a praticamente todos esses métodos e abordagens. Na etapa de triagem são definidos critérios de filtragem e eliminação dos materiais inadequados à aplicação, a fim de que sejam habilitados apenas aqueles com alto potencial de utilização, reduzindo o conjunto de materiais candidatos para a etapa de classificação. Um método de triagem deve ser capaz de avaliar um grande número de materiais de forma rápida e precisa. Este trabalho tem por objetivo desenvolver um método multicritério linguístico (2SM) para a etapa de triagem do processo de seleção de materiais, com a finalidade de tornar o processo de seleção mais ágil e preciso. A metodologia utilizada no desenvolvimento da dissertação consistiu das seguintes etapas: revisão sistemática de literatura sobre métodos de triagem no processo de seleção de materiais; elaboração de um banco de dados com materiais alternativos e suas respectivas propriedades; criação de um procedimento para agrupar materiais similares em classes para cada propriedade; foi estabelecido um método para associar as classes com variáveis linguísticas *2-tuple* e gerar uma escala linguística para cada propriedade dos materiais; foi aplicado o método de triagem multicritério linguístico na solução de problemas de seleção de materiais da literatura. Os resultados obtidos com a aplicação do método 2SM em três estudos de caso, resultaram ao todo em 82 materiais candidatos, desses, 19 corresponderam aos materiais triados pelos trabalhos de seleção de um porta ferramentas, de uma estrutura de bicicleta e de um volante de inércia, dos quais, três ficaram classificados entre as cinco primeiras colocações ao passarem pela etapa de classificação juntamente com os materiais candidatos triados pelo método 2SM, assim correspondendo a 12% de representatividade para as cinco primeiras colocações, enquanto que o método 2SM resultou em 22 materiais ocupando as cinco primeiras colocações, correspondendo a 88% de representatividade. Com isso, e, deste modo, evidenciando a sua eficácia. Além disso, foi possível verificar que o método proposto apresentou rapidez no processamento e maior precisão para a triagem de materiais candidatos se comparado aos métodos de triagem utilizados nos estudos de caso analisados.

Palavras-chave: Seleção de Materiais. Triagem. Multicritério Linguístico.

## ABSTRACT

Due to the existence of many materials, combined with complex relationships between the parameters involved, material selection has been developed by different methods and approaches. Despite this diversity, the screening and sorting steps are common to virtually all of these methods and approaches. In the screening stage, criteria are defined for filtering and eliminating unsuitable materials for the application. Only those with high potential for use are enabled, reducing the pool of candidate materials for the classification stage. A screening method must be able to evaluate a large number of materials quickly and accurately. This work aims to develop a linguistic multicriteria method (2SM) for the screening step of the material selection process, to make the material selection process more agile and accurate. The methodology used in the development of the dissertation consisted of the following steps: a systematic literature review on screening methods in the process of material selection; elaboration of a database with alternative materials and their respective properties; creation of a procedure to group similar materials into classes for each property; a method was established to associate the classes with linguistic 2-tuple variables and to generate a linguistic scale for each property of the materials; the linguistic multicriteria screening method was applied to solve material selection problems in the literature. The results obtained by applying the 2SM method in three case studies resulted in a total of 82 candidate materials; of these, 19 correspond to the materials screened by the selected works for a tool holder, a bicycle frame, and a flywheel, of which, three were classified among the first five positions when they went through the classification step together with the candidate materials screened by the 2SM method, thus corresponding to 12% of representativeness for the first five positions. In contrast, the 2SM method resulted in 22 materials occupying the first five positions, corresponding to 88% representativeness—this way, evidencing its effectiveness. In addition, it was possible to verify that the proposed method presented speed in processing and greater accuracy for the screening of candidate materials compared to the screening methods used in the case studies analyzed.

Keywords: Materials Selection. Screening. Linguistic Multi-criteria.

## LISTA DE ABREVIATURAS

*ProKnow-C - Knowledge Development Process – Constructivist*

PB – Portfólio bibliográfico

E – Módulo de elasticidade

EL – Extremamente baixa

UL – Ultra baixa

VL – Muito baixa

L – Baixa

ML – Média baixa

M – Média

MH – Média alta

H – Alta

VH – Muito alta

UH – Ultra alta

EH – Extremamente Alta



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Eixos de pesquisa e palavras-chave para busca nas bases de dados .....	20
Figura 2 – Processo estruturado de busca de artigos alinhados ao tema da pesquisa .....	21
Figura 3 – Método de seleção de materiais definido por Ashby (2012) .....	25
Figura 4 – Processo de triagem de materiais candidatos .....	27
Figura 5 – Classificação dos métodos de triagem .....	28
Figura 6 – Carta de seleção relacionando as propriedades módulo de Young (GPa), ou módulo de elasticidade, com massa específica ( $\text{kg/m}^3$ ).....	29
Figura 7 – Exemplo de representação linguística 2-tuple .....	39
Figura 8 – Fluxograma do método 2SM .....	41
Figura 9 – Tela principal de utilização do método 2SM.....	47
Figura 10 – Tela do método 2SM para aplicação das restrições linguísticas e objetivos .....	48

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Artigos do portfólio bibliográfico sobre o tema métodos de triagem inicial no processo de seleção de materiais .....	22
Quadro 2 – Artigos do portfólio bibliográfico que utilizam os métodos de Ashby e Cebon (1993) .....	30
Quadro 3 – Artigos do portfólio bibliográfico que utilizam métodos de sistemas baseados em conhecimento .....	31
Quadro 4 – Materiais candidatos para fabricação de um <i>Tool Holder</i> , definidos pelo método 2SM .....	51
Quadro 5 – Materiais candidatos para fabricação de um <i>bicycle frame</i> , definidos pelo método 2SM .....	58
Quadro 6 – Materiais candidatos para fabricação de um volante de inércia, definidos pelo método 2SM .....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Associação de variáveis linguísticas.....	44
Tabela 2 – Propriedades dos materiais candidatos do estudo de caso de um porta-ferramentas e sua associação linguística com o método 2SM.....	50
Tabela 3 – Propriedades e variáveis linguísticas utilizadas para aplicar o método 2SM no estudo de caso de um <i>Tool Holder</i> .....	51
Tabela 4 – Classificação das alternativas do estudo de caso de um <i>Tool Holder</i> .....	53
Tabela 5 – Comparativo entre materiais candidatos e ranking.....	53
Tabela 6 – Materiais que ocupam as 5 melhores classificações pelos métodos TOPSIS ou VIKOR .....	55
Tabela 7 – Propriedades dos materiais candidatos do estudo de caso de um porta-ferramentas e sua associação linguística com o método 2SM .....	56
Tabela 8 – Propriedades, intensidade linguística e critérios utilizados para aplicar o método 2SM no estudo de caso de um <i>bicycle frame</i> .....	57
Tabela 9 – Comparativo entre materiais candidatos do estudo de Maleque e Dyuti (2010) com os do método 2SM e classificação .....	59
Tabela 10 – Classificação das alternativas do estudo de caso de um <i>bicycle frame</i> .....	60
Tabela 11 – Propriedades dos materiais candidatos do estudo de caso de um volante de inércia e sua associação linguística com o método 2SM.....	61
Tabela 12 – Propriedades, intensidade linguística e critérios utilizados para aplicar o método 2SM no estudo de caso de um volante de inércia .....	62
Tabela 13 – Comparativo entre materiais candidatos e ranking do estudo de Purohit e Ramachandran (2015) com método 2SM.....	63
Tabela 14 – Classificação das alternativas do estudo de caso de um volante de inércia .....	64
Tabela 15 – Comparativo entre materiais candidatos e ranking do estudo de Purohit e Ramachandran (2015) com método 2SM, incluindo custo como critério de minimização .....	65

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS.....	14
1.1.1	Objetivo Geral.....	14
1.1.2	Objetivos Específicos.....	14
1.2	JUSTIFICATIVA.....	14
1.3	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	16
1.4	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	17
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>19</b>
2.1	PROCEDIMENTOS PARA A REVISÃO DA LITERATURA.....	19
2.1.1	Seleção do Portfólio Bibliográfico Baseado na Metodologia <i>Proknow-C</i> .....	19
2.2	SELEÇÃO DE MATERIAIS.....	24
2.3	MÉTODOS DE TRIAGEM.....	26
2.3.1	Método Gráfico.....	28
2.3.2	Métodos de Inteligência Artificial – Sistemas Baseados no Conhecimento (KBS).....	31
2.3.3	Método de Triagem Conjuntiva.....	33
2.4	MEDIDAS DESCRITIVAS.....	35
2.5	VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS.....	37
2.6	MODELO LINGUÍSTICO 2-TUPLE.....	38
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>41</b>
3.1	METODO DE TRIAGEM LINGUÍSTICO 2SM PARA O PROCESSO DE SELEÇÃO DE MATERIAIS.....	41
3.1.1	Base de Dados para Desenvolvimento do Método 2SM.....	42
3.1.2	Desenvolvimento do Método 2SM.....	43
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO E DISCUSSÃO DO MÉTODO 2SM.....</b>	<b>49</b>
4.1	SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA UM PORTA-FERRAMENTAS ( <i>TOOL HOLDER</i> ).....	49
4.2	SELEÇÃO DE MATERIAL PARA UM ESTRUTURA DE BICICLETA ( <i>BICYCLE FRAME</i> ).....	55
4.3	SELEÇÃO DE MATERIAL PARA UM VOLANTE DE INÉRCIA ( <i>FLYWHEEL</i> )....	60
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>68</b>
	<b>APÊNDICE – Equações utilizadas para classificar os materiais candidatos.....</b>	<b>77</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A sociedade se encontra em constante evolução, de modo que as indústrias e empresas do setor produtivo necessitam de uma constante inovação de seus sistemas produtivos para atender a necessidade de desenvolvimento de novos produtos, a fim de satisfazer as expectativas dos consumidores (HAEFNER *et al.*, 2021). Desse modo, é necessário o desenvolvimento de novas alternativas de materiais buscando a otimização e competitividade no mercado de consumo.

A seleção de materiais se trata de uma etapa a ser realizada nos estágios iniciais do desenvolvimento de produtos (SAPUAN *et al.*, 2011), pois apresenta importância fundamental em todos os processos de fabricação, inclusive no projeto de produtos (ZINDANI *et al.*, 2020). Desse modo, Tambouratzis *et al.* (2014), afirmam que a seleção de materiais se trata de um processo crucial em numerosas aplicações industriais.

Contudo, o processo de seleção de materiais é uma tarefa desafiadora, pois estima-se que existam mais de 160 mil materiais no mundo (FARAG, 2002; ASHBY *et al.* 2018; ASHBY, 2012), incluindo ligas metálicas e materiais de engenharia não metálicos, como plásticos, cerâmicas e vidros, materiais compostos e semicondutores (JAHAN *et al.*, 2010; FARAG, 2015). Esse grande número de opções de materiais, juntamente com as complexas relações entre os diferentes parâmetros de seleção, frequentemente, dificulta a seleção de um material para um determinado componente (FARAG, 2002), levando profissionais ao enfrentamento de uma atividade de tomada de decisão complexa.

Buscando processar a grande quantidade de dados envolvidos com os processos de seleção de materiais, foram desenvolvidos vários métodos (FAYAZBAKHSI *et al.*, 2009). Dentre eles, se destaca o método gráfico de seleção de materiais, criado por Ashby (1989), em que são introduzidos gráficos de seleção de materiais e estabelecida uma avaliação sistemática para o processo. Para Tambouratzis *et al.* (2014), os métodos sistemáticos de seleção de materiais costumam ser baseados em cinco eixos, sendo eles: definição do *design* do produto; análise das propriedades do material; triagem de materiais candidatos; avaliação dos materiais candidatos e tomada de decisão; e teste de verificação. De forma semelhante, apresentam-se os modelos expressos por Chiner (1988) e Ashby (2012), que definem as etapas como sendo: tradução, triagem, classificação e documentação. Ainda, Ashby e Cebon (1993) e Jahan *et al.* (2010), expõem que a seleção de materiais também pode ser analisada por duas etapas principais, triagem e classificação.

No entanto, Jahan *et al.* (2010), afirmam que, independentemente da relação dos estágios de projeto e seleção de processos com a seleção de materiais, as etapas de triagem e classificação dos materiais candidatos são consideradas vitais para o processo de seleção de materiais. A triagem de materiais candidatos implica em realizar uma seleção aproximada de possíveis alternativas ao material de referência, definindo critérios de triagem que são utilizados para filtrar materiais inadequados com base em suas propriedades, permitindo a seleção preliminar apenas dos materiais com alto potencial para, posteriormente, serem analisados nas etapas seguintes do processo (BROEREN *et al.*, 2016). Após atingir um conjunto satisfatório de materiais potencialmente adequados, as etapas subsequentes são iniciadas com um conjunto menor de materiais candidatos do que o envolvido nas etapas preliminares (PEÇAS *et al.*, 2013).

Dentre os métodos de triagem existentes, se destacam aqueles que utilizam as cartas de seleção de materiais ou o software *Cambridge Engineering Selector* (CES), desenvolvidos por Ashby *et al.* (2008) e utilizados nos trabalhos de Maleque e Dyuti (2010), Djassemi (2012), Peças *et al.* (2013), Tambouratzis *et al.* (2014), Shah (2014), Serafini *et al.* (2015), Broeren *et al.* (2016), Alghamdy *et al.* (2019) e Yavuz (2019), e os métodos de inteligência artificial, mais especificamente, denominados sistemas baseados no conhecimento ou sistemas especialistas, que normalmente são baseados em regras SE/ENTÃO (*if/then*). Além desses, também, existem os métodos do custo por unidade de propriedade, métodos de questionário e ferramentas de seleção de materiais na seleção de produtos, conforme Jahan *et al.* (2010). Os sistemas baseados no conhecimento foram inicialmente propostos por Bullinger *et al.* (1991) e, em seguida, utilizados nos trabalhos de Chen *et al.* (1995), Sapuan e Abdalla (1998), Sapuan (2001), Buggy e Conlon (2004), Sapuan *et al.* (2011), Maleque e Arifutzzaman (2012), Ali *et al.* (2013), Qiu *et al.* (2013), Ali *et al.* (2017), Razi e Sarkari (2019).

Apesar dos inúmeros métodos disponíveis para o desenvolvimento da etapa de triagem, evidenciados na revisão sistemática de literatura, a utilização de métodos multicritério linguísticos tem sido pouco explorada. Contudo, a utilização da informação para a seleção de materiais na forma de variáveis linguísticas permite o emprego da avaliação de especialistas na etapa de triagem (SETTI *et al.*, 2020), o que pode gerar uma maior precisão no desenvolvimento dessa etapa.

Desse modo, estabelece-se a seguinte questão de pesquisa: O desenvolvimento de um método multicritério linguístico é capaz de otimizar a etapa de triagem no processo de seleção de materiais frente aos métodos já existentes?

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Diante do problema de pesquisa proposto, tem-se como objetivo geral deste trabalho, desenvolver um método multicritério linguístico para a etapa de triagem do processo de seleção de materiais, com a finalidade de tornar o processo de seleção de materiais mais ágil e preciso.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

A fim de alcançar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos: (i) realizar uma revisão sistemática de literatura sobre métodos de triagem no processo de seleção de materiais; (ii) formar um banco de dados com materiais alternativos e suas respectivas propriedades; (iii) estabelecer um procedimento para agrupar materiais similares em classes para cada propriedade; (iv) definir um método para associar as classes com variáveis linguísticas e gerar uma escala linguística para cada propriedade dos materiais; (v) desenvolver a etapa de triagem com uso de múltiplos critérios e operadores conjuntivos linguísticos; e (vi) aplicar o método de triagem multicritério linguístico na solução de problemas de seleção de materiais da literatura.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Devido a seleção de materiais apresentar importância fundamental em todos os processos de fabricação, incluindo o projeto e desenvolvimento de novos produtos, e em razão do elevado número de materiais disponíveis existentes, a seleção de materiais se mostra uma tarefa desafiadora (FARAG, 2002). Isso porque, tem a finalidade de selecionar o melhor material dentre as alternativas existentes para a fabricação de um determinado produto, influenciando diretamente no resultado final do produto obtido Ashby *et al.* (2008). Diante do exposto, segundo Papile *et al.*, (2021), a seleção de materiais deve ser um processo mais fluido, rápido e resiliente, a fim de avaliar as demandas de produção em constante mudança, além de ser capaz de permitir que as indústrias avaliem rapidamente a sua produção de acordo com as demandas sociais e ambientais. Por esse motivo, essa dissertação contribui no desenvolvimento

do processo de seleção de materiais com a introdução de um novo método de triagem linguístico.

Uma das etapas do processo de seleção de materiais é a triagem, que visa definir os materiais candidatos para as etapas posteriores do processo. Existem diversos métodos para a etapa de triagem de materiais candidatos, sendo que grande parte desses métodos utilizam operadores quantitativos para eliminar os materiais que não atendam às expectativas para determinada aplicação (JAHAN *et al.*, 2010).

No entanto, segundo Jahan *et al.* (2010), os métodos de triagem quantitativos existentes, apresentam algumas limitações, dentre os métodos e suas limitações, estão: (i) os métodos do custo por unidade de propriedade, que consideram apenas uma propriedade como a mais crítica, ignorando outras propriedades; (ii) os métodos gráficos, que limitam o sistema de decisão a apenas dois ou três critérios; (iii) os métodos de ferramentas de seleção de materiais na seleção de produtos, que conseguem traduzir apenas uma baixa porcentagem de aspectos de interação do usuário em propriedades sensoriais; (iv) os sistemas de seleção de materiais auxiliados por computador, que possuem pouco apoio à tomada de decisão, (v) os sistemas baseados no conhecimento, em que a eliciação de conhecimento é um processo difícil, além da dificuldade de manter esse sistema; (vi) os raciocínios baseados em casos não são ferramentas adequadas para classificação; e (vii) as redes neurais, que aceitam evidências anedóticas, sem dados estatisticamente relevantes para apoio e generalização implícita, não existindo nenhuma garantia de que a generalização esteja correta.

Buscando superar tais limitações, é proposto um método de triagem qualitativo, em que a triagem é classificada como um sistema auxiliado por computador, permitindo ao projetista informar critérios de corte qualitativos, tanto para a intensidade das propriedades quanto para os objetivos a serem alcançados, podendo ser de maximização ou minimização. Assim, busca-se possibilitar que o projetista atinja a superação dos vícios existentes nos métodos quantitativos, pois, ao serem utilizados critérios linguísticos, pode-se obter um número maior de materiais candidatos, possibilitando maior precisão, eficiência e agilidade no processo de seleção como um todo, já que para formar o método proposto, é utilizado um banco de dados com materiais, propriedades, suas associações linguísticas e a interação com o usuário, tudo isso ocorrendo de forma simultânea.

Ademais, Segundo Qiu *et al.* (2013), embora métodos quantitativos sejam mais precisos, esses dificultam a interação com o usuário pois conforme evidenciado por Liao (1996) os seres humanos estão sempre mais confortáveis fazendo declarações verbais imprecisas ao invés de estimativas quantitativas para expressar preferência. Assim, o desenvolvimento de um



método multicritério linguístico para a etapa de triagem tem como finalidade o estreitamento do universo de materiais disponíveis baseado em critérios definidos pelo projetista, com a consequente superação das limitações do método quantitativo. Isso porque, com a utilização de variáveis linguísticas, esses critérios podem ser definidos de forma direta, por meio da opinião dos especialistas envolvidos com o processo de seleção de materiais.

Além disso, com o desenvolvimento de um método linguístico, o processo de triagem apresentará maior eficiência (QIU *et al.*, 2013), uma vez que o método além de permitir o uso de uma linguagem de fácil entendimento para o projetista ou usuário, se utiliza de uma base de dados com um grande número de alternativas de materiais e um processamento rápido, tornando a etapa de triagem mais ágil e precisa se comparada aos processos convencionais já existentes.

Tendo em vista a importância do processo de seleção de materiais no desenvolvimento de novos produtos, para que esses atendam aos padrões mercadológicos, e, ainda, visando aprimorar, cada vez mais essa etapa, a presente pesquisa tem como tema 2SM: método de triagem multicritério linguístico para aplicação no processo de seleção de materiais. O método se mostra relevante em razão da necessidade do estabelecimento de limites no processo de seleção de materiais para que as propriedades de cada um deles possam atender aos requisitos de desempenho do produto. Estes requisitos, quando informados em dados quantitativos, podem apresentar falhas, dessa forma é preferível a utilização de critérios qualitativos para essa etapa, já que as avaliações linguísticas podem ser mais assertivas.

### 1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Como delimitação, esta pesquisa apresenta um método de triagem em que seus resultados, dependem dos materiais cadastrados no banco de dados. Para o método apresentar resultados satisfatórios, o maior número de materiais possíveis que representam o estudo de caso avaliado, devem estar cadastrados com suas propriedades relevantes para o estudo. Para este estudo, consideraram-se materiais cadastrados em bases de dados existentes, pois segundo Farag (2002), Ashby *et al.* (2018) e Ashby (2012), estima-se que existam cerca de 160 mil materiais no mundo, e a base deste estudo considerou 3.976 materiais, buscados nas bases de dados Bray (1990), MDC (2020), UL (2020), CES (2020) e MatWeb (2020).

O método proposto, considera a conversão de características quantitativas dos materiais em dados linguísticos, facilitando a interação com o usuário, neste quesito, está

delimitado à onze variáveis linguísticas, sendo que seria possível escolher outros conjuntos com qualquer número de variáveis.

#### 1.4 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Esta seção apresenta o enquadramento metodológico e o *design* da pesquisa.

Com relação à natureza, caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, pois por meio do desenvolvimento de um método para o processo de seleção de materiais visa a resolução de um problema real e específico, qual seja, a seleção de materiais de maneira ágil e precisa (OUTEIRO, 2019).

Quanto aos objetivos, esta pesquisa caracteriza-se como exploratória e descritiva. Exploratória, pois tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o tema tornando-o mais explícito (GIL, 1996). Já seu caráter descritivo, se apresenta por utilizar um processo estruturado para a seleção de um portfólio bibliográfico (PB) de artigos sobre o tema método linguístico para a triagem inicial no processo de seleção de materiais, com o objetivo de analisar criticamente o que está sendo pesquisado em relação ao tema, além de estabelecer relações entre variáveis no processo de agrupamento de materiais (GIL, 2002).

Com relação aos métodos científicos de abordagem, a pesquisa apresenta abordagem dedutiva. Quanto a abordagem do problema, este estudo se utiliza da combinação de abordagens quantitativas e qualitativas. Isso porque, um estudo qualitativo busca o entendimento de um problema de pesquisa, partindo da perspectiva de uma população envolvida, baseado na obtenção de informações específicas sobre valores, opiniões, comportamentos e contextos (MACK *et al.*, 2005). Enquanto que, nos estudos de natureza quantitativa, após o tratamento estatístico dos dados, têm-se, geralmente, a elaboração de tabelas (GIL, 1996).

Desse modo, inicialmente é feita uma análise quantitativa na fase em que aborda dados numéricos de características dos materiais para associá-los na etapa qualitativa, que se apresenta nas fases em que se utiliza de avaliações subjetivas e linguísticas, a fim de facilitar a interação com o usuário.

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, essa pesquisa enquadra-se como bibliográfica, pois foi fundamentada na exploração de estudos científicos sobre métodos de triagem. Também, enquadra-se como documental, pois o levantamento de dados de propriedades de materiais foi elaborado a partir de materiais científicos e dados históricos já existentes.

Por fim, com relação à coleta de dados, a pesquisa foi realizada a partir de dados secundários, obtidos por meio da análise dos artigos científicos selecionados para o portfólio bibliográfico. Apresentando, também, a característica operacional, pois forneceu um novo método multicritério linguístico para desenvolver a etapa de triagem do processo de seleção de materiais.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos. No Capítulo 1 foi apresentada a introdução, com a contextualização e o problema de pesquisa, os objetivos, justificativa, delimitação da pesquisa e estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 aborda a fundamentação teórica do estudo, com os procedimentos utilizados para a revisão da literatura, apresentando os principais conceitos sobre o processo de seleção de materiais, métodos de triagem inicial, medidas descritivas e variáveis linguísticas.

No Capítulo 3, a descrição do método de triagem multicritério linguístico é apresentada, e também é exposta a metodologia adotada, momento em que são abordados os procedimentos realizados para o desenvolvimento da pesquisa.

O Capítulo 4 realiza a aplicação e discussão do método proposto, analisando a seleção de materiais para um porta-ferramentas, seleção de materiais para uma estrutura de bicicleta e a seleção de materiais para um volante de inércia.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões de novos trabalhos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem o objetivo de apresentar e analisar os métodos de triagem inicial utilizados no processo de seleção de materiais, a fim de oferecer as bases da literatura para o tema em questão.

### 2.1 PROCEDIMENTOS PARA A REVISÃO DA LITERATURA

Para o processo de busca da literatura foi empregado o instrumento de intervenção utilizado para a seleção do portfólio bibliográfico (PB), denominado *Knowledge Development Process – Constructivist (ProKnow-C)*. Salienta-se que esse processo de revisão da literatura já foi utilizado em inúmeras pesquisas científicas, como nos estudos de Tasca *et al.* (2010), Bortoluzzi *et al.* (2014), Lacerda *et al.* (2012), dentre outras pesquisas de revisão de literatura. O principal objetivo desse instrumento é a construção do conhecimento sobre um fragmento da literatura científica (VALMORBIDA; ENSSLIN, 2017).

Neste estudo, utilizou-se de uma revisão sistemática de literatura, visando analisar os estudos publicados anteriormente sobre o assunto, a fim de construir conhecimento sobre os métodos de triagem inicial no processo de seleção de materiais. Tal metodologia ganha o adjetivo sistemático quando baseada em uma pergunta claramente formulada, identifica estudos relevantes, avalia sua qualidade e resume as evidências usando de metodologia explícita (KHAN *et al.*, 2003). Baseado nesse conceito, a primeira etapa da metodologia *Proknow-C* é empregada, consistindo no processo estruturado para a seleção do PB.

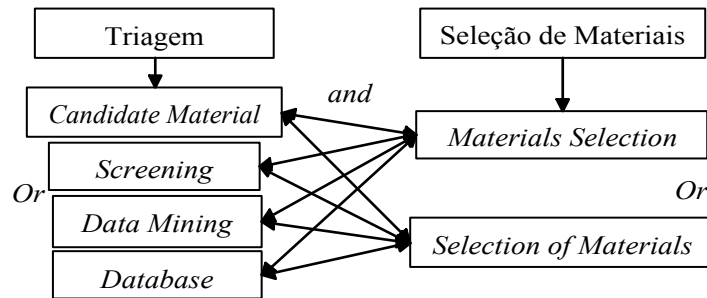
#### 2.1.1 Seleção do Portfólio Bibliográfico Baseado na Metodologia *Proknow-C*

Inicialmente, buscando a seleção dos artigos brutos de acordo com a metodologia *Proknow-C*, definem-se dois eixos de pesquisa, sendo o primeiro eixo atribuído à palavra “triagem”, abordando as seguintes palavras-chave: “*Candidate Material*”, “*Screening*”, “*Data Mining*” e “*Database*”. Enquanto que o segundo eixo é definido pelo termo “Seleção de Materiais”, e as palavras-chave são: “*Materials Selection*” e “*Selection of Materials*”.

Pautando-se na combinação das palavras-chave dos dois eixos, obtêm-se um total de oito combinações de busca nas bases de dados. Para o retorno de artigos ocorrer apenas quando as duas palavras aparecem no campo de busca, são utilizadas as expressões booleanas “*OR*”

entre as palavras-chave do mesmo eixo e “AND” como condicional entre eixos. A combinação de eixos e palavras-chave são apontadas na Figura 1.

Figura 1 – Eixos de pesquisa e palavras-chave para busca nas bases de dados



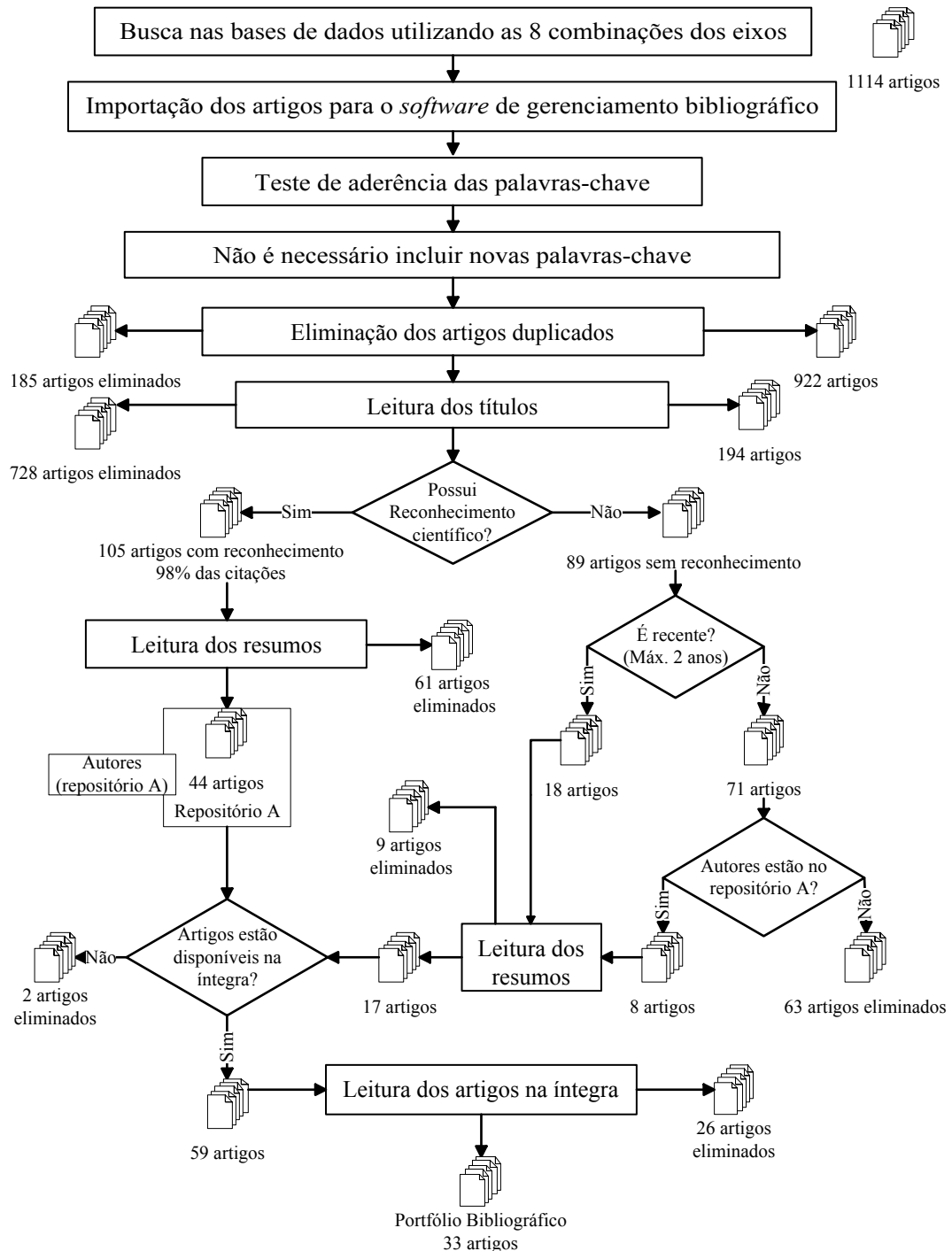
Fonte: elaborada pelo autor (2020).

Os critérios estabelecidos para a seleção das bases de dados utilizadas na busca dos artigos brutos, são baseadas em: (i) bases de dados das áreas de conhecimento Engenharias – Subáreas: Engenharia de Produção; Engenharia de Materiais e Metalúrgica do portal de periódicos CAPES; (ii) bases de dados que contém resumos e textos completos; (iii) bases de dados que disponibilizam ferramentas de busca com expressões booleanas; (iv) bases de dados que permitem a pesquisa das combinações dos eixos no Título, Palavras-chave e Resumo simultaneamente; e (v) bases de dados que apresentam a disponibilidade de exportar os artigos para um *software* de gerenciamento bibliográfico.

Desse modo, visando atender simultaneamente aos critérios predefinidos, a busca limitou-se em 16 bases de dados: *Compendex (Engineering Village - Elsevier)*; *Emerald Insight*; *Engineering Index*; *Engineering Database*; *IEEE Xplore*; *Materials Science Index – METADEX*; *Materials Science Database*; *OECD iLibrary: Papers*; *Polymer Library*; *Materials Science & Engineering Collection*; *SciELO.ORG*; *ScienceDirect (Elsevier)*; *Scopus (Elsevier)*; *Solid State and Superconductivity Abstracts*; *Technology Collection*; e *Web of Science*.

O processo estruturado de formação do PB baseado na metodologia *Proknow-C* para a seleção dos artigos relacionados ao tema de pesquisa, pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 – Processo estruturado de busca de artigos alinhados ao tema da pesquisa



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

Conforme pode ser observado na Figura 2, realizando-se a busca nas bases de dados elencadas, com os campos de busca definidos por: título, resumo e palavras-chave, e sem a restrição do período de tempo dos artigos, obteve-se 1.114 artigos preliminares brutos, todos, posteriormente, importados para o *software* de gerenciamento bibliográfico Mendeley®.

Com o banco de artigos importados para o *software* de gerenciamento, realizou-se o teste de aderência das palavras-chave. Tal etapa consiste na leitura dos títulos do banco de artigos brutos, sendo selecionados dois artigos alinhados com o tema da pesquisa, buscando-se as suas palavras-chave. Após a referida etapa, concluiu-se pela desnecessidade de inclusão de novas palavras-chave.

Sendo assim, os 1.114 artigos passaram pela exclusão de duplicados, o que resultou na eliminação de 185 artigos, restando 922 para leitura dos títulos. Desse modo, após a leitura dos títulos foram identificados 194 artigos alinhados com o tema da pesquisa.

A próxima etapa consistiu na identificação do reconhecimento científico das publicações, classificando-se os artigos com maior número de citações e selecionando os artigos em que a soma das citações representam 98% das citações da totalidade dos artigos, sendo que o artigo com menor número de citações, apresentou o total de sete, totalizando 105 artigos com reconhecimento científico. Desses, foi realizada a leitura dos resumos, resultando em 44 artigos alinhados com o tema, formando o banco de artigos e o banco de autores do repositório A.

Dos 89 artigos sem reconhecimento científico, encontrou-se trabalhos recentes, com no máximo dois anos de publicação (18 artigos), e trabalhos nos quais os autores estão presentes no banco de autores do repositório A (oito artigos), que foram selecionados para a leitura dos resumos. Após essa etapa, 17 artigos se juntaram aos artigos do repositório A, totalizando 61 artigos para serem buscados na íntegra, sendo que, desses, foram encontrados 59 artigos de acesso gratuito para leitura completa, dos quais 33 foram selecionados para o portfólio bibliográfico. Os artigos que compõem o PB são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Artigos do portfólio bibliográfico sobre o tema métodos de triagem inicial no processo de seleção de materiais

Ord.	Ano	Autores	Título	Periódico
1	1988	CHINER	Planning of expert systems for materials selection	Materials and Design
2	1991	BULLINGER <i>et al.</i>	Knowledge-based system for material selection for design with new materials	Knowledge-Based Systems
3	1993	ASHBY; CEBON	Materials selection in mechanical design	Le Journal de Physique IV
4	1995	CHEN <i>et al.</i>	An intelligent data base system for composite material selection in structural design	Engineering Fracture Mechanics
5	1996	GOEL; CHEN	Application of expert network for material selection in engineering design	Computers in Industry
6	1998	SAPUAN; ABDALLA	A prototype knowledge-based system for the material selection of polymeric-based composites for automotive components	Composites Part A: Applied Science and Manufacturin

Continua

## Continuação

Ord.	Ano	Autores	Título	Periódico
7	2001	SAPUAN	A knowledge-based system for materials selection in mechanical engineering design	Materials and Design
8	2002	ASHBY <i>et. al</i>	Selection strategies for materials and processes	Advanced Engineering Materials
9	2002	ASHBY; BRECHET	Materials selection for a finite life time	Advanced Engineering Materials
10	2004	BUGGY; CONLON	Material selection in the design of electrical connectors	Journal of Materials Processing Technology
11	2006a	JALHAM	Decision-making integrated information technology (IIT) approach for material selection	International Journal of Computer Applications in Technology
12	2006b	JALHAM	Computer-aided quality function deployment method for material selection	International Journal of Computer Applications in Technology
13	2006	SHANIAN; SAVADOGO	A material selection model based on the concept of multiple attribute decision making	Materials and Design
14	2008	ACEVES <i>et al.</i>	Design selection methodology for composite structures	Materials and Design
15	2008	RAKSHIT; ANANTHASURESH	Simultaneous material selection and geometry design of statically determinate trusses using continuous optimization	Structural and Multidisciplinary Optimization
16	2010	JAHAN <i>et al.</i>	Material screening and choosing methods: A review	Materials and Design
17	2010	MALEQUE; DYUTI	Materials selection of a bicycle frame using cost per unit property and digital logic methods	International Journal of Mechanical and Materials Engineering
18	2011	SAPUAN <i>et al.</i>	Prototype expert system for material selection of polymeric composite automotive dashboard	International Journal of the Physical Sciences
19	2012	DJASSEMI	Computer-aided approach to material selection and environmental auditing	Journal of Manufacturing Technology Management
20	2012	MALEQUE; ARIFUTZZAMAN	Digital logic and knowledge-based system for the automotive piston material selection	International Journal of Materials and Structural Integrity
21	2013	ALI <i>et al.</i>	Java based expert system for selection of natural fibre composite materials	Journal of Food, Agriculture and Environment
22	2013	PEÇAS <i>et al.</i>	Comprehensive approach for informed life cycle-based materials selection	Materials and Design
23	2013	QIU <i>et al.</i>	Material selection combined with optimal structural design for mechanical parts	Journal of Zhejiang University Science A
24	2014	SHAH	Natural fibre composites: Comprehensive Ashby-type materials selection charts	Materials and Design
25	2014	TAMBOURATZIS <i>et al.</i>	A methodological study for optimizing material selection in sustainable product design	Journal of Industrial Ecology

Continua



## Conclusão

Ord.	Ano	Autores	Título	Periódico
26	2015	BARRENECHE <i>et al.</i>	New database to select phase change materials: Chemical nature, properties, and applications	Journal of Energy Storage
27	2015	SERAFINI <i>et al.</i>	Multi Criteria Material Selection for Eco-design	Computer-Aided Design and Applications
28	2016	BROEREN <i>et al.</i>	Early-stage sustainability assessment to assist with material selection: a case study for biobased printer panels	Journal of Cleaner Production
29	2017	ALI <i>et al.</i>	Expert Material Selection for Manufacturing of Green Bio Composites	Green Biocomposites
30	2019	ALGHAMDY, <i>et al.</i>	Material Selection Methodology for Additive Manufacturing Applications	Procedia CIRP
31	2019	RAZI; SARKARI	Proposing a new approach to the selection of material portfolio using a combination of data mining and optimisation methods	International Journal of Operational Research
32	2019	YAVUZ	Materials Selection for Aircraft Skin Panels by Integrating Multiple Constraints Design with Computational Evaluations	Procedia Structural Integrity
33	2020	BENAFAN <i>et al.</i>	Shape Memory Materials Database Tool –A Compendium of Functional Data for Shape Memory Materials	Advanced Engineering Materials

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Assim, realizando-se todos os procedimentos elencados, obteve-se os artigos elencados no Quadro 1, que estão alinhados e apresentam relevância para o estudo do tema de métodos de triagem inicial no processo de seleção de materiais e formam o portfólio de artigos sobre o tema da pesquisa. Além do mais, esses artigos foram utilizados para comparar a literatura com os resultados do método de triagem elaborado nesta pesquisa.

O portfólio de artigos formado pela metodologia *Proknow-C* também foi utilizado para a revisão de literatura sobre os temas: seleção de materiais e métodos de triagem.

## 2.2 SELEÇÃO DE MATERIAIS

Com a necessidade e consequente busca cada vez maior por desempenho, economia, eficiência, e o dever imprescindível de evitar danos ao meio ambiente, fazer a escolha certa de um material para um determinado projeto se torna fundamental (ASHBY *et al.* 2018).

Desse modo, a seleção de materiais para uma determinada aplicação representa uma fase crucial durante o projeto de engenharia (TAMBOURATZIS *et al.*, 2014), além de ser uma das atividades mais importantes para um processo de desenvolvimento de produto (SAPUAN, 2001). As atividades básicas utilizadas em um processo de seleção de materiais sugeridas por

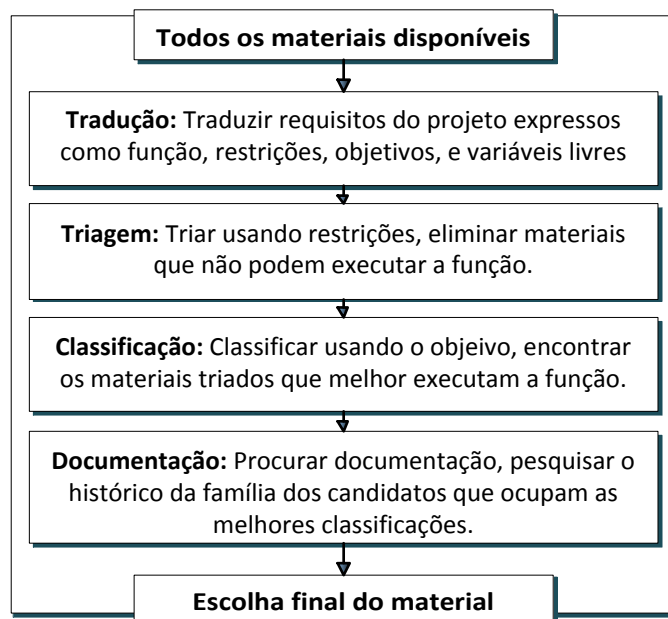
Chiner (1988) e Jalham (2006a), são: i) definição de *design* e identificação de necessidades; ii) análise dos requisitos de desempenho do material; iii) triagem dos materiais candidatos; iv) avaliação e decisão sobre o material ideal por métodos de critério único e múltiplo; e v) testes de verificação para obter medidas confiáveis dos materiais em serviço.

Tipicamente, o desenvolvimento de um produto se inicia com a identificação de uma necessidade de mercado, seguido pela coleta de dados, a qual tem o objetivo de identificar a especificação dos requisitos do produto (PEÇAS *et al.*, 2013). Assim, tais etapas exigem que o projetista tome decisões quanto as propriedades exigidas de um material para uma peça em projeto (GOEL; CHEN, 1996), para finalmente, iniciar as atividades de seleção de material.

O ponto de partida prático da seleção de materiais é reunir as informações relacionadas ao componente no banco de dados, fazendo com que um dos elementos básicos para uma seleção bem sucedida de materiais seja a utilização de uma Fonte confiável e consistente de dados de propriedades dos materiais existentes (SAPUAN *et al.*, 2011).

Ashby (2012) divide o método em quatro etapas: (1) tradução: converte os requisitos do projeto em restrições e objetivos; (2) triagem: elimina materiais que não podem cumprir as restrições; (3) classificação: ordena os materiais candidatos da etapa de triagem pela capacidade de cumprir os critérios definidos; e (4) documentação: que explora mais a fundo os candidatos mais promissores com relação ao seu uso, histórico de falhas e como elaborar um projeto com eles. A Figura 3 mostra tal estratégia para seleção de materiais.

Figura 3 – Método de seleção de materiais definido por Ashby (2012)



Fonte: adaptada de Ashby (2012).

Analisando as etapas descritas na Figura 3, denota-se que o campo com “todos os materiais disponíveis” se refere à base de dados, que é fundamental para que as etapas subsequentes sejam desenvolvidas. Isso porque, segundo Ashby (2012), a seleção de materiais não tendenciosa requer que todos os materiais sejam considerados candidatos, isto é, caso apresente amostras de materiais que não sejam representativas ou deixem de considerar algum material com potencial para uma determinada aplicação, podem não atingir um resultado otimizado.

Já as etapas de tradução e classificação serão utilizadas nas aplicações dos estudos de caso e devem seguir as orientações e métodos de cada autor, especificados no Capítulo 4, não tendo grande relevância para este trabalho. Por sua vez, as etapas de documentação e escolha do material final não serão investigadas ou utilizadas neste trabalho.

Por fim, a principal etapa do processo de seleção de materiais definido por Ashby (2012) e utilizada neste trabalho é a triagem, e seus métodos precisam ser melhor compreendidos.

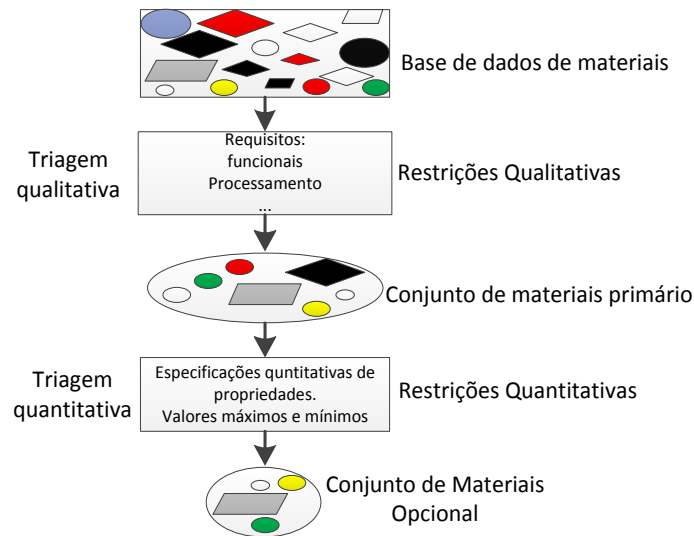
### 2.3 MÉTODOS DE TRIAGEM

Os métodos de triagem de materiais buscam eliminar os materiais candidatos, contidos no banco de dados, que não atendem aos requisitos definidos na etapa de tradução, pois um ou mais de seus atributos estão fora dos limites estabelecidos pelas restrições, pois, por exemplo, em alguns casos o desempenho é limitado por uma única propriedade ou pelas combinações delas (ASHBY, 2012).

Segundo Qiu *et al.* (2013), as restrições, derivadas dos requisitos funcionais e desempenho mecânicos, podem ser divididas em restrições qualitativas e quantitativas. As restrições qualitativas são, geralmente, convertidas em requisitos para o tipo de material, além de serem usadas para a triagem preliminar dos materiais definidos, enquanto que as restrições quantitativas são usadas para triagem posterior (QIU *et al.*, 2013).

Assim, a etapa de triagem visa eliminar os materiais que não podem atender às restrições (ASHBY, 2012). Na Figura 4, pode ser observado o processo de triagem de materiais.

Figura 4 – Processo de triagem de materiais candidatos



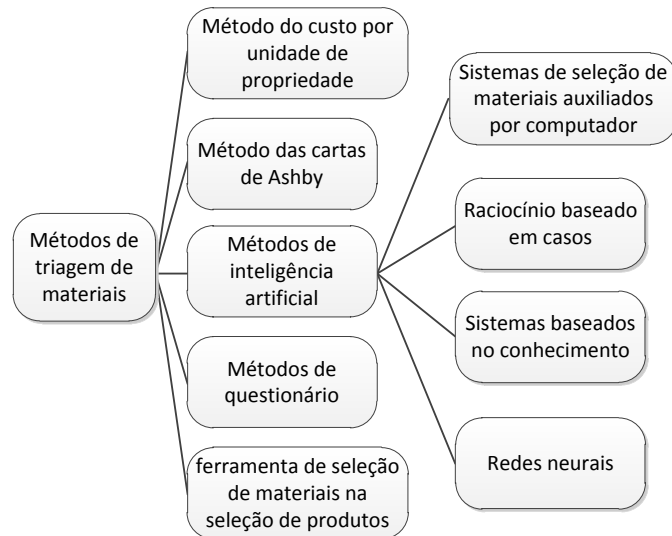
Fonte: adaptada de Qiu *et al.* (2013).

Da Figura 4, denota-se que o processo completo de triagem de materiais candidatos é formado, inicialmente, por uma base de dados, em que são aplicadas restrições derivadas dos requisitos funcionais e do desempenho mecânico (QIU *et al.*, 2013). Ao serem aplicados filtros qualitativos, forma-se o conjunto de materiais primário (QIU *et al.*, 2013). Já, na próxima etapa, que consiste na aplicação de restrições quantitativas sobre o conjunto primário de materiais, a fim de restringir o número de materiais candidatos, forma-se o conjunto de materiais opcional (QIU *et al.*, 2013).

Os critérios de triagem podem ser distinguidos em 3 tipos: critérios discretos, que se referem às propriedades que um material possui ou não; critérios de limite, usados para propriedades contínuas, em que todos os valores que excedem o limite são considerados suficientes; e critérios de intervalo, que podem ser usados para propriedades contínuas se apenas valores dentro de um intervalo específico forem aceitáveis (BROEREN *et al.*, 2016).

Existem diversos métodos para o processo de triagem de materiais, os principais estão descritos no trabalho de Jahan *et al.* (2010) e podem ser observados na Figura 5.

Figura 5 – Classificação dos métodos de triagem



Fonte: adaptada de Jahan *et al.* (2010).

Com base na Figura 5, observa-se que os métodos de triagem de materiais são divididos em cinco grupos principais. O primeiro é o custo por unidade de propriedade, que busca remover materiais que são muito caros, podendo ser muito útil quando um material está relacionado com uma propriedade crítica que influencia diretamente no desempenho do projeto (JAHAN *et al.*, 2010).

Por sua vez, o método das cartas de Ashby (2012), utiliza diagramas que apresentam o condensamento de materias de forma compacta. O método do questionário conforme descrito no trabalho de Jahan *et al.* (2010), consiste na atribuição de uma lista de requisitos que o material deve atingir, e o decisor responde de acordo com o desempenho de cada material disponível, de modo que os materiais que atendam aos requisitos das questões passam a ser alternativas a serem empregadas no componente a ser desenvolvido.

Nos subcapítulos 2.3.1 e 2.3.2, os métodos de triagem demonstrados na Figura 5, que possuem maior relevância objetivo deste trabalho, são definidos e relacionados com trabalhos publicados. O primeiro método que recebe uma abordagem mais aprofundada, é o método gráfico, pois tem um princípio similar ao método proposto, qual seja, a condensação de alternativas semelhantes em um gráfico ou diagrama.

### 2.3.1 Método Gráfico

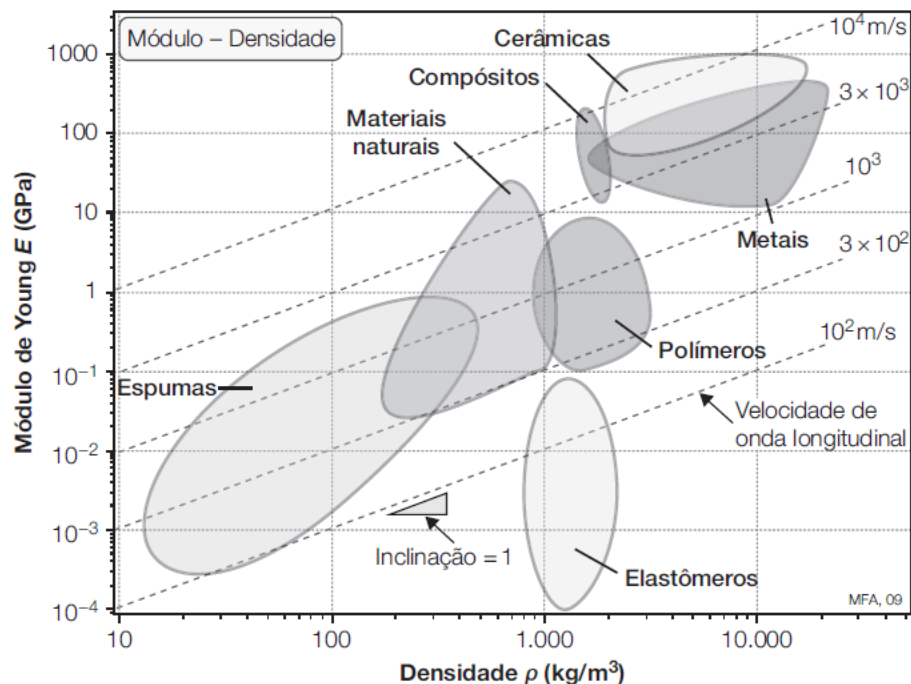
Ashby e Cebon (1993) afirmam que um material pode ser selecionado satisfatoriamente especificando faixas para as suas propriedades, para tanto, definem um

sistema que utiliza gráficos de seleção de materiais. O sistema de utilização de gráficos se trata de uma forma de agrupamento dos dados de propriedades de materiais, por meio do uso de procedimentos de otimização (ASHBY; CEBON, 1993). Assim, o processo de seleção depende da implementação de índices de desempenho, que são combinações de propriedades do material, que, se maximizadas, otimizam o desempenho (ASHBY; CEBON, 1993).

Desse modo, no método gráfico são exibidos diagramas para apresentar os materiais e indicadores de desempenho, para que a seleção mais adequada de materiais e formas possa ser realizada (ASHBY; CEBON, 1993).

Segundo Ashby (2012), os diagramas resultantes são úteis, pois condensam um grande volume de informações em uma forma compacta e acessível, além de revelarem correlações entre propriedades de materiais que ajudam na verificação e estimativa de dados. Um exemplo de uma carta de seleção relacionando duas propriedades de materiais pode ser observada na Figura 6.

Figura 6 – Carta de seleção relacionando as propriedades módulo de Young (GPa), ou módulo de elasticidade, com massa específica ( $\text{kg/m}^3$ )



Fonte: Ashby (2012).

A Figura 6 retrata, em escala logarítmica, a relação entre módulo de elasticidade ( $E$ ) e massa específica ( $\rho$ ), demonstrando que os grupos de materiais com maior massa específica e módulo de elasticidade são os metais e cerâmicas, localizados na região superior direita da

imagem, enquanto as espumas possuem as menores propriedades de  $E$  e  $\rho$ . Também, exibe linhas de velocidade de onda longitudinal para os grupos de materiais.

Para condensar e facilitar a exibição da relação entre propriedades, normalmente são realizadas manipulações de escala, visando, principalmente, facilitar a visualização de um grande número de materiais em uma única carta (ASHBY, 2012). No Quadro 2, estão descritos os trabalhos encontrados na literatura que utilizam o método gráfico desenvolvido por Ashby e Cebon (1993).

Quadro 2 – Artigos do portfólio bibliográfico que utilizam os métodos de Ashby e Cebon (1993)

Ano	Autor (es)	Aplicação do método
2002	Ashby e Bréchet	Utilizam índices de materiais, além de cartas de seleção de materiais para solucionar problemas de seleção de materiais dependentes do tempo para as propriedades de fluência e corrosão.
2010	Maleque e Dyuti	Desenvolvem um método de seleção de materiais para selecionar o melhor material em um quadro de bicicleta, o qual, para a triagem inicial dos materiais candidatos, utilizam os gráficos de seleção de materiais de Ashby.
2012	Djassemi	Propõe uma abordagem auxiliada por computador para a seleção de materiais juntamente com restrições de projeto e processamento de produtos considerando o conteúdo reciclado e tratamento em fim de vida, energia incorporada e emissão de CO <sub>2</sub> , onde na etapa de triagem, utiliza o <i>software</i> Cambridge Engineering Selector (CES), desenvolvido por Ashby <i>et al.</i> (2008).
2013	Peças <i>et al.</i>	Propõem uma abordagem modificada para apoiar a tomada de decisão para a seleção de materiais para aplicações de engenharia, denominada “The Materials Selection Engine (MSE)”, a etapa preliminar de tal método consiste em realizar uma análise funcional do produto para estabelecer as propriedades desejáveis, em seguida é realizada a etapa de triagem inicial onde os mesmos utilizam o <i>software</i> CES.
2014	Shah	Apresenta gráficos de triagem de materiais do tipo Ashby para o processo de triagem de fibras reforçadas com polímeros, visando facilitar o processo de projeto e desenvolvimento de produtos.
2015	Barreneche	Cria um banco de dados para o <i>software</i> CES, como objetivo de facilitar a seleção de materiais com características de mudança de fase.

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Como pode ser observado no Quadro 2, dos 33 artigos alinhados ao tema, buscados pelo método *Proknow-C*, seis deles utilizaram o método das cartas de seleção de Ashby e Cebon (1993) para a etapa de triagem, aplicado nas mais diversas áreas. Assim, o método das cartas de seleção permite a aplicação em inúmeros casos de seleção de materiais, tendo como regra

inicial o estabelecimento dos requisitos de material relacionados ao componente, definindo as características de propriedades dos materiais relacionadas aos requisitos para cada aplicação (ASHBY; CEBON, 1993).

O segundo método abordado se trata do método de inteligência artificial, que conforme abordado por Jahan *et al.* (2010), possui ramificações de outros métodos relacionados com a inteligência artificial, sendo um deles os sistemas baseados no conhecimento (KBS).

### 2.3.2 Métodos de Inteligência Artificial – Sistemas Baseados no Conhecimento (KBS)

Inteligência artificial se trata do estudo de como fazer os computadores executarem tarefas inteligentes para o processamento de conhecimento disperso não estruturado, para a solução de problemas complexos, podendo-se citar, como exemplo desses problemas, a seleção de materiais (JAHAN *et al.*, 2010).

Dentro do método de inteligência artificial está contido o sistema baseado no conhecimento (KBS), que, por sua vez, é capaz de auxiliar o usuário de forma interativa na resolução de vários problemas ou consultas, tentando representar conhecimento ou experiência humana para fornecer conhecimentos práticos e rápidos (BUGGY; CONLON, 2004). Esse sistema também pode ser chamado de sistema especialista, particularmente adequado para o processamento de problemas complexos, como a seleção de materiais para projetos com novos materiais, em que os dados dos materiais e suas propriedades são processados e armazenados em sistemas de banco de dados (SAPUAN *et al.*, 2011).

No Quadro 3, estão descritos os trabalhos encontrados na literatura que utilizam o método de sistemas baseados no conhecimento.

Quadro 3 – Artigos do portfólio bibliográfico que utilizam métodos de sistemas baseados em conhecimento

Ano	Autor (es)	Aplicação do método
1991	Bullinger <i>et al.</i>	Constroem uma estrutura baseada em conhecimento para a seleção de materiais para projetos com novos materiais, tais como, materiais reforçados com fibras e compósitos, onde na etapa de triagem, o usuário define os requisitos críticos para a seleção de materiais, baseados em características quantitativas e qualitativas dos materiais.

Continua



## Conclusão

Ano	Autor (es)	Aplicação do método
1998	Sapuan e Abdala	Utilizam um sistema KBS, incluindo variável de intensidade linguística qualitativa e variáveis quantitativas, porém sem especificar o método para classificar as intensidades linguísticas das propriedades.
2004	Buggy e Conlon	Desenvolvem um banco de dados de materiais baseado em conhecimento usando um <i>software</i> , tal banco de dados melhorou o acesso a informações sobre características de materiais utilizados para projetos de conectores elétricos.
2011	Sapuan <i>et al.</i>	Elaboram um sistema especialista para seleção de materiais de um painel automotivo. O processo de triagem e seleção foi realizado usando sistema baseado em regras através de relações simples <i>IF/THEN</i> , que forma a linguagem do sistema especialista.
2012	Maleque e Arifuzzaman	Programam um sistema KBS para seleção do material de um pistão automotivo, a etapa de triagem utiliza um sistema baseado em regras <i>se/então</i> , ou seja, somente quando algum material atende a todas as restrições definidas pelo usuário (conhecido como mecanismo de interface), ele será selecionado como um material candidato.
2013 e 2017	Ali <i>et al.</i>	Desenvolvem um sistema especialista para seleção de materiais compósitos de fibra natural, utilizando software com linguagem de programação NetBean Java <sup>TM</sup> , no qual, o processo de triagem é baseado em 3 propriedades, sendo: limite de resistência a tração, módulo de elasticidade e densidade. O usuário informa os limites quantitativos inferiores e superiores para cada propriedade e o sistema faz a busca dos materiais candidatos baseado em regras <i>IF/THEN</i> .
2013	Qiu <i>et al.</i>	Elaboram um modelo especialista híbrido para minimizar o impacto ambiental, tal modelo é formado por um algoritmo baseado em triagem qualitativa e quantitativa. Para a triagem qualitativa, o banco de dados de materiais é dividido em grupos baseados em sua composição química, desempenho funcional e propriedades físicas. Tal método de classificação pode efetivamente reduzir o intervalo de pesquisa para seleção de materiais e é utilizado como triagem preliminar, enquanto que a triagem quantitativa, estabelecem funções de desempenho baseadas em variáveis quantitativas de cada propriedade analisada e é utilizada na etapa de triagem.
2019	Razi e Sarkari	Propõem uma abordagem para seleção de um portfólio de materiais usando uma combinação de mineração de dados, através do algoritmo <i>k-means</i> , juntamente com métodos de otimização. O algoritmo <i>k-means</i> é utilizado para agrupar materiais candidatos, selecionados de uma etapa anterior. Dessa forma os autores não utilizam técnicas de agrupamentos para a etapa de triagem, mas sim para a etapas de classificação.

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Como pode ser observado no Quadro 3, dos 33 artigos alinhados ao tema buscados pelo método Proknow-C, oito deles utilizaram métodos relacionados a sistemas baseados no

conhecimento. Diferentemente dos trabalhos descritos no Quadro 2, em que todos os autores aplicam os índices de materiais definidos de acordo com o problema em cartas ou software existentes, neste caso, a maioria dos autores formam um banco de dados de materiais e criam regras de filtragem para definição dos materiais candidatos, baseado em informações diretamente relacionados à propriedade individual do componente, enquanto que no método das cartas de seleção as propriedades são utilizadas em pares ou conjuntos, dispostas em eixos para formar as cartas.

Para este estudo, o método utilizado é pautado nos métodos de inteligência artificial, pois, uma de suas etapas, consiste em realizar a filtragem dos materiais candidatos existentes no banco de dados, estabelecendo a atribuição de regras relacionadas aos valores de corte das propriedades, tais métodos de filtragem, são conhecidos como triagem conjuntiva (GILBRIDE; ALLENBY, 2004).

### 2.3.3 Método de Triagem Conjuntiva

Segundo Brown (1972), o método conjuntivo tem como princípio a configuração de valores mínimos de atributos aceitáveis pelo do decisor, a fim de que, qualquer alternativa ou candidato que tenha um valor de atributo inferior ao nível padrão seja rejeitado. Assim, regras de triagem conjuntivas restringem o conjunto de alternativas a serem avaliadas na seleção final (REZAEI *et al.*, 2014).

Desse modo, este trabalho se utiliza de um método linguístico de triagem conjuntiva, enquadrando-se como um método de inteligência artificial, mais especificamente, um sistema de seleção de materiais auxiliado por computador. A utilização deste método se justifica pelas facilidades de adequá-lo à proposta de utilização de variáveis linguísticas associadas a um banco de dados e posterior processamento das informações para a manipulação de dados e triagem de materiais. Insta ressaltar que, de acordo com Jahan *et al.* (2010), por ser um sistema que disponibiliza ferramentas adequadas para pesquisar, se torna um sistema adequado para a triagem de materiais candidatos.

Na aplicação do método conjuntivo, para que todas as alternativas sejam aceitáveis, todos os padrões devem ser satisfeitos, para tanto, os valores de corte fornecidos pelo decisor desempenham um papel fundamental na eliminação das alternativas, pois podem restringi-las a uma única escolha ao aumentar os níveis padrões mínimos de forma iterativa (HWANG e YOON, 1981).

Conforme definição de Hwang e Yoon (1981), a alternativa é classificada como aceitável apenas se atender a equação (1).

$$x_{ij} \geq x_j^0, j = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Em que:

$x_j^0$  é o nível padrão de  $x_j$ .

Gilbride e Allenby (2004), definem que os conjuntos de escolha formados por uma regra de decisão conjuntiva exigem que um material seja aceitável em todas as propriedades relevantes para ser incluído. Uma regra conjuntiva é formada pela multiplicação das funções de indicador (I) entre as características  $m$  de uma alternativa:

$$\prod_m I(x_{jm} > \gamma_m) = 1 \rightarrow \text{Maximização} \quad (2)$$

$$\prod_m I(x_{jm} < \gamma_m) = 1 \rightarrow \text{Minimização} \quad (3)$$

Em que:

$x_{jm}$  é o nível da propriedade  $m$  da alternativa  $j$ .

$\gamma_m$  é o valor de corte, ou seja, para critérios de maximização é o valor mínimo da propriedade do material que precisa ser atingido para o material ser aceitável, enquanto que, para critérios de minimização, é o valor máximo que a propriedade que pode atingir que o material seja aceitável.

Quando a regra conjuntiva possui resultado igual a 1, significa que a condição foi satisfeita e o material é uma alternativa a ser considerada (GILBRIDE; ALLENBY, 2004). O uso do produtório  $\prod_m$  resulta em uma combinação conjuntiva dos fatores, em que todos os componentes devem ser satisfeitos para que a combinação seja satisfeita (GILBRIDE; ALLENBY, 2004).

Assim, as regras do método de triagem conjuntiva implicam que uma alternativa deve atender a um desempenho mínimo para critérios de maximização e máximo para critérios de

minimização, também chamados de valores de corte para cada critério identificado, a fim de qualificar os candidatos para uma análise posterior (REZAEI *et al.*, 2014).

Diante do exposto, denota-se que as regras conjuntivas podem ser aplicadas após a definição pelo usuário das variáveis de intensidade linguísticas necessárias para uma determinada aplicação no processo de seleção de materiais. Para isso, devem ser formados conjuntos de materiais unidos pela similaridade de suas propriedades individualizadas, que se associam às variáveis de intensidade linguística dentro do banco de dados de materiais. Insta, por fim, ressaltar que esses conjuntos podem ser formados por medidas descritivas.

## 2.4 MEDIDAS DESCRITIVAS

Segundo Aguiar Neto (2009), as medidas descritivas ressaltam as características de cada distribuição, apresentando o conjunto de valores por meio de informações específicas. Uma espécie de medida descritiva é a medida de posição, que serve para alocar a distribuição de frequências sobre o eixo de variação da variável de interesse (AGUIAR NETO, 2009). As medidas de posição são divididas em medidas de tendência central e medidas separatrizes (ou de ordenamento) (LEVIN; FOX, 2004).

As medidas de tendência central são valores numéricos que representam o centro do conjunto de dados ou uma série numérica, tendo como principais medidas a média aritmética, a moda e a mediana (AGUIAR NETO, 2009).

No entanto, a média, muitas vezes, não é uma medida adequada para representar um conjunto de dados, pois é afetada por valores extremos do conjunto, além disso, a simetria ou assimetria da distribuição dos dados não é evidente, assim, devido a tais limitações, outras medidas devem ser consideradas (MORETTIN; BUSSAB, 2010).

Como alternativa, podem ser utilizadas as medidas separatrizes para dividir séries numéricas em partes iguais, a fim de que cada parte contenha o mesmo número de elementos (LIMA, 2009). A vantagem das medidas separatrizes em relação às medidas de tendência central, com exceção da mediana, é que elas não são afetadas pela forma de distribuição dos dados e nem por valores extremos (BRUNI, 2007).

Os quantis representam as medidas separatrizes, sendo que os quantis de amostra, fornecem estimadores não paramétricos de suas contrapartes populacionais com base em um conjunto de observações independentes  $\{X_1, \dots, X_n\}$  para a distribuição  $F$ , e  $\{X_{(1)}, \dots, X_{(n)}\}$

designam as estatísticas da ordem de  $\{X_1, \dots, X_n\}$ , e  $\hat{Q}_i(p)$  a indicação da  $i$ -ésima definição de quantil de amostra (HYNDMAN; FAN, 1996).

Conforme definido por Hyndman e Fan (1996), o quantil de uma distribuição é definido pela equação (4):

$$Q(p) = F^{-1}(p) = \inf\{x: F(x) \geq p\}, \quad 0 < p < 1 \quad (4)$$

Em que:

$F(x)$  é a função de distribuição

De modo geral, é definida uma medida denominada quantil de ordem  $p$  ou  $p$ -quantil indicada por  $q(p)$ , em que  $p$  é uma proporção qualquer,  $0 < p < 1$ , tal que  $100p\%$  das observações sejam menores do que  $q(p)$  (MORETTIN; BUSSAB, 2010).

Assim, dependendo do número de partes que a série é dividida, pode receber o nome de mediana, quartil, decil ou percentil (LIMA, 2009). Sendo:  $q(0,25) = q_1 = 1^\circ$  quartil =  $25^\circ$  percentil;  $q(0,50) = q_2$ : mediana =  $2^\circ$  quartil =  $50^\circ$  percentil;  $q(0,75) = q_3$ :  $3^\circ$  quartil =  $75^\circ$  percentil;  $q(0,40)$ :  $4^\circ$  decil;  $q(0,95)$ :  $95^\circ$  percentil (MORETTIN; BUSSAB, 2010).

A mediana é um número que contém pelo menos metade dos valores dos dados iguais ou abaixo dela e pelo menos metade dos valores de dados iguais ou acima dela (LANGFORD, 2006). Ou seja, conforme definido por Lima (2009), a mediana, além de ser uma medida de tendência central, separa amostra em 2 partes iguais.

Por outro lado, para criar quatro grupos iguais são necessários valores que dividam os dados de tal forma que  $25\%$  deles estejam em cada grupo, denominados quartis, do mesmo modo, para criar 10 grupos iguais é utilizada a medida separatriz denominada decil, e para a separação em cem partes tem-se os percentis (ALTMAN; BLAND, 1994).

Não obstante, de acordo com Hyndman e Fan (1996) e Langford (2006), há uma dificuldade em comparar definições de quantis, pois existe uma série de maneiras equivalentes de defini-los. No entanto, os quantis amostrais utilizados em pacotes estatísticos são todos baseados em uma ou duas ordens estatísticas, e podem ser descritos conforme equação (5)(6) (HYNDMAN; FAN, 1996).

$$\hat{Q}_i(p) = (1 - \gamma)X_{(j)} + \gamma X_{(j+1)} \quad (5)$$

Em que:

$p$  é o  $p$ -ésimo quantil ( $0 \leq p \leq 1$ )

$j$  é a função  $\text{floor}(Np)$ , onde  $Np$  é o  $p$ -ésimo quantil do número de observações da amostra

$\gamma$  e  $j$ , dependem dos valores de  $p$ ,  $N$  e de um parâmetro específico do método  $m$ .

$$\frac{j - m}{N} \leq p < \frac{j - m + 1}{N}$$

Cada definição tem um parâmetro  $m$ ,  $0 \leq m \leq 1$ , que determina como o método interpola entre os pontos de dados adjacentes.

Para alguns  $m \in \mathbb{R}$  e  $0 \leq \gamma \leq 1$ . O valor de  $\gamma$  é uma função de  $j = [pn + m]$  e  $g = pn + m - j$ .

No entanto, para Wang e Hao (2006), técnicas quantitativas convencionais são incapazes de lidar com a complexidade do pensamento e tomadas de decisão humanos, pois para Tseng *et al.* (2011) o modelo de preferência humana é incerto e, geralmente, incapaz de atribuir valores numéricos exatos às suas preferências, sendo difícil expressar as preferências dos sujeitos usando valores numéricos exatos, porque algumas das medidas de avaliação são subjetivas, qualitativas ou descritas em termos linguísticos. Dessa forma, ao fugir da precisão, em função de tal complexidade, são utilizadas as variáveis linguísticas (WANG; HAO, 2006).

## 2.5 VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS

A variável linguística pode ser definida como uma forma de expressar valores em palavras ou frases, seja por meio de uma linguagem natural ou artificial, como exemplo, pode-se citar a idade, que pode ser uma variável linguística se a seus valores forem atribuídos termos linguísticos ao invés de numéricos, como: muito jovem, não muito jovem, jovem, não jovem, velho, não muito velho e muito velho, respectivamente às idades 4, 10, 15, 30, 60, 45 e 90 (ZADEH, 1975). Desse modo, as variáveis linguísticas fornecem meios para aproximar ações humanas das decisões humanas.

Também, pode-se tratar “verdade” como uma variável linguística, a exemplo: verdadeiro, muito verdadeiro, totalmente verdadeiro, não muito verdadeiro, falso etc., o que leva a uma base para o raciocínio aproximado, denominado Lógica Fuzzy, que fornece uma

forma estruturada mais realista para o raciocínio aproximado, utilizando varável linguística (ZADEH, 1975).

A abordagem linguística Fuzzy trata de informações que são representadas em termos qualitativos por meio de variáveis linguísticas. Isso porque, o processo de atividades ou decisões geralmente cria a necessidade de computação com palavras (WANG; HAO, 2006).

Em que pese a abordagem linguística Fuzzy tenha sido aplicada com sucesso em muitos problemas, a abordagem possui uma limitação, que é a perda de informação causada pela necessidade de expressar os resultados no domínio inicial, que são discretos em razão de um processo aproximado (WANG; HAO, 2006).

Assim, buscando superar as limitações da abordagem linguística Fuzzy, Herrera e Martínez (2000), desenvolveram um modelo de representação linguística, denominado Fuzzy *2-tuple*, baseado no conceito de tradução simbólica.

## 2.6 MODELO LINGUÍSTICO 2-TUPLE

O modelo linguístico *2-tuple*, é usado para representar as informações de avaliação linguística por meio de uma *2-tuple*  $(s_i, \alpha_i)$ , onde  $s_i$  é um rótulo linguístico do conjunto de termos linguísticos predefinido  $S$  e  $\alpha_i$  é o valor da tradução simbólica, onde  $\alpha_i \in [-0,5, 0,5)$  (HERRERA; MARTÍNEZ, 2000).

**Definição 1:** sendo  $\beta$  o resultado de uma agregação dos índices de um conjunto de rótulos avaliados em um conjunto de termos linguísticos  $S$ , ou seja, o resultado de uma operação de agregação simbólica.  $\beta \in [0, g]$ , sendo  $g$  a cardinalidade de  $S$ . Seja  $i = \text{round}(\beta)$  e  $\alpha = \beta - i$  dois valores tais que  $i \in [0, g]$  e  $\alpha \in [-0,5, 0,5)$ , então  $\alpha$  é chamado de Tradução Simbólica (HERRERA; MARTÍNEZ, 2000).

**Definição 2:** sendo  $S = \{s_0, s_1, \dots, s_g\}$  um conjunto de termos linguísticos e  $\beta \in [0, g]$  um valor que representa o resultado de uma operação de agregação simbólica, então a *2-tuple* que expressa a informação equivalente a  $\beta$  é obtida com as equações (6) e (7) (HERRERA; MARTÍNEZ, 2000).

$$\Delta: [0, g] \rightarrow S \times [-0,5, 0,5),$$

(6)

$$\Delta(\beta) = (s_i, \alpha_i), \text{ com } \begin{cases} s_i, i = \text{round}(\beta), \\ \alpha_i = \beta - i, \alpha_i \in [-0.5, 0.5). \end{cases} \quad (7)$$

Em que:

$\text{Round}(\cdot)$  é a operação de arredondamento usual,  $s_i$  tem o rótulo de índice mais próximo de  $\beta$  e  $\alpha_i$  é o valor da Tradução Simbólica.

**Definição 3:** de acordo com Herrera e Martínez (2000), sendo  $S = \{s_0, s_1, \dots, s_g\}$  um conjunto de termos linguísticos e  $(s_i, \alpha_i)$  um *2-tuple*, sempre existe uma função  $\Delta^{-1}$  que pode ser definida, tal que, de um *2-tuple*  $(s_i, \alpha_i)$  ela retorna seu valor numérico equivalente  $\beta \in [0, g]$ , no qual:

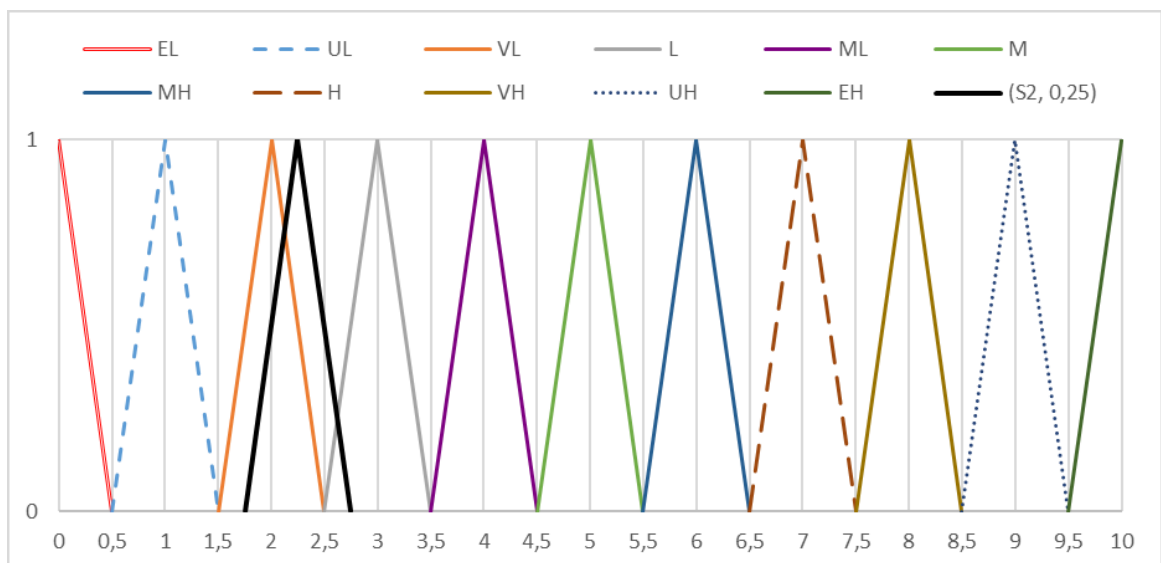
$$\Delta^{-1}: S \times [-0,5, 0,5) \rightarrow [0, g] \quad (8)$$

$$\Delta^{-1}(s_i, \alpha_i) = i + \alpha_i = \beta. \quad (9)$$

A partir das definições (6 e (7), pode-se observar que a conversão de um termo linguístico em *2-tuple* linguístico consiste em adicionar um valor 0 como tradução simbólica:  $\Delta(s_i) = (s_i, 0)$ .

Para exemplificar a conversão de um termo linguístico *2-tuple*, apresenta-se a Figura 7.

Figura 7 – Exemplo de representação linguística 2-tuple



Fonte: elaborada pelo autor (2021)



Na Figura 7 é evidenciado um exemplo do valor de  $\beta=2,25$ , em que a expressão 2-tuple para a informação equivalente de  $\beta$  é (VL, 0,25) ou ( $s_2$ , 0,25). Na figura, supõe-se que  $\beta=2,25$  é um valor de representação simbólica dos termos  $S=\{s_0$ : extremamente baixo (EL),  $s_1$ : ultra baixo (UL),  $s_2$ : muito baixo (VL),  $s_3$ : baixo (L),  $s_4$ : médio baixo (ML),  $s_5$ : médio (M),  $s_6$ : médio alto (MH),  $s_7$ : alto (H),  $s_8$ : muito alto (VH),  $s_9$ : ultra alto (UH),  $s_{10}$ : extremamente alto (EH).

**Definição 4:** conforme Herrera e Martínez (2000), sendo  $a = (s_k, \alpha_k)$  e  $b = (s_l, \alpha_l)$  dois 2-tuples, elas devem ter as seguintes propriedades:

(1) Se  $k < l$ , então  $a < b$ .

(2) Se  $k = l$ , então:  $\left\{ \begin{array}{l} \text{(a) Se } \alpha_k = \alpha_l, \text{ então } a = b; \\ \text{(b) Se } \alpha_k < \alpha_l, \text{ então } a < b; \\ \text{(c) Se } \alpha_k > \alpha_l, \text{ então } a > b. \end{array} \right.$

(3) Existe um operador negativo:  $\text{Neg}(s_i, \alpha) = \Delta (g - (\Delta^{-1}(s_i, \alpha)))$ , onde  $(s_i, \alpha_i)$  é um 2-tuple arbitrário,  $g + 1$  é a cardinalidade de  $S$ ,  $S = \{s_0, s_1, \dots, s_g\}$ .

As definições de representação linguísticas descritas por Herrera e Martínez (2000), podem ser aplicadas nos sistemas de seleção de materiais, pois, conforme definido por Zadeh (1975), as principais aplicações da abordagem linguística estão nos sistemas humanísticos, especialmente, nas áreas de inteligência artificial, linguística, processos de decisão humanos, reconhecimento de padrões, psicologia, diagnóstico médico, recuperação de informação, economia e áreas afins. Sendo assim, o método 2-tuple é utilizado para incorporar inteligência artificial no método de triagem de materiais proposto.

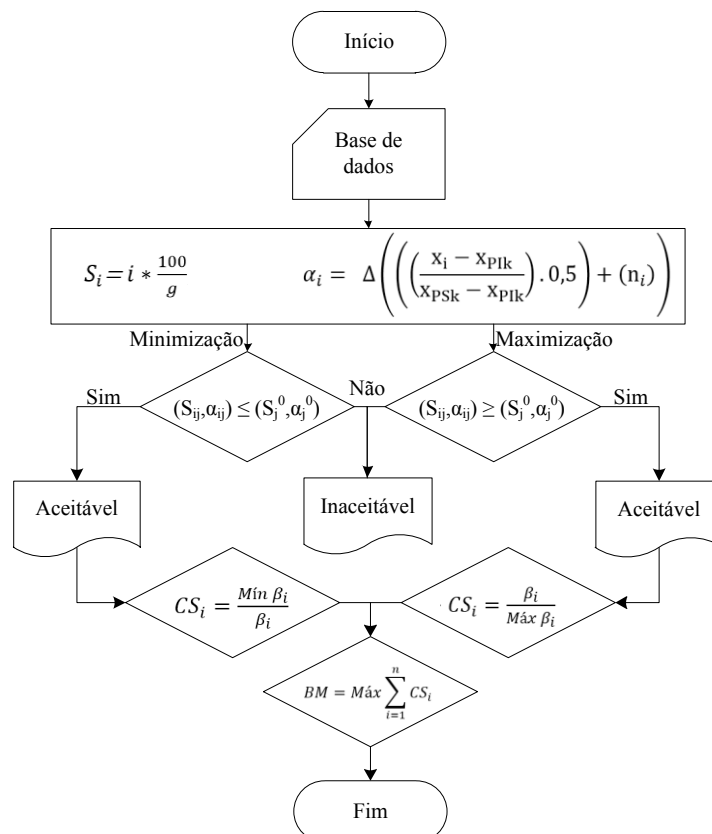
### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia de pesquisa, que está dividida nas seguintes seções: (i) descrição do método de triagem linguístico para o processo de seleção de materiais; e (ii) descrição dos três estudos de caso utilizados na aplicação do método de triagem linguístico.

#### 3.1 METODO DE TRIAGEM LINGUÍSTICO 2SM PARA O PROCESSO DE SELEÇÃO DE MATERIAIS

No presente trabalho, um novo método de triagem de materiais (2SM) é proposto, em que as propriedades quantitativas de um banco de dados de propriedades de materiais são convertidas em variáveis linguísticas *2-tuple* (informações qualitativas). Tal método é desenvolvido a partir de critérios de escolha, restrições qualitativas, e com o uso de um método conjuntivo linguístico. A Figura 8 demonstra as etapas do método 2SM em forma de algoritmo.

Figura 8 – Fluxograma do método 2SM



Fonte: elaborada pelo autor (2021).

A Figura 8 demonstra o fluxograma do método 2SM, em que suas etapas consistem em formar uma base de dados, realizar a associação linguística correspondente para os materiais da base de dados, aplicar os critérios conjuntivos de acordo com o objetivo da propriedade. Se o critério linguístico conjuntivo for atendido, é atribuído um coeficiente para cada material.

Analisando a Figura 8, denota-se que o ponto de partida para a implementação do método proposto é a uma base de dados para o desenvolvimento da seleção de materiais.

### 3.1.1 Base de Dados para Desenvolvimento do Método 2SM

De acordo com Sapuan *et al.*, (2011), uma fonte confiável e consistente de dados de propriedades dos materiais é um dos elementos mais importantes para uma seleção bem-sucedida de materiais e processos. Ainda, segundo Chiner (1988), uma base de dados que pode ser eficaz na seleção de materiais deve conter pelo menos cem diferentes propriedades e mais de mil materiais.

Desse modo, visando a eficácia do modelo proposto, parte-se de uma base de dados com 3.976 materiais cadastrados e suas propriedades, em que os dados de origem que remetem às informações das características dos materiais que compõem a base de dados foram extraídos de bancos pré-existentes, tais como: Bray (1990); MDC (2020); UL (2020); CES (2020); MatWeb (2020), além de periódicos e manuais. Alguns exemplos das propriedades abordadas são: massa específica, módulo de elasticidade (*Young*), limite de compressão, tenacidade a fratura, coeficiente de perda mecânica, tensão de escoamento, limite de resistência à tração, alongamento, dureza, condutividade térmica, expansão térmica, resistência à fadiga e custo.

Para formar, organizar, manipular e processar os dados contidos na base de dados, foi utilizado o *software* EXCEL, assim foram criadas planilhas contendo os materiais e suas propriedades, utilizando-se da criação de macros para facilitar a interação com o usuário, pois permite demonstrar os dados de forma direta, rápida e com uma boa apresentação. Esta ferramenta facilita a manipulação e associação linguística para realizar a triagem em função dos critérios estabelecidos pelo decisor.

Assim, a base de dados desenvolvida permite que, em qualquer momento, seja realizada a adição de novos materiais e propriedades. Ao realizar a adição de novos materiais na base de dados, devem ser informados limites de mínimo e máximo para as propriedades, pois, ao serem informadas as variáveis linguísticas de corte, quando por exemplo seleciona-se o critério de maximização, são utilizados os valores de mínimo da propriedade, a fim de garantir

que os materiais candidatos triados, na pior das condições, atendam aos requisitos linguísticos, enquanto que para critérios de minimização, valores máximos da propriedade são considerados.

Dessa forma, com a base de dados formada, inicia-se o desenvolvimento das etapas subsequentes do método 2SM.

### 3.1.2 Desenvolvimento do Método 2SM

Para tanto, uma das principais propostas do modelo sugerido é desenvolver a conversão de propriedades dos materiais da base de dados em variáveis linguísticas *2-tuple*, a conversão é desenvolvida com base em uma medida separatriz da estatística descritiva denominada percentil. Isso porque, segundo Lima (2009), a utilização de percentis auxilia na análise dos dados, já que dividem a série numérica das propriedades em cem partes de tamanhos iguais, possibilitando um maior detalhamento das informações obtidas. Essa separação detalhada dos dados através do percentil, é uma forma simples e eficaz de organizar as propriedades e categorizá-las, de forma a se obter uma quantidade uniformizada e padronizada de materiais disponíveis entre classes ou variáveis linguísticas.

A associação dos intervalos de percentil, definidos com as propriedades dos materiais, estabelece o número de variáveis linguísticas que compõem a escala. A conversão da propriedade quantitativa em variável linguística é realizada por meio das equações (10) e (11) e , em que são calculados os valores correspondentes a cada percentil estabelecido.

$$S_i = i * \frac{100}{g}, \text{ com } i \text{ de } 0 \text{ a } g \quad (10)$$

$$\alpha_i = \Delta \left( \left( \left( \frac{x_i - x_{PIk}}{x_{PSk} - x_{PIk}} \right) \cdot 0,5 \right) + (n_i) \right) \quad (11)$$

Em que:

$(S_i, \alpha_i)$  = propriedade do material i na forma de variável linguística *2-tuple*

$x_i$  = valor da propriedade do material, com  $i=1, 2, 3, \dots, m$  em que  $m$  é o total de materiais contidos no intervalo  $n$

$x_{PIk}$  = valor da propriedade do material no  $I_{perc}$  inferior do intervalo

$x_{PSK}$  = valor da propriedade do material no  $I_{perc}$  superior do intervalo

$n$  = número do intervalo, com  $n = (0, 10/g, 30/g, 50/g, 70/g, \dots, (2g-1)/g$ . Sendo o número de termos de  $n$  definidos por  $g+1$

$I_{perc} = (0, \frac{50}{g}, 3*\frac{50}{g}, 5*\frac{50}{g}, 7*\frac{50}{g}, \dots, 100 - \frac{50}{g}, 100)$  ou conforme demonstrado na Tabela 1.

$I_{perc}$  = Intervalos de percentil

Os percentis inferiores e superiores são calculados pela função PERCENTIL.EXC do *software* Microsoft Excel para os  $I_{perc}$  necessários.

Zadeh (1975) relata que a totalidade dos valores de uma variável linguística que constitui seu conjunto de termos, pode ter um número infinito de elementos. Assim, no método proposto, define-se que o número de intervalos necessários a serem calculados é igual a  $g$ , no qual  $g$  é o maior termo linguístico da escala. Os intervalos regulares em termos de percentis são calculados por  $100/g$ , enquanto os intervalos das extremidades são calculados por  $100/(2.g)$ .

A aplicação da equação (11) pode ser associada a qualquer intervalo de percentil, sendo assim, é exemplificada sua aplicação para uma escala linguística de onze variáveis na Tabela 1.

Tabela 1 – Associação de variáveis linguísticas

(Si, α)	Termo Linguístico	$I_{perc}$	Intervalo de Percentil	Intervalo 2-tuple
(S <sub>0</sub> , 0)	Extremamente Baixa (EL)	[0, 50/g)	[0, 5)	[S <sub>0</sub> , 0,00; S <sub>1</sub> , -0,50]
(S <sub>1</sub> , 0)	Ultra Baixa (UL)	[50/g, 3 * 50/g)	[5, 15)	(S <sub>1</sub> , -0,50; S <sub>2</sub> , -0,50)
(S <sub>2</sub> , 0)	Muito Baixa (VL)	[3 * 50/g, 5 * 50/g)	[15, 25)	[S <sub>2</sub> , -0,50; S <sub>3</sub> , -0,50)
(S <sub>3</sub> , 0)	Baixa (L)	[5 * 50/g, 7 * 50/g)	[25, 35)	[S <sub>3</sub> , -0,50; S <sub>4</sub> , -0,50)
(S <sub>4</sub> , 0)	Média Baixa (ML)	[7 * 50/g, 9 * 50/g)	[35, 45)	[S <sub>4</sub> , -0,50; S <sub>5</sub> , -0,50)
(S <sub>5</sub> , 0)	Média (M)	[9 * 50/g, 11 * 50/g)	[45, 55)	[S <sub>5</sub> , -0,50; S <sub>6</sub> , -0,50)
(S <sub>6</sub> , 0)	Média alta (MH)	[11 * 50/g, 13 * 50/g)	[55, 65)	[S <sub>6</sub> , -0,50; S <sub>7</sub> , -0,50)
(S <sub>7</sub> , 0)	Alta (H)	[13 * 50/g, 15 * 50/g)	[65, 75)	[S <sub>7</sub> , -0,50; S <sub>8</sub> , -0,50)
(S <sub>8</sub> , 0)	Muito Alta (VH)	[15 * 50/g, 17 * 50/g)	[75, 85)	[S <sub>8</sub> , -0,50; S <sub>9</sub> , -0,50)
(S <sub>9</sub> , 0)	Ultra Alta (UH)	[17 * 50/g, 100 - 50/g)	[85, 95)	[S <sub>9</sub> , -0,50; S <sub>10</sub> , -0,50)
(S <sub>10</sub> , 0)	Extremamente Alta (EH)	[100 - 50/g, 100]	[95, 100]	[S <sub>10</sub> , -0,50; S <sub>10</sub> , 0,00]

Fonte: elaborada pelo autor (2020).

A próxima etapa consiste em definir critérios para desenvolver a etapa de triagem preliminar, de forma a reduzir o número de materiais disponíveis, mas que contemple os materiais mais apropriados para uma dada aplicação. Essa etapa contempla a associação dos critérios com a etapa de tradução do método de Ashby e Cebon (1993).

O desenvolvimento da etapa de triagem é realizado por meio de um método conjuntivo linguístico, que, segundo Kahraman (2008), é um método puramente de triagem, tendo como requisito de aceitação as alternativas que excedem determinados limites de desempenho para todos os atributos, os quais não precisam ser medidos em unidades proporcionais. Tal método é aplicado através da equação (12).

$$(S_{ij}, \alpha_{ij}) \geq, \leq, >, < (S_j^0, \alpha_j^0), j = 1, 2, \dots, n. \quad (12)$$

Em que:

$(S_{ij}, \alpha_{ij})$  = propriedade do material  $i$  em relação ao critério  $j$  na forma de variável linguística 2-tuple;

$(S_j^0, \alpha_j^0)$  = propriedade limite do material em relação ao critério  $j$  na forma de variável linguística 2-tuple.

Para realizar a triagem dos materiais da base de dados formada, o usuário precisa inserir restrições baseadas em informações linguísticas descritas na Tabela 1, com a finalidade de restringir o campo de busca. A restrição deve ser imposta nas propriedades que influenciam diretamente na aplicação do componente, fazendo com que, quando as condições de uma regra sejam satisfeitas, as condições sejam válidas, ou seja, se a premissa for verdadeira, a conclusão também deve ser, por exemplo: se (característica de propriedade 1 é igual a variável linguística associada à propriedade 1) e/ou se (característica de propriedade 2 é igual a variável linguística associada à propriedade 2) então os materiais que atendem essa condição são considerados materiais candidatos.

Várias regras são usadas em sucessão, empregando um processo chamado encadeamento (ABDALLA; KNIGHT, 1994) e quando um material satisfaz todas as restrições torna-se um candidato adequado para um determinado componente (SAPUAN; ABDALLA, 1998).

Para utilizar o método proposto, primeiramente o usuário deve informar para cada propriedade relevante para o estudo se corresponde a um critério de minimização ou de maximização. Para critérios de maximização, o método define como materiais aceitáveis todos aqueles com propriedades superiores ao limite inferior da faixa de intensidade linguística especificada posteriormente. Em critérios de minimização, os materiais selecionados como

aceitáveis são todos os materiais com propriedades inferiores ao limite superior da faixa de intensidade linguística especificada.

Em seguida, a fim de aumentar a restrição do número de materiais candidatos resultantes da triagem preliminar, é proposta uma etapa de restrições quantitativas para desenvolver a triagem posterior, que consiste em agrupar os materiais por similaridade de classes, atribuir um coeficiente (definidos pelas equações (13) e (14)) para cada material em cada propriedade em função do tipo do critério, e, por fim, selecionar o material com maior coeficiente de cada grupo utilizando a equação (13).

$$\text{Critério de maximização} \rightarrow CS_i = \frac{\beta_i}{\text{Máx } \beta_i} \quad (13)$$

$$\text{Critério de minimização} \rightarrow CS_i = \frac{\text{Mín } \beta_i}{\beta_i} \quad (14)$$

$$BM = \text{Máx} \sum_{i=1}^n CS_i \quad (15)$$

Em que:

$CS_i$  = coeficiente do material

$BM$  = melhor material

Ao serem aplicadas todas as etapas descritas, o banco de materiais candidatos opcional é definido. Para facilitar a utilização, o método 2SM é traduzido para um modo de fácil interação com o usuário. Dessa forma, a atribuição da informação das propriedades e modo de se realizar a triagem torna-se fácil e ágil.

A tela inicial do método 2SM é demonstrada na Figura 9.

Figura 9 – Tela principal de utilização do método 2SM



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

Na Figura 9 é demonstrada a tela principal do seletor linguístico proposto, que exhibe as opções para acesso aos materiais das propriedades desenvolvidas, permitindo o cadastro de novos materiais quando necessário. Também, possibilita o acesso ao resumo das propriedades com o número de materiais que compõem cada variável linguística e um acesso simplificado à base de dados completa e ao seletor linguístico.

Para facilitar a interação com usuário e agilizar a aplicação do método proposto, o método 2SM é convertido em uma linguagem de fácil manipulação, em que os cálculos não ficam evidentes ao usuário, bastando a seleção das características por caixas de seleção, sendo que por meio de um clique é possível desenvolver a triagem preliminar. A Figura 10 apresenta a tela de triagem do método 2SM.



Figura 10 – Tela do método 2SM para aplicação das restrições linguísticas e objetivos

PROPRIEDADE	INTENSIDADE LINGUÍSTICA	OBJETIVO
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Alta (H)	Maximização
Tensão de escoamento (Mpa)	Não Aplicável	Maximização
Alongamento (%)	Não Aplicável	Maximização
Dureza (Vickers)	Alta (H)	Maximização
Modulo de cisalhamento (Gpa)	Não Aplicável	Maximização
Resistência à fadiga 10 <sup>7</sup> ciclos (Mpa)	Não Aplicável	Maximização
Limite de Resistência à tração (Mpa)	Não Aplicável	Maximização
Condutividade térmica (W/m.°C)	Não Aplicável	Maximização
Expansão térmica (μdeform./°C)	Não Aplicável	Maximização
Tensão de compressão (Mpa)	Não Aplicável	Maximização
Tenacidade a fratura (MPa.m <sup>0.5</sup> )	Não Aplicável	Maximização
Coefficiente de perda mecânica	Não Aplicável	Maximização
Custo (\$/kg)	Não Aplicável	Minimização
Modulo de elasticidade (Gpa)	Muito Alta (VH)	Maximização
Tenacidade (kJ/m <sup>2</sup> )	Não Aplicável	Maximização
Calor específico (J/kg.°C)	Não Aplicável	Maximização
Condutividade térmica (W/m.°C)	Não Aplicável	Maximização
Coefficiente de expansão térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	Não Aplicável	Maximização
Máxima temperatura de serviço (°C)	Não Aplicável	Maximização
Módulo de Bulk	Alta (H)	Maximização
Coefficiente de Poisson	Muito Baixa (VL)	Maximização

Média Baixa (ML)  
 Média (M)  
 Média alta (MH)  
 Alta (H)  
**Muito Alta (VH)**  
 Ultra Alta (UH)  
 Extremamente Alta (EH)  
 Não Aplicável

**Maximização**  
 Minimização  
 Maximização

RELIZAR A TRIAGEM

Fonte: elaborada pelo autor (2020).

A Figura 10 apresenta a tela de triagem, com as propriedades relevantes para os estudos de caso a serem realizados no Capítulo 4. Com os requisitos estabelecidos, basta selecionar a intensidade linguística para a propriedade e com um clique é realizada a triagem e as regras conjuntivas são desenvolvidas. Com isso, uma tela com os materiais que atendam tais requisitos linguísticos, com suas respectivas propriedades, é exibida para o usuário.

Tais materiais servem para as etapas subsequentes do método de seleção de materiais definidos por Tambouratzis *et al.* (2014), Chiner (1988) e Ashby (2012).

A fim de comparar o método de triagem 2SM, com outros métodos existentes, buscando a verificação de sua eficácia, propõe-se a aplicação do método nos seguintes trabalhos: (i) Çalişkan *et al.*, (2013), que definem os materiais candidatos para fabricação de um porta-ferramentas (*tool holder*) utilizando como método de triagem o *software* CES EduPack, que tem como princípio o método das cartas de seleção desenvolvidas por Ashby e Cebon (1993); (ii) Maleque e Dyuti (2010), que definem os materiais candidatos para fabricação de uma estrutura de bicicleta (*bicycle frame*), que assim como Çalişkan *et al.*, (2013), utilizam como método de triagem o *software* CES EduPack, que tem como princípio o método das cartas de seleção desenvolvidas por Ashby e Cebon (1993); e (iii) Purohit e Ramachandran (2015), que definem os materiais candidatos para fabricação de um volante de inércia (*flywheel*) e utiliza como candidatos os materiais triados pela literatura, sem a utilização de nenhum dos métodos citados neste trabalho.

## 4 APLICAÇÃO E DISCUSSÃO DO MÉTODO 2SM

Esta seção apresenta a descrição dos estudos de caso para a aplicação do método proposto nesta dissertação.

O banco de dados é formado por faixas de valores para cada propriedade. Para todos os estudos de caso a escolha do limite inferior da intensidade da propriedade foi selecionada em função do critério definido. Para critérios de custo, em que, quanto menor o valor da propriedade, melhor potencial candidato se torna o material, o valor selecionado é o maior, justamente para garantir que o material candidato tenha no máximo tal valor para a propriedade. Já para critérios de benefício, em que, quanto maior o valor da propriedade, maior a chance do material se tornar um candidato, toma-se como padrão a utilização do limite inferior da faixa de intensidade da propriedade, buscando garantir que nenhum material possa atingir um valor inferior ao limite estabelecido para a triagem.

### 4.1 SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA UM PORTA-FERRAMENTAS (*TOOL HOLDER*)

Um caso de aplicação do método proposto nesta dissertação é baseado no trabalho de Çalişkan *et al.*, (2013), que estudaram o processo de seleção de materiais para um porta-ferramentas, utilizado nas operações de fresamento de materiais em estado endurecido (dureza maior que 50 HRC), no qual as forças resultantes são bastante altas e podem causar vibrações, deflexão e falha prematura do porta-ferramentas. Dessa forma, devem ter alguma propriedade específica para manter sua função durante a usinagem, pois estão sujeitos a forças que mudam durante o processo de corte. Assim, os requisitos de material mais importantes e os materiais resultantes da busca realizada pelos autores no *software* CES EduPack estão demonstrados na Tabela 3.

Para a definição dos materiais candidatos demonstrados na Tabela 3, Çalişkan *et al.*, (2013) estabeleceram requisitos na forma de intensidade linguística para as propriedades, como sendo: altos valores de módulo de elasticidade ou de *young* (YM) são desejados para o componente apresentar alta rigidez; altas forças compressivas (CS); altos valores de tenacidade à fratura (FT) são desejados; elevados valores do coeficiente de perda mecânica (MLC) são esperados para fornecer dissipação de energia; o porta-ferramentas também deve ter dureza suficiente (HHH); e baixos valores de custo (C) são desejados, a fim de fornecer uma vantagem competitiva entre os fabricantes.

Diante disso, é realizada a triagem dos materiais pelo método 2SM, em que os requisitos das propriedades são associados com as características dos materiais candidatos do trabalho de Çalişkan *et al.*, (2013). A primeira etapa consiste na definição do número de variáveis linguísticas, de modo que, para este caso, foram utilizadas 11 variáveis, conforme ilustrado na Tabela 1. Com o número de variáveis linguísticas definidas, é realizada a associação dos materiais candidatos definidos pelos autores com escala linguística do método proposto. Na Tabela 3 podemos observar tal associação.

Tabela 2 – Propriedades dos materiais candidatos do estudo de caso de um porta-ferramentas e sua associação linguística com o método 2SM

Materiais candidatos	Propriedades					
	YM (GPa)	CS (MPa)	FT (MPa* m <sup>1/2</sup> )	MLC	HHH (HV)	C (\$/kg)
Aço AISI 1020 laminado	210	330	54,5	0,00111	150	0,673
Aço AISI 1040 temperado a 425 °C em água	212	632,5	46	0,00117	355	0,7045
Aço AISI 4140 normalizado	212	655	87,5	0,00051	305	0,864
Aço AISI 6150 temperado e revenido em óleo	206,5	1575	38	0,00026	483	1,175
Aço AISI 8620 normalizado	206,5	360	111,5	0,00089	190	0,8665
Aço maraging	187,5	1825	80	0,00071	532,5	6,97
Aço ferramenta AISI S5 revenido a 205 °C	210	1930	21	0,00002	771	7,99
Carboneto de tungstênio - cobalto (10%)	593	4405	14,05	0,00135	1250	79,6
Aço Fe-5Cr-Mo-V temperado e revenido	212,5	1655	120	0,00113	448,5	1,73
Variável linguística associada	Muito Alta (VH)	Alta (H)	Média Alta (MH)	Ultra Baixa (UL)	Alta (H)	Muito alta (VH)

Módulo de elasticidade (YM), tensão de compressão (CS), tenacidade à fratura (FT), coeficiente de perda mecânica (MLC), dureza (HHH) e custo (C).

Fonte: adaptado de Çalişkan *et al.*, (2013).

Com a associação realizada, conforme Tabela 3, pode-se observar que na propriedade denominada coeficiente de perda mecânica, mesmo que fossem desejados valores altos, o material com menor valor apresenta uma classificação linguística ultra baixa. Sendo assim, consideram-se, para esta análise, valores de corte aceitáveis como sendo de ultrabaixos até extremamente altos. Algo semelhante ocorre para a variável custo, pois, em que pese Çalişkan *et al.*, (2013) especificarem que valores baixos são desejáveis, o valor máximo dessa característica se classifica como muito alto, o que faz com que a variável linguística de corte correspondente seja de muito alto até extremamente baixo, e, conseqüentemente, todos os

materiais associados entre essas faixas sejam considerados aceitáveis para aplicação do método 2SM.

Os critérios linguísticos e propriedades utilizadas podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades e variáveis linguísticas utilizadas para aplicar o método 2SM no estudo de caso de um *Tool Holder*

Propriedade	Intensidade Linguística	Critério
Dureza (vickers)	Alta (H)	Maximização
Tensão de compressão (MPa)	Alta (H)	Maximização
Tenacidade a fratura (MPa*m <sup>0,5</sup> )	Média Alta (MH)	Maximização
Coefficiente de perda mecânica	Ultra Baixa (UL)	Maximização
Custo (\$/kg)	Muito Alta (VH)	Minimização
Módulo de elasticidade (GPa)	Muito Alta (VH)	Maximização

Fonte: elaborada pelo autor (2021).

Na Tabela 3 é possível verificar as propriedades e suas variáveis linguísticas de corte, que recebem a associação ao tipo de critério ou objetivo desejado para a aplicação em análise, que pode ser de maximização ou minimização. No entanto, ressalta-se que no caso em análise, apenas o custo se tratou de uma variável de minimização, de modo que todas as demais variáveis tiveram como objetivo a maximização.

Aplicando os critérios de triagem linguísticos definidos pela associação com os materiais candidatos do trabalho de Çalişkan *et al.*, (2013), no método proposto, são selecionados 517 diferentes materiais. Para reduzir ainda mais o número de materiais candidatos, após a triagem, esses materiais foram agrupados por similaridade, resultando em 20 grupos, dos quais foi selecionado o melhor material de cada grupo de acordo com as equações (13), (14) e (15).

Os materiais candidatos selecionados pelo método proposto estão demonstrados no Quadro 4.

Quadro 4 – Materiais candidatos para fabricação de um *Tool Holder*, definidos pelo método 2SM

Materiais Candidatos	
1	Aço carbono, AISI 1030, temperado em água e revenido a 205°C
2	Superliga à base de cobalto, multifásica, MP159, tratada com solução, trefilada a frio e envelhecida
3	Aço de alta liga, AF1410, solução tratada e envelhecida
4	Aço de baixa liga de alta resistência, YS550, laminado a quente
5	Liga intermediária, aço de aeronaves Fe-5Cr-Mo-V, temperado e revenido

Continua

## Conclusão

	<b>Materiais Candidatos</b>
6	Superliga à base de ferro, liga Cr-Ni, A-286, tratada com solução e envelhecida
7	Aço de fase complexa, YS500, laminado a frio
8	Aço de fase dupla, YS600, laminado a frio
9	Aço Ferrítico-bainítico, YS330, laminado a quente
10	Aço de baixa liga, AISI 5160, normalizado
11	Aço martensítico, YS1200, laminado a quente
12	Molibdênio, liga 363, TZM
13	Liga de níquel-cromo, HASTELLOY X, solução tratada
14	Aço de endurecimento por prensa, 22MnB5, austenizado e temperado em água, não revestido
15	Aço inoxidável, martensítico, AISI 416, trabalhado a frio
16	Aço ferramenta, AISI S5, recozido (resistente ao choque)
17	Aço TRIP, YS400, laminado a frio
18	Carboneto de tungstênio-cobalto (74,8)
19	Liga de tungstênio-Ni-Cu, CMW 1000
20	Aço TWIP, YS500, laminado a frio

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Os materiais candidatos resultantes da triagem realizada pelo método 2SM estão demonstrados no Quadro 4. Com base no referido quadro, verifica-se que os materiais candidatos são em sua grande maioria ligas de aço. Mas, o conjunto também é representado por uma superliga a base de cobalto, superliga a base de ferro, ligas de molibdênio, níquel-cromo e tungstênio, além do carboneto de tungstênio-cobalto.

Com a definição dos materiais candidatos, parte-se para as etapas de classificação utilizadas por Çalişkan *et al.*, (2013), a fim de validar a eficácia do método proposto. Desse modo, visando comparar os materiais opcionais do método 2SM com os materiais candidatos definidos por Çalişkan *et al.*, (2013), aplicam-se os métodos de classificação TOPSIS e VIKOR, considerando como materiais candidatos todos os materiais resultantes do agrupamento dos candidatos de ambos os métodos.

O método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), introduzido por Hwang e Yoon (1981), é utilizado para obter uma solução que esteja mais próxima da solução ideal e mais distante da solução ideal negativa (ÇALIŞKAN *et al.*, 2013). Enquanto o método VIKOR, introduzido por Opricovic (1998) como uma técnica aplicável para implementar dentro dos sistemas de decisão multicritério (MCDM), visa a solução de compromisso, se tratando de uma ferramenta útil na tomada de decisão segundo critérios múltiplos, particularmente, em uma situação em que o tomador de decisão não é capaz de expressar sua preferência no início do projeto do sistema (HUANG *et al.*, 2009).

Os resultado da classificação dos materiais candidatos encontrados no trabalho de Çalişkan *et al.* (2013) são demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação das alternativas do estudo de caso de um *Tool Holder*

Alternativa	TOPSIS	VIKOR
A21	6	6
A22	4	4
A23	5	5
A24	8	8
A25	3	3
A26	7	7
A27	9	9
A28	2	1
A29	1	2

Fonte: adaptada de Çalişkan *et al.* (2013).

Conforme os dados contidos na Tabela 4, denota-se que os cinco materiais mais bem classificados por Çalişkan *et al.* (2013) foram aqueles contidos nas alternativas A28, A29, A25, A22 e A23.

A fim de demonstrar e comparar a classificação das alternativas de Çalişkan *et al.* (2013) com as do método 2SM, são colocadas todas as alternativas para verificação simultânea com os métodos TOPSIS e VIKOR, em que o resultado da classificação pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5 – Comparativo entre materiais candidatos e ranking

Métodos	Alternativas	Materiais Candidatos	Módulo de elasticidade (GPa)	tenacidade a fratura (MPa*m <sup>1/2</sup> )	coeficiente de perda mecânica	Dureza Vickers (HV)	custo (\$/kg)	Ranking TOPSIS	Ranking VIKOR	
Método 2SM	A1	Aço carbono, AISI 1030, temperado em água e revenido a 205°C	212	647,5	45	0,000575	500	0,4217	22	23
	A2	<b>Superliga à base de cobalto, MP159, tratada, trefilada a frio e envelhecida</b>	<b>243</b>	<b>1460</b>	<b>135</b>	<b>0,0005</b>	<b>600</b>	<b>10,4012</b>	<b>5</b>	<b>4</b>
	A3	<b>Aço de alta liga, AF1410, solução tratada e envelhecida</b>	<b>208</b>	<b>1620</b>	<b>155</b>	<b>0,00113</b>	<b>550</b>	<b>19,0313</b>	<b>3</b>	<b>6</b>
	A4	Aço de baixa liga de alta resistência, YS550, laminado a quente	210,5	600	80,5	0,00076	208	0,4188	13	18
	A5	<b>Liga intermediária, aço de aeronaves Fe-5Cr-Mo-V, temperado e revenido</b>	<b>212,5</b>	<b>1655</b>	<b>120</b>	<b>0,00113</b>	<b>448,5</b>	<b>1,7300</b>	<b>1</b>	<b>7</b>
	A6	Superliga à base de ferro, liga Cr-Ni, A-286, tratada com solução e envelhecida	206	682,5	141	0,00035	308,5	2,5538	10	17
	A7	Aço de fase complexa, YS500, laminado a frio	210,5	600	62,5	0,00079	199,5	0,7446	20	20
	A8	Aço de fase dupla, YS600, laminado a frio	210,5	675	90,5	0,00046	306,5	0,4530	17	21
	A9	Aço Ferrítico-bainítico, YS330, laminado a quente	210,5	370	49	0,00112	153,5	0,4413	15	15
	A10	Aço de baixa liga, AISI 5160, normalizado	209	532,5	106	0,000595	275,5	0,4315	12	16
	A11	Aço martensítico, YS1200, laminado a quente	210,5	1025	138	0,00036	377	0,5098	7	12
	A12	<b>Molibdênio, liga 363, TZM</b>	<b>315</b>	<b>860</b>	<b>40</b>	<b>0,0002</b>	<b>310</b>	<b>10,6164</b>	<b>26</b>	<b>3</b>
	A13	<b>Liga de níquel-cromo, HASTELLOY X, solução tratada</b>	<b>210,5</b>	<b>631,5</b>	<b>196</b>	<b>0,0006</b>	<b>180</b>	<b>8,1703</b>	<b>4</b>	<b>9</b>
	A14	Aço de endurecido por prensa, 22MnB5, austenizado e temperado em água	210,5	1100	149	0,0002865	485	0,4276	6	10
	A15	Aço inoxidável, martensítico, AISI 416, trabalhado a frio	205	720	81,1	0,00061	270	0,7818	19	24
	A16	Aço ferramenta, AISI S5, recozido (resistente ao choque)	210	440	52,5	0,000254	225	1,6233	27	28
	A17	Aço TRIP, YS400, laminado a frio	210,5	455	61	0,000755	226	0,7583	21	22
	A18	<b>Carboneto de tungstênio-cobalto (74,8)</b>	<b>459,5</b>	<b>3005</b>	<b>25,1</b>	<b>0,00135</b>	<b>801</b>	<b>61,0568</b>	<b>24</b>	<b>2</b>

Continua

## Conclusão

Métodos	Alternativas	Materiais Candidatos	Módulo de elasticidade (GPa)		tenacidade a fratura (MPa*m <sup>1/2</sup> )	coeficiente de perda mecânica	Dureza Vickers (HV)	custo (\$/kg)	Ranking TOPSIS	Ranking VIKOR
				tensão de compressão (MPa)						
2SM	A19	<b>Liga de tungstênio-Ni-Cu, CMW 1000</b>	<b>276</b>	<b>682,5</b>	<b>135</b>	<b>0,00025</b>	<b>270</b>	<b>37,1820</b>	<b>29</b>	<b>5</b>
	A20	Aço TWIP, YS500, laminado a frio	210,5	500,5	67,5	0,000495	291,5	0,8258	23	25
ÇALIŞKAN <i>et al.</i> (2013)	A21	Aço AISI 1020 laminado	210	330	54,5	0,00111	150	0,6730	14	14
	A22	Aço AISI 1040 temperado a 425 °C em água	212	632,5	46	0,00117	355	0,7045	11	11
	A23	Aço AISI 4140 normalizado	212	655	87,5	0,000515	305	0,8640	16	19
	A24	Aço AISI 6150 temperado e revenido em óleo	206,5	1575	38	0,00026	483	1,1750	25	27
	A25	Aço AISI 8620 normalizado	206,5	360	111,5	0,00089	190	0,8665	8	13
	A26	Aço maraging	187,5	1825	80	0,00071	532,5	6,9700	18	26
	A27	Aço ferramenta AISI S5 revenido a 205 °C	210	1930	21	0,00002055	771	7,9900	28	29
	A28	<b>Carboneto de tungstênio - cobalto (10%)</b>	<b>593</b>	<b>4405</b>	<b>14,05</b>	<b>0,00135</b>	<b>1250</b>	<b>79,6000</b>	<b>9</b>	<b>1</b>
	A29	<b>Aço Fe-5Cr-Mo-V temperado e revenido</b>	<b>212,5</b>	<b>1655</b>	<b>120</b>	<b>0,00113</b>	<b>448,5</b>	<b>1,7300</b>	<b>1</b>	<b>7</b>

Fonte: adaptada de Bray (1990), MDC (2020), UL (2020), CES (2020); MatWeb (2020) e ÇALIŞKAN *et al.* (2013).

A Tabela 5 demonstra as propriedades, tanto dos materiais candidatos definidos por Çalişkan *et al.* (2013), quanto dos definidos pelo método 2SM, bem como suas classificações pelos métodos TOPSIS e VIKOR. As linhas destacadas, correspondem aos materiais que ocupam as cinco primeiras colocações em pelo menos um dos métodos de classificação.

Verifica-se, também, que ao serem incluídas novas opções de materiais candidatos, buscados pelo método 2SM, conforme a Tabela 5, que as alternativas A25, A22 e A23 não se apresentam mais dentre as cinco melhores classificadas, seja pela classificação do método TOPSIS ou VIKOR. Ou seja, dos nove materiais candidatos definidos por Çalişkan *et al.* (2013), dois deles ficaram entre os cinco melhores classificados. Ressalta-se que as alternativas A29 e A5 correspondem ao mesmo material, coincidindo em ambos os métodos de triagem, ocupando a primeira colocação.

Buscando evidenciar somente os materiais que melhor atendem aos requisitos, na Tabela 6, estão demonstrados os materiais que recebem classificação menor ou igual à 5ª posição em pelo menos um dos métodos de classificação.

Tabela 6 – Materiais que ocupam as 5 melhores classificações pelos métodos TOPSIS ou VIKOR

Alternativas	Materiais Candidatos	Módulo de elasticidade (GPa)	tensão de compressão (MPa)	tenacidade a fratura (MPa*m <sup>1/2</sup> )	coeficiente de perda mecânica	Dureza Vickers (HV)	custo (\$/kg)	Ranking TOPSIS	Ranking VIKOR
A2	Superliga à base de cobalto, MP159, tratada, trefilada a frio e envelhecida	243	1460	135	0,0005	600	10,4012	5	4
A3	Aço de alta liga, AF1410, solução tratada e envelhecida	208	1620	155	0,00113	550	19,0313	3	6
A5	Liga intermediária, aço de aeronaves Fe-5Cr-Mo-V, temperado e revenido	212,5	1655	120	0,00113	448,5	1,7300	1	7
A12	Molibdênio, liga 363, TZM	315	860	40	0,0002	310	10,6164	26	3
A13	Liga de níquel-cromo, HASTELLOY X, solução tratada	210,5	631,5	196	0,0006	180	8,1703	4	9
A18	Carboneto de tungstênio-cobalto (74,8)	459,5	3005	25,1	0,00135	801	61,0568	24	2
A19	Liga de tungstênio-Ni-Cu, CMW 1000	276	682,5	135	0,00025	270	37,1820	29	5
A28	Carboneto de tungstênio - cobalto (10%)	593	4405	14,05	0,00135	1250	79,6000	9	1
A29	Aço Fe-5Cr-Mo-V temperado e revenido	212,5	1655	120	0,00113	448,5	1,7300	1	7

Fonte: adaptada de Bray (1990), MDC (2020), UL (2020), CES (2020); MatWeb (2020) e Çalişkan *et al.* (2013).

Conforme a Tabela 6, dos nove materiais que foram classificados até a 5ª posição em pelo menos um dos métodos de classificação, dois deles são oriundos das considerações do trabalho de Çalişkan *et al.* (2013), e, outros sete, são do método de triagem 2SM.

Por fim, insta ressaltar que o único material que aparece entre as cinco primeiras posições, tanto pela classificação TOPSIS quanto VIKOR, é o A2. Isso porque os demais tiveram uma divergência classificatória entre os métodos de classificação, diferentemente da classificação demonstrada na Tabela 4, em que para ambos os métodos de classificação os materiais seguiram uma ordenação similar.

#### 4.2 SELEÇÃO DE MATERIAL PARA UM ESTRUTURA DE BICICLETA (*BICYCLE FRAME*)

O segundo caso de aplicação do método de triagem 2SM é baseado no trabalho de Maleque e Dyuti (2010), que realizaram a seleção de materiais para uma estrutura de bicicleta, usando dois métodos para a seleção de materiais, sendo eles o custo por unidade de propriedade e método da lógica digital.



Para definir os materiais candidatos, Maleque e Dyuti (2010) aplicaram as cartas de seleção de Ashby e Cebon (1993), e, com elas, estabeleceram que os grupos de materiais adequados para tal aplicação são os metais e ligas, cerâmicas e compósitos, resultando em cinco materiais candidatos, que podem ser observados na Tabela 7.

A associação dos materiais candidatos da Tabela 7 com critérios de intensidade linguísticos é realizada da mesma forma do estudo de caso referente ao *tool holder*, utilizando-se de onze variáveis linguísticas. Ainda, na Tabela 7, podem ser observados os materiais candidatos definidos por Maleque e Dyuti (2010), suas propriedades e respectivas associações linguísticas.

Tabela 7 – Propriedades dos materiais candidatos do estudo de caso de um porta-ferramentas e sua associação linguística com o método 2SM

Materiais candidatos	Propriedades				
	LRT (MPa)	TE (MPa)	YM (GPa)	FT (MPa*m <sup>1/2</sup> )	ρ (kg/m <sup>3</sup> )
Aço AISI 1020	380	200	210	41	7800
Ligas de titânio	950	910	100	50	4500
CFRP (Polímero reforçado com fibra de carbono)	550	200	56	2,6	1500
KFRP (Polímero reforçado com fibra de kevlar)	1380	621	76	2	1400
GFRP (polímero reforçado com fibra de grafite)	530	125	25	2	1800
Variável linguística associada	Média Baixa (ML)	Média (M)	Média Baixa (ML)	Muito Baixa (VL)	Alta (H)

Limite de resistência à tração (LRT), tensão de escoamento (TE), módulo de elasticidade (YM), tenacidade à fratura (FT) e massa específica (ρ).

Fonte: adaptado de Maleque e Dyuti (2010).

Da Tabela 9, se ressalta que foram evidenciadas divergências nos valores de tenacidade à fratura entre todos os materiais candidatos do trabalho de Maleque e Dyuti (2010) e a base de dados formada do método 2SM. Dessa forma, os valores foram ajustados de acordo com a base de dados do método 2SM, a fim de padronizar os dados e comparar os materiais candidatos de Maleque e Dyuti (2010) com os do método 2SM.

Também ressalta-se, que os critérios de corte linguísticos foram associados com 380MPa para a propriedade limite de resistência a tração, 125MPa para a tensão de escoamento, 25GPa para o módulo de elasticidade, 2MPa\*m<sup>(1/2)</sup> para a tenacidade a fratura e 7800kg/m<sup>3</sup> para a propriedade massa específica. Sendo assim, para propriedades de maximização, são

considerados os limites inferiores enquanto que para propriedades de minimização, consideram-se os limites superiores para associar as variáveis linguísticas propostas.

Com os ajustes realizados, as variáveis linguísticas foram associadas aos valores de corte das propriedades, definindo-se a associação dos critérios utilizados para cada propriedade. As propriedades, intensidades linguísticas e critérios utilizados podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades, intensidade linguística e critérios utilizados para aplicar o método 2SM no estudo de caso de um *bicycle frame*

Propriedade	Intensidade Linguística	Critério
Limite resistência à tração	Média Baixa (ML)	Maximização
Tensão de escoamento (MPa)	Média (M)	Maximização
Módulo de elasticidade (GPa)	Média Baixa (ML)	Maximização
Tenacidade à fratura (MPa $\sqrt{m}$ )	Muito Baixa (VL)	Maximização
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Alta (H)	Minimização

Fonte: elaborada pelo autor (2021).

Vale ressaltar, que as intensidades linguísticas evidenciadas na Tabela 8, se referem à intensidade linguística de corte, ou seja, para critérios de maximização, todas as variáveis referentes às propriedades mais desejáveis, por exemplo, a tensão de escoamento M, MH, H, VH, UH e EH, são aceitáveis, enquanto que, para critérios de minimização utiliza-se apenas a massa específica, sendo que as variáveis aceitáveis são H, MH, M, ML, L, VL, UL e EL.

Com as intensidades linguísticas associadas, bem como seus critérios definidos, foi aplicado o método 2SM para triagem preliminar dos materiais candidatos. Como resultado, foram obtidos 134 diferentes materiais na triagem preliminar.

Para reduzir, o número de materiais candidatos e formar o banco de materiais opcional, realizou-se o agrupamento de materiais pela sua similaridade, o que resultou em 24 grupos. Para cada grupo definido, foi selecionado o melhor material de cada grupo, por meio das equações (13), (14) e (15).

Os materiais candidatos selecionados pelo método 2SM para aplicar no estudo de caso de uma estrutura de bicicleta, estão demonstrados no Quadro 5.

Quadro 5 – Materiais candidatos para fabricação de um *bicycle frame*, definidos pelo método 2SM

Materiais Candidatos	
1	Aço ferramenta, AISI O6 (trabalho a frio de endurecimento de óleo)
2	Titânio, liga alfa-beta, Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo, triplex envelhecido
3	Aço inoxidável, martensítico, AISI 410, têmpera dura
4	Carboneto de silício, Tyranno M (8,5 microns, f)
5	Éster de cianato / fibra de carbono HM, UD prepreg, UD lay-up
6	Poliéster / fibra de vidro E, haste pultrudada
7	Aço martensítico, YS1200, laminado a quente
8	Aço de baixa liga, AISI 5046, temperado com óleo e revenido a 315 ° C
9	Fibra de aramida Kevlar 149
10	Duralcan Al-15Al2O3 (p) (W2A15A-T6)
11	Ferro fundido, dúctil austemperado, ADI 1600
12	Aço carbono, AISI 1060, temperado com óleo e revenido a 315 ° C
13	Bronze, CuMn13Al9, fundido (bronze de alumínio)
14	Boro (AVCO 102-200 micron, f)
15	Berílio (50-127 microns, f)
16	Amianto (branco) (f)
17	Alumínio, 2024, T861
18	Al-60% C-M40 (HM-C-fibra), longitudinal
19	Liga intermediária, aço de aeronaves Fe-5Cr-Mo-V, temperado e revenido
20	Liga de níquel-Co-Cr, IN-100, como fundido
21	Aço de fase dupla, YS600, laminado a frio
22	Aço de endurecimento por prensa, 22MnB5, austenizado e temperado com H2O

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Pode ser observado no Quadro 5 que, para fabricação de uma estrutura de bicicleta, o método 2SM teve uma maior abrangência para as classes dos materiais triados. Tais materiais são elencados como sendo ligas de aço, fibras, ligas de níquel, de alumínio, titânio, boro, dentre outras, isso demonstra que o método não se limitou a aços, fibras e ligas de titânio, conforme o trabalho de Maleque e Dyuti (2010).

Com os materiais candidatos definidos, parte-se para as etapas de classificação utilizadas por Maleque e Dyuti (2010), a fim de validar a eficácia do método proposto.

Assim, visando comparar os materiais opcionais do método 2SM com os materiais candidatos definidos por Maleque e Dyuti (2010), aplicam-se os métodos de classificação denominados custo por unidade de propriedade e método da lógica digital, considerando como materiais candidatos todos os materiais resultantes do agrupamento dos candidatos de ambos os métodos. Tanto os materiais candidatos quanto os resultados dos métodos do custo por unidade de propriedade e da lógica digital podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 – Comparativo entre materiais candidatos do estudo de Maleque e Dyuti (2010) com os do método 2SM e classificação

Métodos	Alternativas	Materiais Candidatos	Limite de resistência à tração (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tenacidade a fratura (MPa*m <sup>1/2</sup> )	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Custo \$/kg	Custo por unidade de resistência	Índice Performance	Figura do Mérito	Classificação custo por unidade de	Classificação figura do mérito
Método 2SM	A30	Aço ferramenta, AISI O6 (laminado a frio e endurecido com óleo)	2265	2035	209	20,15	7695	2,2	2,5	1654,3	0,0854	10	9
	A31	Titânio, liga alfa-beta, Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo, triplex envelhecido	1125	991,5	120,5	93,3	4505	19,7	26,3	912,5	0,0077	19	20
	A32	Aço inoxidável, martensítico, AISI 410, com têmpera	1315	1050	200	52	7750	1,1	2,3	1277,1	0,0730	9	10
	A33	Carboneto de silício, Tyranno M (8,5 microns, f)	2850	2375	197,5	2,8	2375	1673,2	464,8	1275,3	0,0012	23	26
	A34	Éster de cianato / fibra de carbono HM, UD prepreg, UD lay-up	2210	2210	337,5	53,65	1645	203,2	50,4	1132,1	0,0136	26	16
	<b>A35</b>	<b>Poliéster / fibra de vidro E, haste pultrudada</b>	<b>759</b>	<b>759</b>	<b>40</b>	<b>53,8</b>	<b>2000</b>	<b>1,7</b>	<b>1,5</b>	<b>527,7</b>	<b>0,1778</b>	<b>6</b>	<b>3</b>
	A36	Aço martensítico, YS1200, laminado a quente	1300	1025	210,5	138	7850	0,8	1,5	1306,0	0,1094	7	6
	<b>A37</b>	<b>Aço de baixa liga, AISI 5046, temperado com óleo e revenido a 315 ° C</b>	<b>1410</b>	<b>1160</b>	<b>206,5</b>	<b>54,5</b>	<b>7850</b>	<b>0,6</b>	<b>1,2</b>	<b>1331,7</b>	<b>0,1453</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
	A38	Fibra de aramida Kevlar 149	3400	2750	180	3	1470	125,0	18,0	1348,9	0,0509	17	11
	A39	Duralcan Al-15Al2O3 (p) (W2A15A-T6)	485	454,5	88,5	17,5	2975	6,4	13,1	505,3	0,0129	15	17
	<b>A40</b>	<b>Ferro fundido, dúctil austemperado, ADI 1600</b>	<b>1685</b>	<b>1365</b>	<b>159</b>	<b>44</b>	<b>7060</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>1329,0</b>	<b>0,4373</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
	<b>A41</b>	<b>Aço carbono, AISI 1060, temperado com óleo e revenido a 315 ° C</b>	<b>1105</b>	<b>780</b>	<b>212</b>	<b>45</b>	<b>7850</b>	<b>0,6</b>	<b>1,5</b>	<b>1185,4</b>	<b>0,1028</b>	<b>5</b>	<b>7</b>
	A42	Bronze, CuMn13Al9, fundido (bronze de alumínio)	780	425	120,5	33,2	7505	4,8	15,3	990,1	0,0086	16	19
	A43	Boro (AVCO 102-200 micron, f)	2250	1960	400	3	2515	527,4	196,5	1145,4	0,0023	24	24
	A44	Berílio (50-127 microns, f)	965	790	307	13	1855	338,0	216,6	584,3	0,0015	25	25
	<b>A45</b>	<b>Amianto (branco) (f)</b>	<b>3150</b>	<b>3150</b>	<b>165</b>	<b>4,5</b>	<b>2500</b>	<b>1,7</b>	<b>0,4</b>	<b>1544,4</b>	<b>1,3948</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
	A46	Alumínio, 2024, T861	468,5	431	73,85	39	2765	2,1	4,1	479,1	0,0427	12	12
	A47	Al-60% C-M40 (HM-C-fibra), longitudinal	1050	1050	245	13,5	2250	836,6	597,6	698,1	0,0005	27	27
	A48	Liga intermediária, aço de aeronaves Fe-5Cr-Mo-V, temperado e revenido	1795	1520	212,5	120	7780	20,3	29,3	1492,0	0,0065	20	21
	A49	Liga de níquel-Co-Cr, IN-100, como fundido	955	795	215	53,1	7750	18,4	49,7	1167,9	0,0030	22	23
A50	Aço de fase dupla, YS600, laminado a frio	1040	675	210,5	90,5	7850	0,7	1,7	1160,8	0,0877	8	8	
<b>A51</b>	<b>Aço de endurecimento por prensa, 22MnB5, austenizado e temperado</b>	<b>1575</b>	<b>1100</b>	<b>210,5</b>	<b>149</b>	<b>7850</b>	<b>0,6</b>	<b>1,1</b>	<b>1359,3</b>	<b>0,1649</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	
Maleque e Dyuti (2010)	A52	Aço AISI 1020	380	200	210	41	7800	0,5	3,4	932,3	0,0354	11	14
	A53	Liga de titânio	950	910	100	50	4500	12,9	20,4	853,0	0,0093	18	18
	A54	CFRP (Polímero reforçado com fibra de carbono)	550	200	56	2,6	1500	14,0	12,7	277,0	0,0145	14	15
	A55	KFRP (Polímero reforçado com fibra de kevlar)	1380	621	76	2	1400	25,2	8,5	480,1	0,0402	13	13
	A56	GFRP (polímero reforçado com fibra de grafite)	530	125	26	2	1800	38,7	43,8	276,3	0,0035	21	22

Fonte: adaptada de Bray (1990), MDC (2020), UL (2020), CES (2020); MatWeb (2020) e Maleque e Dyuti (2010).

Da Tabela 9 demonstra as propriedades, tanto dos materiais candidatos, definidos por Maleque e Dyuti (2010), quanto dos definidos pelo método 2SM, bem como suas classificações, pelo método do custo por unidade de resistência ou pelo método da lógica digital. As linhas destacadas, correspondem aos materiais que ocupam as cinco primeiras colocações em pelo menos um dos métodos de classificação.

Insta ressaltar que este trabalho não tem o objetivo de demonstrar os métodos de classificação, mas sim os métodos de triagem, de modo que os métodos de classificação utilizados servem para comparar os candidatos dos métodos de triagem avaliados. Os métodos

de classificação utilizados, podem ser melhor compreendidos no trabalho de Maleque e Dyuti (2010) e suas equações estão resumidas no apêndice.

Nota-se que nem todos os materiais candidatos poderão ser utilizados para a fabricação da estrutura de bicicleta, essa separação é objetivo da etapa de documentação e escolha do material final conforme demonstrado na Figura 3, etapa não abordada neste trabalho.

Em continuidade, para avaliar os resultados da classificação encontrados, primeiramente é importante evidenciarmos a classificação das alternativas definidas no trabalho de Maleque e Dyuti (2010), esta que pode ser visualizada na Tabela 10.

Tabela 10 – Classificação das alternativas do estudo de caso de um *bicycle frame*

Alternativa	Custo x unidade de resistência	Lógica digital
A52	2	2
A53	3	3
A54	5	5
A55	1	1
A56	4	4

Fonte: adaptada de Maleque e Dyuti (2010)

As cinco alternativas demonstradas na Tabela 10, ao serem submetidas aos métodos sugeridos por Maleque e Dyuti (2010), apresentam a mesma classificação em ambos os métodos classificatórios, sendo A55, A52, A53, A56 e A54 respectivamente.

A alternativa de material com melhor classificação, considerando a união dos materiais candidatos do método das cartas de seleção utilizadas por Maleque e Dyuti (2010), e os do método 2SM foi a A45 pela lógica digital e A40 pelo custo por unidade de propriedade. Sendo assim, as primeiras colocações dos materiais candidatos foram ocupadas pelos materiais triados pelo método 2SM.

Por fim, avaliando os materiais que ocuparam as cinco melhores classificações, nenhum material sugerido por Maleque e Dyuti (2010) entrou na seleção, sendo que o material que recebeu a melhor classificação foi a alternativa A55, ficando na 13ª posição.

#### 4.3 SELEÇÃO DE MATERIAL PARA UM VOLANTE DE INÉRCIA (*FLYWHEEL*)

O terceiro estudo de caso de aplicação do método de triagem proposto é baseado no trabalho de Purohit e Ramachandran (2015), que realizou a seleção de materiais para um volante de inércia, utilizando o método de tomada de decisão Fuzzy TOPSIS para classificação das alternativas.

Os materiais candidatos para aplicar ao volante de inércia sugeridos por Purohit e Ramachandran (2015) foram buscados da literatura, não utilizando nenhum dos métodos de triagem descritos neste trabalho, e podem ser observados na Tabela 11. A associação dos materiais candidatos da Tabela 11 com critérios de intensidade linguísticos é realizada da mesma forma dos estudos de caso referente ao porta ferramentas e a estrutura de bicicleta, utilizando-se de onze variáveis linguísticas.

Sendo assim, no Tabela 11, podem ser observadas as associações linguísticas para os materiais candidatos definidos por Purohit e Ramachandran (2015), suas respectivas propriedades.

Tabela 11 – Propriedades dos materiais candidatos do estudo de caso de um volante de inércia e sua associação linguística com o método 2SM

Materiais candidatos	Propriedades				
	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	HHH (HV)	YM (GPa)	BM	$\eta$
Aço carbono 1065	7850	187	210	140	0,27 – 0,30
Aço ligado AISI 4340	7850	217	196	140	0,27 – 0,30
Aço Maraging 18Ni	8100	290	210	160	0,3
Aço ligado AISI E9310	7850	241	190	140	0,27 – 0,30
Aço Inoxidável	7750	219	190	134	0,26 – 0,27
Variável linguística associada	Alta (H)	Alta (H)	Muito alta (VH)	Alta (H)	Muito baixa (VL)

Fonte: adaptado de Purohit e Ramachandran (2015).

Ressalta-se, que para os critérios de maximização, as variáveis de corte linguísticas têm como base o menor valor dos materiais candidatos definidos pelos autores, enquanto que para objetivos de minimização, o valor de corte é obtido pelo maior valor dos materiais candidatos. Assim, conforme dados demonstrados na Tabela 11, as variáveis de corte foram associadas com 7750 kg/m<sup>3</sup> para a propriedade massa específica, 187 HV para a dureza, 190 GPa para o módulo de elasticidade, 134 GPa para o módulo de bulk (ou de massa) e 0,26 para o coeficiente de Poisson. Sendo assim, todas as propriedades apresentam objetivos de maximização, de modo que são considerados os limites inferiores para associar as variáveis linguísticas propostas.

Sendo assim, as variáveis linguísticas foram associadas aos valores de corte das propriedades, com isso definiram-se as associações dos critérios para cada propriedade. As

propriedades, intensidades linguísticas e critérios utilizados podem ser observados na Tabela 12.

Tabela 12 – Propriedades, intensidade linguística e critérios utilizados para aplicar o método 2SM no estudo de caso de um volante de inércia

<b>Propriedade</b>	<b>Intensidade Linguística</b>	<b>Critério</b>
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Média Baixa (ML)	Maximização
Dureza (HV)	Média (M)	Maximização
Módulo de elasticidade (GPa)	Média Baixa (ML)	Maximização
Módulo de Bulk (GPa)	Muito Baixa (VL)	Maximização
Coefficiente de Poisson	Alta (H)	Maximização

Fonte: elaborada pelo autor (2021).

As intensidades linguísticas, evidenciadas na Tabela 12, se referem às intensidades linguísticas de corte, ou seja, como os critérios são todos de maximização, todas as variáveis mais desejáveis, limitadas pela variável de corte são aceitáveis, por exemplo, para a massa específica, as variáveis aceitáveis são ML, M, MH, H, VH, UH e EH.

Com as intensidades linguísticas associadas, bem como seus critérios definidos, foi aplicado o método 2SM, para triagem preliminar dos materiais candidatos. Como resultado, foram obtidos 691 diferentes materiais na triagem preliminar. Para reduzir, o número de materiais candidatos e formar o banco de materiais opcional, realizou-se o agrupamento de materiais pela sua similaridade, resultando em 13 grupos. Para cada grupo definido, foi selecionado o melhor material de cada grupo, por meio das equações (13), (14) e (15).

Os materiais candidatos selecionados pelo método 2SM para aplicação no estudo de caso de um volante de inércia estão demonstrados no Quadro 6.

Quadro 6 – Materiais candidatos para fabricação de um volante de inércia, definidos pelo método 2SM

<b>Materiais Candidatos</b>	
1	Aço carbono, AISI 1040, temperado com água e revenido a 205 ° C
2	Aço de baixa liga, 300M (baixo carbono), temperado e revenido
3	Aço de endurecido por prensa, 22MnB5, austenizado e temperado com H20, não revestido
4	Aço ferramenta, liga de tungstênio, AISI T4 (alta velocidade)
5	Aço inoxidável, austenítico, AISI 316LVM, trabalhado a frio
6	Liga de níquel-cromo, INCONEL 706, solução tratada
7	Liga de platina-irídio, dura, 25% Ir
8	Liga de tântalo-W-Hf, T-111

Continua

## Conclusão

Materiais Candidatos	
9	Liga intermediária, aço de aeronaves Fe-5Cr-Mo-V, temperado e revenido
10	Molibdênio, grau 360, fio, 150 µm diâm.
11	Rênio, pureza comercial, duro
12	Superliga de cobalto, multifásica, MP159, tratada com solução, trefilada a frio e envelhecida
13	Tungstênio, pureza comercial, R07004, fio

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Observa-se no Quadro 6, que para fabricação de um volante de inércia, assim como nos outros estudos de caso citados anteriormente, houve uma maior abrangência para as classes dos materiais triados. Tais materiais são elencados como sendo ligas de aço, ligas de níquel-cromo, platina-irídio, tântalo, dentre outras, isso demonstra que o método não se limitou a aços, fibras e ligas de titânio, conforme o trabalho de Purohit e Ramachandran (2015).

Com os materiais triados, utilizou-se dos valores de  $\beta$  associados a cada candidato e sua respectiva propriedade, seguindo para a etapa de classificação. Para este caso, devido à Purohit e Ramachandran (2015) utilizarem sete variáveis linguísticas e todo método 2SM estar desenvolvido para onze variáveis, foi utilizado o método TOPSIS 2-tuple para classificação das alternativas, a fim de se comparar os materiais triados pelo método 2SM com os materiais candidatos do trabalho de Purohit e Ramachandran (2015), buscando validar a eficácia do método de triagem proposto. A Tabela 13, evidencia os resultados da classificação.

Tabela 13 – Comparativo entre materiais candidatos e ranking do estudo de Purohit e Ramachandran (2015) com método 2SM

Métodos	Alternativas	Materiais Candidatos	$\beta$ Massa específica	$\beta$ Dureza	$\beta$ Módulo de elasticidade	$\beta$ Módulo de Bulk	$\beta$ Coeficiente de Poisson	Classificação TOPSIS
Método 2SM	<b>A57</b>	<b>Tungstênio, pureza comercial, R07004, fio</b>	<b>9,86</b>	<b>8,90</b>	<b>9,58</b>	<b>9,50</b>	<b>2,50</b>	<b>5</b>
	A58	Aço ferramenta, liga de tungstênio, AISI T4 (alta velocidade)	8,57	9,51	8,74	8,74	3,50	9
	<b>A59</b>	<b>Liga de tântalo-W-Hf, T-111</b>	<b>9,74</b>	<b>7,54</b>	<b>7,80</b>	<b>8,78</b>	<b>5,67</b>	<b>3</b>
	A60	Aço inoxidável, austenítico, AISI 316LVM, trabalhado a frio	7,69	7,75	7,50	8,71	5,67	10
	A61	Rênio, pureza comercial, duro	9,93	8,90	9,62	9,50	1,85	8
	A62	Aço de endurecimento por prensa, 22MnB5, austenizado e temperado com água	7,50	8,61	7,97	8,50	3,67	14
	<b>A63</b>	<b>Liga de platina-irídio, dura, 25% Ir</b>	<b>9,96</b>	<b>7,65</b>	<b>8,86</b>	<b>9,50</b>	<b>7,50</b>	<b>1</b>
	<b>A64</b>	<b>Liga de níquel-cromo, INCONEL 706, solução tratada</b>	<b>7,81</b>	<b>7,84</b>	<b>8,57</b>	<b>9,50</b>	<b>7,95</b>	<b>4</b>
	A65	Molibdênio, grau 360, fio, 150 µm diâmetro	8,82	8,68	9,54	9,50	3,67	7
	A66	Aço de baixa liga, 300M (baixo carbono), temperado e revenido	6,99	8,76	7,97	8,73	4,90	12

Continua



## Conclusão

Métodos	Alternativas	Materiais Candidatos	$\beta$ Massa específica	$\beta$ Dureza	$\beta$ Módulo de elasticidade	$\beta$ Módulo de Bulk	$\beta$ Coeficiente de Poisson	Classificação TOPSIS
Método 2SM	A67	Liga intermediária, aço de aeronaves Fe-5Cr-Mo-V, temperado e revenido	6,94	8,77	8,54	9,50	7,65	6
	<b>A68</b>	<b>Superliga à base de cobalto, multifásica, MP159, tratada com solução, trefilada a frio e envelhecida</b>	<b>8,52</b>	<b>8,76</b>	<b>8,80</b>	<b>9,50</b>	<b>7,80</b>	<b>2</b>
	A69	Aço carbono, AISI 1040, temperado em água e revenido a 205 ° C	7,50	8,63	8,55	8,52	3,50	13
Purohit e Ramachandran (2015)	A71	Aço carbono 1065	7,50	6,70	8,57	6,84	3,50	15
	A72	Aço ligado AISI 4340	7,50	6,88	7,83	6,84	3,50	16
	A73	Aço Maraging 18Ni	7,89	7,69	8,57	8,51	4,50	11
	A74	Aço ligado AISI E9310	7,50	7,51	7,63	6,84	3,50	17
	A75	Aço Inoxidável	6,95	6,89	7,63	6,72	1,95	18

Fonte: adaptada de Bray (1990), MDC (2020), UL (2020), CES (2020); MatWeb (2020) e Purohit e Ramachandran (2015).

Com a classificação realizada, observa-se na Tabela 13, que a associação das propriedades de cada alternativa, foram associadas com o valor numérico que representa a informação linguística ( $\beta$ ) tanto dos materiais candidatos, definidos por Purohit e Ramachandran (2015), quanto dos definidos pelo método 2SM, bem como suas classificações, pelo método TOPSIS. As linhas destacadas, correspondem aos materiais que ocupam as cinco primeiras colocações da classificação.

Em continuidade, para avaliar os resultados da classificação encontrados, primeiramente é importante evidenciarmos a classificação das alternativas definidas no trabalho de Purohit e Ramachandran (2015), esta que pode ser visualizada na Tabela 14.

Tabela 14 – Classificação das alternativas do estudo de caso de um volante de inércia

Alternativa	Classificação TOPSIS
A71	2
A72	3
A73	1
A74	4
A75	5

Fonte: adaptada de Maleque e Dyuti (2010).

A alternativa de material com melhor classificação, considerando a união dos materiais candidatos de Purohit e Ramachandran (2015) com os do método 2SM foi a A63, seguido pelo A68 A59 A64 e A57. Sendo assim, as cinco primeiras colocações foram ocupadas pelos materiais triados pelo método 2SM.

Por fim, dos materiais utilizados no trabalho de Purohit e Ramachandran (2015), o melhor classificado foi a alternativa A73, que ficou na 11ª colocação, assim, os dez primeiros colocados são triados pelo método 2SM.

Outra questão muito importante que possui relevância de discussão, é a presença de materiais candidatos com custos extremamente altos (EH) entre os candidatos opcionais. Isso ocorre, pois como Purohit e Ramachandran (2015) não utilizaram o custo do material como um critério de triagem, a triagem realizada pelo método 2SM, resultou em materiais inviáveis economicamente, porém, segundo Jahan *et al.* (2010) o custo é uma variável muito importante na seleção de materiais, sendo relevante considerá-lo no início do processo de seleção de materiais. Dessa forma, é incluído o custo como um critério e realizada a triagem pelo método 2SM.

Para isso, considera-se o material de maior custo entre os candidatos opcionais de Purohit e Ramachandran (2015), como sendo o aço maraging 18Ni, apresentando o custo de \$19,77/kg, assim recebe a associação linguística, no método 2SM, de muito alto (VH). Diante disso, o custo é inserido como um critério de triagem em que valores aceitáveis devem ser menores ou iguais à variável linguística VH.

Assim, na Tabela 15 pode ser observado o novo conjunto de materiais candidatos triados pelo método 2SM, incorporados aos candidatos definidos por Purohit e Ramachandran (2015), assim como a classificação dos materiais pelo método TOPSIS.

Tabela 15 – Comparativo entre materiais candidatos e ranking do estudo de Purohit e Ramachandran (2015) com método 2SM, incluindo custo como critério de minimização

Métodos	Alternativas	Materiais Candidatos	$\beta$ Massa específica	$\beta$ Dureza	$\beta$ Módulo de elasticidade	$\beta$ Módulo de Bulk	$\beta$ Coeficiente de Poisson	$\beta$ Custo	Classificação TOPSIS
Método 2SM	A76	Aço ferramenta, AISI W1 (endurecimento com água)	6,969	8,71	8,52	8,52	3,50	2,67	9
	A77	Aço inoxidável martensítico, AISI 440C, temperado a 316 ° C	6,898	8,81	7,63	6,84	2,66	0,93	8
	A62	<b>Aço de endurecimento por prensa, 22MnB5, austenizado e temperado com H20, não revestido</b>	<b>7,500</b>	<b>8,61</b>	<b>7,96</b>	<b>8,50</b>	<b>3,66</b>	<b>0,50</b>	<b>3</b>
	A64	Liga de níquel-cromo, INCONEL 706, solução tratada	7,810	7,84	8,56	9,51	7,95	6,56	11

Continua

## Conclusão

Métodos	Alternativas	Materiais Candidatos	$\beta$ Massa específica	$\beta$ Dureza	$\beta$ Módulo de elasticidade	$\beta$ Módulo de Bulk	$\beta$ Coeficiente de Poisson	$\beta$ Custo	Classificação TOPSIS
Método 2SM	A65	Molibdênio, grau 360, fio, 150 $\mu\text{m}$ diâm.	8,817	8,68	9,54	9,50	3,66	6,89	13
	<b>A81</b>	<b>Aço de baixa liga, AISI 4130, fundido a ar, temperado e revenido</b>	<b>6,990</b>	<b>8,57</b>	<b>7,96</b>	<b>8,73</b>	<b>4,90</b>	<b>0,54</b>	<b>1</b>
	<b>A82</b>	<b>Aço de fase dupla, YS600, laminado a frio</b>	<b>7,500</b>	<b>7,69</b>	<b>7,96</b>	<b>8,57</b>	<b>3,53</b>	<b>0,54</b>	<b>4</b>
	A68	Superliga à base de cobalto, multifásica, MP159, tratada com solução, trefilada a frio e envelhecida	8,522	8,75	8,80	9,50	7,80	6,90	12
	<b>A70</b>	<b>Aço carbono, AISI 1040, temperado com água e revenido a 205 ° C</b>	<b>7,500</b>	<b>8,63</b>	<b>8,55</b>	<b>8,51</b>	<b>3,50</b>	<b>0,50</b>	<b>2</b>
Purohit e Ramachandran (2015)	<b>A71</b>	<b>Aço carbono 1065</b>	<b>7,50</b>	<b>6,70</b>	<b>8,57</b>	<b>6,84</b>	<b>3,50</b>	<b>0,53</b>	<b>5</b>
	A72	Aço ligado AISI 4340	7,50	6,88	7,83	6,84	3,50	0,74	6
	A73	Aço Maraging 18Ni	7,89	7,69	8,57	8,51	4,50	7,69	14
	A74	Aço ligado AISI E9310	7,50	7,51	7,63	6,84	3,50	0,83	7
	A75	Aço Inoxidável	6,95	6,89	7,63	6,72	1,95	1,75	10

Fonte: adaptada de Bray (1990), MDC (2020), UL (2020), CES (2020), MatWeb (2020) e Purohit e Ramachandran (2015).

O resultado da triagem evidenciado na Tabela 15 demonstra que com a inclusão do critério custo como restrição com o objetivo de minimizá-lo, dos 13 materiais triados anteriormente pelo método 2SM, que estão demonstrados na Tabela 13, restaram nove candidatos, desses apenas as alternativas A62, A64, A65, A68 e A70 coincidiram nas triagens com e sem consideração do custo.

Com as alternativas definidas, é realizada a classificação dos candidatos, buscando a verificação da eficácia do método 2SM. Assim, considerando os cinco melhores classificados pelo método TOPSIS, apenas a alternativa A71, classificada na 5ª posição, é representante dos materiais triados por Purohit e Ramachandran (2015), enquanto que as quatro primeiras posições foram ocupadas por materiais candidatos triados pelo método 2SM.

Assim, verifica-se que o método 2SM apresenta uma grande velocidade em sua aplicação, devido a facilidade de atribuição linguística e rápido processamento, e se mostra eficaz na seleção de materiais candidatos, para um *tool holder*, uma estrutura de bicicleta, bem como um volante de inércia. Isso porque, resultou em diversas alternativas classificadas entre as cinco melhores posições, evidenciadas aplicando os métodos de classificação dos estudos de caso, e em todos as alternativas tiveram maior participação entre os cinco primeiros colocados.

Ademais, o método 2SM, além de aumentar o campo de materiais candidatos, em ambos os estudos de caso, mostrou que os materiais alternativos triados tiveram uma classificação melhor que os materiais candidatos definidos nos estudos de caso avaliados, tanto utilizando os mesmos métodos de classificação dos autores dos estudos de caso, quanto com métodos ligeiramente diferentes. Sendo assim, conclui-se que o método 2SM, além de apresentar grande facilidade de aplicação e rápido processamento das informações, demonstra grande eficiência no retorno de materiais candidatos triados por critérios linguísticos, sendo uma alternativa válida para o processo de seleção de materiais, mais especificamente para a etapa de triagem de materiais candidatos.

Outra questão muito importante, que deve ser evidenciada, é a quantidade de materiais cadastrados na base de dados, essa quantidade deve ser a maior possível para garantir que nenhuma alternativa fique de fora do processo de triagem. Quanto maior o número de materiais cadastrados no banco de dados, maior a possibilidade de retornar o melhor material disponível para a aplicação a ser realizada, também possibilitará uma maior abrangência das alternativas disponíveis para a triagem, tornando o processo de seleção como um todo mais eficiente e preciso.

Insta ressaltar que o trabalho se limitou a apenas uma etapa do processo de seleção de materiais. Dessa forma, a proposta aplicada de forma isolada não soluciona o problema de seleção como um todo, apresentando, assim, um método para uma de suas etapas.

Também, esteve limitado a 18 propriedades e 3976 materiais candidatos cadastrado na base de dados, propriedades suficientes para buscar a validação do método 2SM com os estudos de caso da literatura.

Outra limitação deste estudo foi a comparação com trabalhos de seleção de materiais existentes, não aplicando a um caso real de seleção de materiais. Além disso, para sua validação realizou a conversão quantitativa dos materiais candidatos em variável linguística para os candidatos dos trabalhos de Çaliskan *et al.* (2013), Maleque e Dyuti (2010) e Purohit e Ramachandran (2015), pois as variáveis linguísticas diretas informadas pelos autores não tiveram correspondência com as variáveis do trabalho.

Além dessas, foi limitado a comparação com métodos de triagem que utilizaram o *software* CES EduPack, que tem como princípio o método das cartas de seleção desenvolvidas por Ashby e Cebon (1993).

## 5 CONCLUSÃO

O método de triagem desenvolvido neste trabalho, foi pautado nos desafios encontrados nas etapas de seleção de materiais, de modo que buscou uma alternativa para dar agilidade e eficiência a uma das etapas fundamentais do processo, que é a triagem. Deste modo, este trabalho propôs o desenvolvimento de um método multicritério linguístico para a etapa de triagem do processo de seleção de materiais, com a finalidade de tornar o processo de seleção de materiais mais ágil e preciso. Com a interação e atribuição de requisitos linguísticos pelo usuário para os requisitos de projeto relativos aos materiais, a etapa de triagem torna-se mais ágil e apresenta precisão na obtenção do conjunto de materiais candidatos para serem utilizados nas etapas subsequentes do processo de seleção de materiais.

O método desenvolvido se iniciou pela formação de um banco de dados de materiais e suas propriedades. Desse modo, foi realizado o agrupamento de materiais para cada propriedade individualizada, utilizando, para tanto, as medidas separatrizes, mais especificamente, os percentis. Em seguida, atribuíram-se variáveis linguísticas às propriedades quantitativas dos grupos de materiais. Assim, com os grupos e suas associações linguísticas definidas, o método conjuntivo de triagem foi formado e denominado 2SM, no qual o usuário informa o objetivo desejado para cada propriedade e sua intensidade linguística para que a triagem seja realizada.

A fim de demonstrar a aplicabilidade do método proposto, foi realizada a aplicação em três estudos da literatura, em que se buscou a associação da propriedade quantitativa dos materiais candidatos em termos de variáveis linguísticas, para a realização da triagem pelo método 2SM.

Para o estudo de caso referente ao trabalho de Çaliskan *et al.* (2013), após a conversão e aplicação no método 2SM, resultou em vinte materiais candidatos, a serem incrementados aos outros nove materiais candidatos obtidos no trabalho de Çaliskan *et al.* (2013), a etapa de triagem se apresentou muito rápida, pela grande facilidade de processamento dos dados e agilidade no processamento das informações linguísticas. Os materiais resultantes da etapa de triagem foram utilizados na etapa de classificação, possibilitando a tomada de decisão e aplicação em um *tool holder*.

Feita a classificação dos materiais candidatos, por meio do processo de classificação dos métodos TOPSIS e VIKOR, foi evidenciado que dos nove materiais candidatos definidos por Çaliskan *et al.* (2013), apenas duas alternativas ficaram entre as cinco melhores em pelo menos um dos métodos classificatórios, enquanto que o método 2SM teve sete

candidatos classificados de 1º a 5º em pelo menos um dos métodos classificatórios. Apenas a alternativa A2, identificada pelo método 2SM ficou classificada nos dois métodos de classificação simultaneamente, apresentando uma maior estabilidade classificatória.

Tanto para o estudo de caso da estrutura de bicicleta, realizado por Maleque e Dyuti (2010), quanto para o estudo do volante de inércia de Purohit e Ramachandran (2015), sem a consideração do custo, os materiais candidatos utilizados para a classificação, não tiveram ocupação dentre os dez primeiros classificados, sendo todas as dez primeiras posições ocupadas pelos materiais triados pelo método 2SM.

Entre os três estudos de caso, somados com os candidatos do método 2SM, resultaram em 82 materiais candidatos, desses, 19 correspondem aos materiais triados pelos trabalhos de Çaliskan *et al.* (2013), Maleque e Dyuti (2010) e Purohit e Ramachandran (2015), enquanto que 63 são resultantes apenas da triagem pelo método 2SM. Assim, todos foram utilizados nos métodos de classificação subsequentes.

Diante dos 19 materiais candidatos dos estudos de caso, apenas três ficaram classificados entre as cinco primeiras colocações ao passarem pela etapa de classificação e união com os materiais candidatos do método 2SM, enquanto que o método 2SM obteve 22 materiais ocupando as cinco primeiras colocações.

Com isso, considerando a representatividade dos cinco primeiros colocados, ao todo 25 materiais ocuparam as cinco primeiras colocações nos três estudos de caso, destes 22 são representantes do método 2SM, correspondendo a 88% de representatividade, enquanto que os candidatos resultantes dos estudos dos autores, correspondem a 12% de representatividade para as cinco primeiras colocações. Essa análise demonstra que uma vantagem do método 2SM na etapa de triagem, em relação aos métodos dos estudos de caso que utilizaram as cartas de seleção é a maior representatividade dos materiais candidatos ocupando as primeiras colocações, com isso, e, deste modo, evidenciando a sua eficácia.

Como sugestão de trabalhos futuros, evidencia-se a possibilidade de criação de um *software*, buscando facilitar o cadastro de novos materiais, bem como a atribuição de classes para agilizar a triagem posterior no momento do cadastro. Também, sugere-se estudar a incorporação de um método de classificação ao método de triagem, pois com o método de triagem definido, é facilitada a incorporação de um método de classificação. Outra sugestão, é criar um método que facilite a alteração do número de variáveis linguísticas, assim como desenvolver uma equação permitindo a associação linguística direta do número de intervalos definido pelo decisor com a equação dos percentis, permitindo que o método calcule os intervalos e crie associações linguísticas para cada intervalo automaticamente,

independentemente do número de intervalos ou variáveis linguísticas definidas pelo decisor. Por fim, também se sugere a aplicação do método proposto em um caso de seleção de materiais real, buscando sua validação nesse tipo de estudo.

## REFERÊNCIAS

- ABDALLA, H. S.; KNIGHT, J. An expert system for concurrent product and process design of mechanical parts. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, part B, Journal of engineering manufacture**, v. 208, n. 3, p. 167-172, 1994.
- ACEVES, C. M. *et al.* Design selection methodology for composite structures. **Materials and Design**, v. 29, n. 2, p. 418–426, 2008.
- AGUIAR NETO, Ruy Rosado. **Estatística básica aplicada à administração judiciária**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Curso de pós-graduação Poder Judiciário. Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 2009.
- ALGHAMDY, M. *et al.* Material selection methodology for additive manufacturing applications. **Procedia CIRP**, v. 84, p. 486–490, 2019.
- ALI, B. A. *et al.* Java based expert system for selection of natural fibre composite materials. **Journal of Food, Agriculture and Environment**, v. 11, p. 1871-1877, 2013.
- ALI, B. A. *et al.* Expert Material selection for manufacturing of green bio composites. **Green Energy and Technology**, springer, Cham, p. 1-12, 2017.
- ALTMAN, D. G.; BLAND, J. M. Statistics notes: quartiles, quintiles, centiles, and other quantiles. **Bmj**, v. 309, n. 6960, p. 996, 1994.
- ASHBY, M. F. Materials selection in conceptual design. **Materials science and technology**, v. 5, n. 6, p. 517-525, 1989.
- ASHBY, M. F.; CEBON, D. Materials selection in mechanical design. **Le Journal de Physique IV**, v. 3, n. C7, p. C7-1-C7-9, 1993.
- ASHBY, M. F.; BRÉCHET, Y. Materials selection for a finite life time. **Advanced Engineering Materials**, v. 4, n. 6, p. 335–341, 2002.
- ASHBY, M. F. *et al.* Selection strategies for materials and processes. **Advanced Engineering Materials**, v. 4, n. 6, p. 327–334, 2002.
- ASHBY, M. F. *et al.* The CES EduPack Eco Audit Tool. **A White Paper**, Cambridge, 2008.
- ASHBY, M. F. **Seleção de materiais no projeto mecânico**. V. 1. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- ASHBY, M. F. *et al.* **Materials: engineering, science, processing and design**. Butterworth-Heineman,. v. 13, 2018.
- BARRENECHE , C. *et al.* New database to select phase change materials: Chemical nature, properties, and applications. **Journal of Energy Storage**, v. 3, p. 18–24, 2015.
- BENAFAN, O.; BIGELOW, G. S.; YOUNG, A. W. Shape memory materials database tool: A compendium of functional data for shape memory materials. **Advanced Engineering**



**Materials**, v. 22, n. 7, 2020.

BORTOLUZZI, S. C. *et al.* Avaliação de desempenho de redes de pequenas e médias empresas (PMES): lacunas e oportunidades de pesquisa. **Revista Gestão Industrial**, v. 9, n. 4, p. 886–906, 2014.

BRAY J. W. Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials. **ASM Metals handbook**, v. 92, 1990.

BROEREN, M. L. M. *et al.* Early-stage sustainability assessment to assist with material selection: a case study for biobased printer panels. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 30–41, 2016.

BROWN, J. P. The economic effects of floods: Investigations of a stochastic model of rational investment behavior in the face of floods. **Springer Science & Business Media**, New York, 1972.

BRUNI, A. L. **Estatística aplicada à gestão empresarial**. São Paulo: Atlas, 2007.

BUGGY, M.; CONLON, C. Material selection in the design of electrical connectors. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 153, p. 213–218, 2004.

BULLINGER, H. J. *et al.* Knowledge-based system for material selection for design with new materials. **Knowledge-Based Systems**, v. 4, n. 2, p. 95–102, 1991.

ÇALIŞKAN, H. *et al.* Material selection for the tool holder working under hard milling conditions using different multi criteria decision making methods. **Materials and Design**, v. 45, p. 473–479, 2013.

CES: base de dados. Disponível em: <<http://www-g.eng.cam.ac.uk/125/now/ces.html>>. Acesso em: 26 abr. 2020.

CHEN, J. L. *et al.* An intelligent data base system for composite material selection in structural design. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 50, n. 5–6, p. 935–946, 1995.

CHINER, M. Planning of expert systems for materials selection. **Materials and Design**, v. 9, n. 4, p. 195–203, 1988.

DJASSEMI, M. A computer-aided approach to material selection and environmental auditing. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 23, n. 6, p. 704–716, 2012.

DURYAT, R. S. Evaluation of C/C-SiC Composites as Potential Candidate Materials for High Performance Braking Systems. *In*: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1, v. 131, 2016, Indonesia. **Anais [...]**. Indonesia, 2016.

FARAG, M. M. Quantitative Methods of Materials Selection. *In*: Kutz, M. **Handbook of Materials Selection**. New York: John Wiley & Sons, p. 3-24, 2002.

FARAG, M. M. Quantitative methods of materials selection. **Mechanical Engineers' Handbook**, v. 1, 2015.

FAYAZBAKSH, K. *et al.* Introducing a novel method for materials selection in mechanical design using Z-transformation in statistics for normalization of material properties. **Materials & Design**, v. 30, n. 10, p. 4396-4404, 2009.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1996.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

GILBRIDE, T. J.; ALLENBY, G. M. A choice model with conjunctive, disjunctive, and compensatory screening rules. **Marketing Science**, v. 23, n. 3, p. 391–406, 2004.

GOEL, V.; CHEN, J. Application of expert network for material selection in engineering design. **Computers in Industry**, v. 30, n. 2, p. 87–101, 1996.

HAEFNER, N. *et al.* Artificial intelligence and innovation management: A review, framework, and research agenda. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 162, p. 120392, 2021.

HERRERA, F.; MARTÍNEZ, L. A 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words. **IEEE Transactions on fuzzy systems**, v. 8, n. 6, p. 746–752, 2000.

HUANG, J. J. *et al.* A revised VIKOR model for multiple criteria decision making-The perspective of regret theory. **International Conference on Multiple Criteria Decision Making**. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 761-768, 2009.

HWANG, C. L.; YOON, K. **Multiple attribute decision making: methods and applications**. Berlin: Springer-Verlag, 1981.

HYNDMAN, R. J.; FAN, Y. Sample quantiles in statistical packages. **The American Statistician**, v. 50, n. 4, p. 361–365, 1996.

JAHAN, A. *et al.* Material screening and choosing methods: A review. **Materials & Design**, v. 31, n. 2, p. 696–705, 2010.

JALHAM, I. S. Decision-making integrated information technology (IIT) approach for material selection. **International Journal of Computer Applications in Technology**, v. 25, n. 1, p. 65–71, 2006a.

JALHAM, I. S. Computer-aided quality function deployment method for material selection. **International Journal of Computer Applications in Technology**, v. 26, n. 4, p. 190–196, 2006b.

KAHRAMAN, C. **Fuzzy multi-criteria decision making**. New York: Springer Science+Business Media, 2008.

KHAN, K. S. *et al.* Five steps to conducting a systematic review. **Journal of the royal society of medicine**, v. 96, n. 3, p. 118–121, 2003.

KRENKEL, W.; BERNDT, F. C/C-SiC composites for space applications and advanced

- friction systems. **Materials Science and Engineering A**, v. 412, n. 1–2, p. 177–181, 2005.
- LACERDA, R. T. *et al.* Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. **Gestão & Produção**, v. 19, n. 1, p. 59–78, 2012.
- LANGFORD, E. Quartiles in elementary statistics. **Journal of Statistics Education**, v. 14, n. 3, 2006.
- LEVIN, Jack; FOX, James Alan. Estatística para ciências humanas. *In: Estatística para ciências humanas*. 2004. p. xv, 497-xv, 497.
- LIAO, T. Warren. A fuzzy multicriteria decision-making method for material selection. **Journal of manufacturing systems**. v. 15, n. 1, p. 1-12, 1996.
- LIMA, L. de. **Estatística aplicada**. Fortaleza: UAB/IFCE, 2009.
- MACK, N. *et al.* **Qualitative Research Methods: a data collector's field guide**. North Carolina: Family Health International, 2005.
- MALEQUE, M. A.; DYUTI, S. Materials selection of a bicycle frame using cost per unit property and digital logic methods. **International Journal of Mechanical and Materials Engineering**, v. 5, n. 1, p. 95–100, 2010.
- MALEQUE, M. A.; ARIFUTZZAMAN, A. Digital logic and knowledge-based system for the automotive piston material selection. **International Journal of Materials and Structural Integrity**, v. 6, n. 2–4, p. 134–150, 2012.
- MATWEB: base de dados: Disponível em: <<http://www.matweb.com/index.aspx>>. Acesso em: 18 mar. 2020.
- MDC: base de dados: Disponível em: <<https://www.materialdatacenter.com/mb/>>. Acesso em: 10 abr. 2020.
- MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. **Estatística Básica**. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2010.
- OPRICOVIC, S. **Multicriteria Optimization of Civil Engineering Systems**. 1998. Tese (PhD). Faculty of Civil Engineering, Belgrade. 1998.
- OUTEIRO, M. T. Manual de trabalhos acadêmicos à luz das normas técnicas. 1.ed. Pato Branco: Gráfica Yumi, 2019.
- PAPILE, F. *et al.* Material selection as cooperative process: a framework proposal for a changing economy. **Proceedings of the Design Society**, v. 1, p. 2017-2026, 2021.
- PEÇAS, P. *et al.* Comprehensive approach for informed life cycle-based materials selection. **Materials & Design**, v. 43, p. 220–232, 2013.
- PUROHIT, Pulkit; RAMACHANDRAN, M. Selection of flywheel material using multicriteria decision making fuzzy TOPSIS. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 8, n. 33, p. 1-5, 2015.

QIU, L. M. *et al.* Material selection combined with optimal structural design for mechanical parts. **Journal of Zhejiang University: Science A**, v. 14, n. 6, p. 383–392, 2013.

RAKSHIT, S.; ANANTHASURESH, G. K. Simultaneous material selection and geometry design of statically determinate trusses using continuous optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 35, n. 1, p. 55–68, 2008.

RAZI, F. F.; SARKARI, H. Proposing a new approach to the selection of material portfolio using a combination of data mining and optimisation methods. **International Journal of Operational Research**, v. 36, n. 2, p. 151–169, 2019.

REZAEI, J. *et al.* Supplier selection in the airline retail industry using a funnel methodology: Conjunctive screening method and fuzzy AHP. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 18, p. 8165–8179, 2014.

SAPUAN, S. M.; ABDALLA, H. S. Prototype knowledge-based system for the material selection of polymeric-based composites for automotive components. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 29, n. 7, p. 731–742, 1998.

SAPUAN, S. M. A knowledge-based system for materials selection in mechanical engineering design. **Materials & Design**, v. 22, n. 8, p. 687–695, 2001.

SAPUAN, S. M. *et al.* Prototype expert system for material selection of polymeric composite automotive dashboard. **International Journal of Physical Sciences**, v. 6, n. 25, p. 5988–5995, 2011.

SERAFINI, M. *et al.* Multi criteria material selection for eco-design. **Computer-Aided Design and Applications**, v. 12, n. 5, p. 526–536, 2015.

SETTI, Dalmarino *et al.* Materials selection using a 2-tuple linguistic multi-criteria method. **Materials Research**, v. 22, 2020.

SHAH, D. U. Natural fibre composites: Comprehensive Ashby-type materials selection charts. **Materials & Design**, v. 62, p. 21–31, 2014.

SHANIAN, A.; SAVADOGO, O. A material selection model based on the concept of multiple attribute decision making. **Materials & Design**, v. 27, n. 4, p. 329–337, 2006.

STIMSON, I. L.; FISHER, R. Design and engineering of carbon brakes. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v. 294, n. 1411, p. 583–590, 1980.

TAMBOURATZIS, T. *et al.* A methodological study for optimizing material selection in sustainable product design. **Journal of Industrial Ecology**, v. 18, n. 4, p. 508–516, 2014.

TASCA, J. E. *et al.* An approach for selecting a theoretical framework for the evaluation of training programs. **Journal of European Industrial Training**, v. 34, n. 7, p. 631–655, 2010.

TSENG, M. L. *et al.* Evaluating the effectiveness of e-learning system in uncertainty. **Industrial Management & Data Systems**, v. 111, n. 6, p. 869–889, 2011.

UL: base de dados: Disponível em: < <https://www.ul.com/>>. Acesso em: 03 mar. 2020.

VALMORBIDA, S. M. I.; ENSSLIN, S. R. Performance evaluation of university rankings: literature review and guidelines for future research. **International Journal of Business Innovation and Research**, v. 14, n. 4, p. 479–501, 2017.

WANG, J. H.; HAO, J. A new version of 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 14, n. 3, p. 435–445, 2006.

YAVUZ, H. Materials selection for aircraft skin panels by integrating multiple constraints design with computational evaluations. **Procedia Structural Integrity**, v. 21, p. 112–119, 2019.

ZADEH, L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I. **Information Sciences**, v. 8, n. 3, p. 199–249, 1975.

ZINDANI *et al.* Decision making tools for optimal material selection: A review. **Journal of Central South University**, v. 27, n. 3, p. 629-673, 2020.

## APÊNDICE – Equações utilizadas para classificar os materiais candidatos.

Equações utilizadas pelos autores, para classificação dos materiais triados pelo método 2SM para seleção de um *Tool Holder*, um *Bicycle Frame* e um *Flyweel*. Equações que foram utilizadas para validar o método 2SM.

### Método TOPSIS

Normalização da matriz de decisão:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

sendo:  $j = 1, 2, \dots, n$

$i = 1, 2, \dots, m$

As colunas da matriz de decisão normalizada são multiplicadas pelos pesos associados:

$$V_{ij} = n_{ij}w_j$$

sendo:  $w_j =$  peso de cada critério

$j = 1, 2, \dots, n$

$i = 1, 2, \dots, m$

Solução ideal e distância da solução ideal:

$$V_1^+, V_2^+, \dots, V_n^+ = \{(máx_i V_{ij} | j \in K), (mín_i V_{ij} | j \in K') | i = 1, 2, \dots, m\}$$

$$V_1^-, V_2^-, \dots, V_n^- = \{(mín_i V_{ij} | j \in K), (máx_i V_{ij} | j \in K') | i = 1, 2, \dots, m\}$$

sendo: K para critérios de benefício ou maximização e;

K' para critérios de custo ou minimização

As duas distâncias Euclidianas para cada alternativa são calculadas:

$$S_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2 \right\}^{0,5}$$

$$S_i^- = \left\{ \sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2 \right\}^{0,5}$$

sendo:  $j = 1, 2, \dots, n$

$i = 1, 2, \dots, m$

A proximidade relativa a solução ideal:

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}$$

sendo:  $i = 1, 2, \dots, m$

$$0 \leq C_i \leq 1$$

O maior valor de  $C_i$  significa que o material é melhor, assim, o ranking é classificado do maior para o menor valor de  $C_i$ .

### Método VIKOR

O melhor  $(x_{ij})_{máx}$  e o pior  $(x_{ij})_{mín}$  valor de cada critério são determinados a partir da matriz de decisão, com isso calculam-se os valores de  $E_i$  e  $F_i$ :

$$E_i = \sum_{j=1}^n w_j \left[ \frac{(x_{ij})_{máx} - (x_{ij})}{(x_{ij})_{máx} - (x_{ij})_{mín}} \right]$$

$$F_i = Máx^n \left\{ w_j \left[ \frac{(x_{ij})_{máx} - (x_{ij})}{(x_{ij})_{máx} - (x_{ij})_{mín}} \right] \right\}$$

sendo:  $j = 1, 2, \dots, n$

Os valores de  $P_i$  são calculados:

$$P_i = v \left( \frac{(E_i - E_{i_{mín}})}{(E_{i_{máx}} - E_{i_{mín}})} \right) + (1 - v) \left( \frac{(F_i - F_{i_{mín}})}{(F_{i_{máx}} - F_{i_{mín}})} \right)$$

sendo:  $E_{i_{máx}}$  o máximo valor de  $E_i$

$E_{i_{mín}}$  o mínimo valor de  $E_i$

$F_{i_{máx}}$  o máximo valor de  $F_i$

$F_{i_{mín}}$  o mínimo valor de  $F_i$

$v$  é o peso e geralmente utilizado 0,5. Podendo ser  $0 \leq v \leq 1$

A melhor alternativa é determinada como sendo aquela com o mínimo valor de  $P_i$  no ranking  $P$ .

### Método do Custo por Unidade de Propriedade

$$C = \rho \frac{C'}{(LRT/CS)}$$

sendo:  $C$  o custo por unidade de resistência do material

$C'$  o custo por unidade de massa do material

$\rho$  a massa específica do material

$LRT$  o limite de resistência à tração do material

$CS$  o coeficiente de segurança (utilizado como sendo 3)

### Método da Lógica Digital

$$\text{Propriedade dimensionada} = \frac{\text{Valor numérico da propriedade} * 100}{\text{Máximo valor da lista}}$$

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot \alpha_i$$

sendo:  $\gamma$  o índice de performance do material

$\beta_i$  é a propriedade dimensionada do material

$\alpha_i$  é o peso da propriedade

$$M = \frac{\gamma}{C \cdot \rho}$$

sendo:  $M$  a figura do mérito