



**LUIZ FERNANDO BRAGA DE BRITO**

**SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA ELEMENTO MAGNÉTICO  
FILTRANTE NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA EMPREGANDO  
MÉTODOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO**

**LAVRAS – MG**

**2022**

**LUIZ FERNANDO BRAGA DE BRITO**

**SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA ELEMENTO MAGNÉTICO FILTRANTE NA  
INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA EMPREGANDO MÉTODOS DE DECISÃO  
MULTICRITÉRIO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Engenharia Química, para obtenção do título de Bacharel.

Prof (a). Dr (a). Lidja Dahiane Menezes Santos Borél

Orientadora

Prof (a). Dr (a). Marali Vilela Dias

Coorientadora

**LAVRAS – MG**

**2022**

*Dedico este trabalho a todos que participaram da minha jornada na UFLA  
Aos meus familiares, em especial, aos meus pais, que sempre incentivaram meus estudos  
E aos meus amigos, que sempre estiveram comigo nos momentos bons e ruins*

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, que esteve ao meu lado durante toda esta trajetória, com a certeza de que este não é um passo solitário, pois caminham comigo muitas gerações;

As professoras e doutoras Lidja Borél e Marali Dias por aceitarem o desafio e por toda ajuda durante este trabalho;

A todos os meus amigos e amigas de UFLA pela grande amizade, carinho e apoio durante toda a graduação!

## RESUMO

A seleção de materiais para aplicação em processos produtivos deve garantir a adequabilidade do material frente às condições de processo, principalmente em processos produtivos em que o produto é destinado à ingestão humana, como o segmento alimentício. Nesse sentido, métodos de seleção como o *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM) podem ser aplicados com o intuito de elencar os melhores materiais a partir de uma matriz de decisão em que são destacados todos os candidatos e critérios selecionados. Diante deste contexto, este trabalho consistiu em um estudo de caso de seleção do material de construção para confecção de elemento magnético filtrante aplicado à fase aquosa de produção da maionese. Três técnicas de MCDM foram usadas para analisar e comparar materiais candidatos sendo elas: TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), VIKOR (*Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*) e MOORA (*Multi-Objective Optimization based on Ratio Analysis*). Os candidatos foram avaliados com base em seis critérios, sendo eles: custo, limite de resistência e escoamento, resistência a corrosão, ductilidade e dureza. Os *rankings* finais das metodologias demonstraram que os aços inoxidáveis AISI 304 L e 316 L são os melhores materiais a serem utilizados na confecção do elemento magnético filtrante. Ademais, não foram constatados problemas de reversão de *ranking* associados aos métodos MCDM aplicados, e com base nas condições de empregabilidade descritas, os metais austeníticos são os mais recomendados para aplicação, considerando critérios técnicos-econômicos. Além disso, implicações práticas e de pesquisa foram derivadas com base no estudo para auxiliar profissionais industriais e tomadores de decisão para a seleção dos melhores materiais na fase de desenvolvimento do produto.

Palavras-chave: MCDM. Matriz de Decisão. Produção de Maionese.

## ABSTRACT

The selection of materials for application in the production process must ensure the suitability of material under process conditions, especially in the production process in which the product is destined for human consumption, such as the food industry. Thus, selection methods like Multi-Criteria Decision Making (MCDM) can be applied with the purpose of enumerate the best materials from the decision matrix in which all the materials candidates and the choosing criteria are highlighted. In this way, this work shows a selection of materials for a case study to building the magnetic filter element applied to aqueous phase of mayonnaise production. Therefore, three MCDM techniques were used to analyses and compare candidates materials, like: TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), VIKOR (Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) and MOORA (Multi-Objective Optimization based on Ratio Analysis). The performances of candidates were evaluated based on six criteria, namely: cost, tensile strength and yield strength, corrosion resistance, ductility and hardness. The methodologies final ranks demonstrate that stainless steel AISI 304 L and 316 L are the best materials to be applied for building the magnetic filter element. Besides, that weren't observed rank reversal problem associated with applied MCDM methods. Due to the conditions of service described, the austenitic stainless steels are the most recommended for application, considering technical-economic criteria. Therefore, practical implications were derived from the study to help industrial practitioners and decision-makers in the selection of the best materials.

Keywords: MCDM. Decision Matrix. Magnetic. Mayonnaise Production.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais tipos de corrosão na indústria alimentícia.....	15
Figura 2: Sistema de produção de maionese. ....	28
Figura 3: Sistema de preparação de solução aquosa.....	29
Figura 4: Design do elemento magnético filtrante. ....	29
Figura 5: Princípio de funcionamento do elemento magnético filtrante. ....	30

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais materiais empregados em equipamentos industriais. ....	19
Tabela 2: Fatores Relativos ao Serviços/Condições de Empregabilidade.....	31
Tabela 3: Transformação do critério resistência a corrosão para valores quantitativos.....	32
Tabela 4: Matriz de Decisão X.....	32
Tabela 5: Pesos atribuído aos critérios adotados, conforme método IEM. ....	33
Tabela 6: Peso dos critérios estabelecidos pelo tomador de decisão.....	34
Tabela 7: <i>Ranking</i> dos materiais conforme cada metodologia MCDM. ....	35
Tabela 8: Composição de cada candidato.....	36
Tabela 9: Correlação de <i>Spearman</i> aplicados aos métodos MCDM. ....	36
Tabela 10: <i>Ranking</i> final conforme pesos atribuídos via tomador de decisão. ....	37
Tabela 11: Comparação do <i>ranking</i> final frente a exclusão dos piores candidatos.....	37

## SUMÁRIO

<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Contextualização do desenvolvimento da indústria alimentícia .....</b>	<b>13</b>
<b>3.2 Critérios para seleção de materiais para a indústria de alimentos.....</b>	<b>14</b>
<b>3.2.1 Fatores Gerais de Influência.....</b>	<b>14</b>
<b>3.2.1.1 Resistência a corrosão .....</b>	<b>14</b>
<b>3.2.1.2 Design Higiênico .....</b>	<b>16</b>
<b>3.2.1.3 Resistência mecânica .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2.1.4 Bom comportamento térmico .....</b>	<b>18</b>
<b>3.2.1.5 Facilidade de fabricação e reparo .....</b>	<b>18</b>
<b>3.2.2 Opções de Materiais .....</b>	<b>18</b>
<b>3.3 Estratégias para Seleção de Materiais.....</b>	<b>20</b>
<b>3.3.1 TOPSIS.....</b>	<b>21</b>
<b>3.3.2 VIKOR.....</b>	<b>22</b>
<b>3.3.3 MOORA .....</b>	<b>24</b>
<b>3.3.4 <i>Information Entropy Method (IEM)</i> .....</b>	<b>25</b>
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>27</b>
<b>4.1 Estudo de Caso.....</b>	<b>27</b>
<b>4.2 Seleção do Material de Construção.....</b>	<b>31</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>35</b>
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>40</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>41</b>
<b>APÊNDICE A – Cálculo dos pesos dos critérios via método IEM.....</b>	<b>43</b>
<b>APÊNDICE B – Método TOPSIS.....</b>	<b>46</b>
<b>APÊNDICE C – Método VIKOR.....</b>	<b>49</b>
<b>APÊNDICE D – Método MOORA.....</b>	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A seleção de materiais para utilização em processos químicos industriais é de fundamental importância para engenheiros químicos, visto a possibilidade de interferência sobre os processos produtivos. Na fabricação dos produtos desejados deve-se considerar a seleção de materiais apropriados para construção de equipamentos e dispositivos envolvidos, frente às condições de processo, seguridade, economicidade e qualidade dos produtos fabricados. Além da preocupação sobre os materiais empregados na produção, deve-se considerar as etapas de manuseio, transporte e armazenamento dos produtos compreendidos (GREEN; PERRY, 2008).

A seleção de materiais além de evitar interferências nos processos produtivos e garantir a segurança dos processos, deve ser capaz de favorecer as condições de processo, como por exemplo, favorecer o menor gasto energético possível, diminuir a reposição de materiais e menor frequência de manutenções.

Diversos problemas encontrados no meio industrial estão relacionados à corrosão de materiais. Estes problemas são frequentes e ocorrem nos mais variados segmentos industriais, como por exemplo nas indústrias química, alimentícia, petroquímica, petrolífera, de construção civil, automobilística, entre outras (GENTIL, 2011). As perdas econômicas relacionadas a este processo degradativo da matéria são extremamente altas. Segundo Koch (2017), são estimadas perdas entre 3 a 4% do Produto Interno Bruto (PIB) relacionadas a corrosão, considerando-se todos os setores produtivos dos países.

Deste modo, além do impacto econômico, que é extremamente notável, devem-se considerar os impactos sociais, principalmente relacionados às questões de segurança e meio ambiente. Falhas geradas por processos corrosivos podem provocar acidentes graves que impactam o meio ambiente e a seguridade, como por exemplo os acidentes de Bhopal na Índia em 1984, Guadalajara no México em 1992, e no Brasil, especificamente na cidade de Cubatão/SP, nos anos 80 (GENTIL, 2011).

No caso específico de indústrias de bens de consumo, como a alimentícia, mesmo que a ação corrosiva seja pequena, existe a possibilidade de alteração de características dos alimentos, ocasionamento de rancidez, formação de sais metálicos tóxicos, comprometendo deste modo, a seguridade do alimento frente a ingestão humana (GENTIL, 2011). Desta forma, a seleção de materiais, seja ela através do método gráfico de Ashby, custo por unidade de

propriedade ou via *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM), por exemplo, é extremamente importante, considerando os possíveis danos que podem ser ocasionados para este segmento industrial.

A metodologia *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM) tem sido utilizada na seleção de materiais adequados para distintas aplicações de engenharia, visto que o processo de seleção é considerado um problema de tomada de decisão multicritério, havendo um conjunto finito de alternativas viáveis e um número pré-estabelecido de critérios considerados (AGRAWAL, 2021). Atualmente, diversas linhas de pesquisas têm sido empregadas na engenharia relacionadas a metodologia em questão. Trabalhos como de Chakraborty e Chatterjee (2013) utilizaram-se da metodologia MCDM para seleção de material para confecção de tanque de armazenamento criogênico e construção de vagões de transporte, por exemplo. Já no trabalho de Thakker et al. (2008), a metodologia MCDM foi empregada para seleção de material para confecção de turbinas utilizadas na geração de energia. Deste modo, é evidente a consolidação das metodologias MCDM em aplicações de engenharia para seleção de materiais utilizados na construção de equipamentos e dispositivos.

## 2 OBJETIVOS

Diante do exposto na Introdução, o objetivo principal deste trabalho foi delinear um estudo de caso de seleção do material de confecção de um elemento magnético filtrante a ser inserido em uma linha de produção de maionese em uma indústria alimentícia. Para isso, tiveram-se como objetivos específicos:

- Delinear as condições de serviço do elemento magnético filtrante, compilando dados de propriedades dos materiais disponíveis para construção, a fim de estabelecer critérios de seleção, e deste modo construir uma matriz de decisão;
- Adotar uma estratégia de seleção de materiais dentre as estratégias/metodologias de tomada de decisão multicritério (*Multi-Criteria Decision Making* - MCDM);
- Compilar um conjunto de regras heurísticas de seleção de materiais, para uma gama de possibilidades de aplicação, visando atender critérios econômicos e técnicos.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Contextualização do desenvolvimento da indústria alimentícia

Antes do século XVIII, a tecnologia na indústria de alimentos era empírica, sem a base da formação científica. Na verdade, a ciência não desempenhou um papel na tecnologia de alimentos até o século XIX, quando os biólogos interpretaram pela primeira vez a fermentação e o papel da levedura (LÓPEZ; BARBOSA, 2005). A partir do século XX, processos de produção de alimentos se tornaram mais tecnológicos, devido aos avanços nas áreas de engenharia e informática, originando deste modo, novas técnicas de fabricação, processos mecanizados e com certos níveis de automação. Dentre as técnicas desenvolvidas para o processamento de alimentos a partir do século XX, pode-se destacar: processos de aquecimento, congelamento e resfriamento, secagem, atmosferas controladas e modificadas, e uso de radiação (WELCH; MITCHELL, 2000).

Aliado ao desenvolvimento dos processos de produção de alimentos, emergiu a necessidade do controle de qualidade e padronização dos produtos, originando deste modo, procedimentos de gestão mais sofisticados para todos os alimentos comercializados. No entanto, a preocupação primordial até os dias de hoje, consiste na segurança alimentar, ou seja, qualquer fabricante de alimentos deve garantir a segurança dos produtos comercializados ao público, oferecendo diminuto risco à saúde dos consumidores que farão a ingestão dos alimentos. Dentre os perigos que podem estar atrelados aos alimentos industrializados, o mais significativo está relacionado à contaminação, seja ela microbiana ou por outras substâncias químicas oriundas do processo de produção (WELCH; MITCHELL, 2000).

A preocupação do setor industrial com procedimentos de gestão e operação, incluindo *Clean in place* (CIP) e *Hazard Analysis and Critical Control Point* (HACCP), relacionados à segurança de alimentos, emergiram no final dos anos de 1950. Mesmo assim, casos de contaminação de alimentos ainda ocorrem nos dias de hoje, como por exemplo o da cervejaria *Backer*, em Belo Horizonte – MG, evidenciado no ano 2020, em que 29 pessoas foram intoxicadas com fluido refrigerante, monoetilenoglicol e dietilenoglicol, utilizado em um trocador serpentinado destinado para refrigeração do produto acabado, em que houve a constatação de vazamentos dos fluidos refrigerantes para o tanque, contaminando a cerveja produzida e levando a morte de 7 consumidores da marca (G1 Minas - Belo Horizonte, 2020).

Além do quesito de segurança de alimentos, o mercado atual é considerado dinâmico, e para permanecer viável, a indústria alimentícia tem que responder de forma adequada às questões do consumidor, como potenciais alergias alimentares, uso de matérias-primas geneticamente modificadas, prazo de validade, emprego de matérias-primas sem utilização de defensivos agrícolas, entre outros (WELCH; MITCHELL, 2000).

### **3.2 Critérios para seleção de materiais para a indústria de alimentos**

Os principais materiais empregados na indústria de alimentos, incluem metais, polímeros e vidro-cerâmicos. Independente do material, elementos constituintes de equipamentos de processos alimentícios devem apresentar adequabilidades frente ao contato com alimentos e agentes sanitizantes utilizados para limpeza e desinfecção.

As propriedades dos materiais empregados na indústria alimentícia, conforme López e Barbosa (2005) e Saravacos (2002), devem ser selecionados buscando atender fatores gerais de influência, como:

- a) Resistência a corrosão;
- b) *Design* higiênico;
- c) Resistência mecânica;
- d) Bom comportamento térmico;
- e) Facilidade de fabricação e reparo;

#### **3.2.1 Fatores Gerais de Influência**

##### **3.2.1.1 Resistência a corrosão**

Os materiais selecionados devem-se basear nas condições de agressividade dos alimentos ou agentes sanitizantes utilizados, e condições de processo, como: acidez (pH), variação de temperatura, pressão, velocidade de escoamento, impurezas de matérias-primas, aeração e diferença de temperatura durante o fenômeno de transferência de calor (LÓPEZ; BARBOSA, 2005; SARAVACOS, 2002).

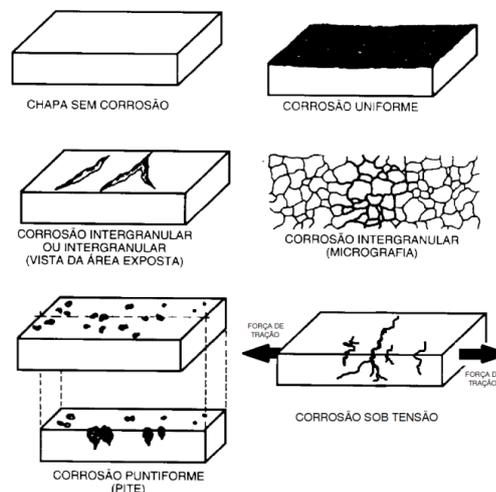
A corrosão, quando presente em materiais e equipamentos em contato com processo alimentício, pode ocasionar contaminação do alimento, perda de qualidade do produto, alteração do sabor e aroma, descaracterizando o produto alimentício. Além disso, um processo degradativo acentuado, reduz o tempo de vida útil dos materiais de construção, além de estar aliado a maior probabilidade do surgimento de fendas ou rachaduras, que dificultam a higienização dos materiais empregados e, que deste modo, podem originar contaminação no referido sistema (SARAVACOS, 2002).

Ademais, no processamento úmido, presente por exemplo na indústria alimentícia de enlatados e em processos industriais com ingredientes de baixo pH, a utilização de substâncias químicas pode acarretar a degradação dos materiais constituintes dos equipamentos.

Quando nos referimos aos tipos de corrosão presentes neste tipo de segmento industrial, as mais recorrentes estão representadas na Figura 1, sendo elas:

- Corrosão uniforme: como por exemplo a oxidação devido à umidade;
- Puntiforme (por pite): como por exemplo a formação de cavidades em metais devido a soluções aquosas contendo cloretos;
- Sob tensão: como por exemplo em máquinas de trituração e sobrecarga de bombas;
- Intergranular: como por exemplo em equipamentos em que houve a demasiada elevação de temperatura durante o processo de soldagem;
- Galvânica: como por exemplo o contato direto entre dois metais distintos, ocasionando uma diferença de potencial (SARAVACOS, 2002).

Figura 1: Principais tipos de corrosão na indústria alimentícia.



Fonte: GENTIL (2011).

### 3.2.1.2 Design Higiênico

Segundo Saravacos (2002), o *design* higiênico de equipamentos baseia-se na seleção adequada de materiais de construção e técnicas de fabricação. Os materiais empregados devem obedecer premissas, como a não absorção dos componentes dos produtos processados, ausência de possibilidade de contaminação do alimento, superfícies com acabamentos polidos ou suaves, proporcionando deste modo a facilidade de limpeza.

Além disso, o projeto de equipamentos e processos alimentícios devem atender regulamentações e normas aplicáveis para segurança de alimentos, objetivando a garantia da segurança física, química e microbiológica dos produtos ao final do processo de produção. Nesse sentido, regulamentações governamentais para equipamentos envolvidos nesta cadeia de produção foram desenvolvidas ao longo dos anos, com o intuito de proteção da saúde pública (SARAVACOS, 2002).

No Brasil, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA (2021) consolidou um Marco Regulatório para materiais em contato com alimentos, por meio de Resoluções (RES), Resoluções de Diretoria Colegiada (RDC) e Portarias, objetivando a segurança de fabricação de alimentos e controle sanitário. Nesse sentido, foram promulgadas:

- RDC 88/2016 – Materiais, embalagens e equipamentos celulósicos destinados a entrar em contato com alimentos (Alterada por: RDC 589/2021);
- Portaria SVS/MS 27/1996 – Embalagens e equipamentos de vidro e cerâmica destinados a entrar em contato com alimentos;
- RDC 90/2016 – Materiais, embalagens e equipamentos celulósicos destinados a entrar em contato com alimentos durante a cocção ou aquecimento em forno;
- RDC 123/2001 – Embalagens e equipamentos elastoméricos em contato com alimentos;
- RDC 20/2007 – Embalagens, revestimentos, utensílios, tampas e equipamentos metálicos em contato com alimentos (Alterada por: RDC 498/2021);
- RES 105/1999 – Disposições gerais para embalagens e equipamentos plásticos em contato com alimentos (Alterada por: RDC 51/2010, RDC 52/2010, RDC 56/2012, RDC 326/2019).

No mundo, as principais regulamentações são provenientes de países desenvolvidos, como os Estados Unidos e União Europeia, que apresentam critérios mais rígidos e obrigatoriedade de certificação, como estabelecido pela *US Department of Agriculture – USDA*,

em que é determinada a obrigatoriedade de aprovação do equipamento e como consequência a presença na listagem “*Compendium of USDA Approved Equipment*” (SARAVACOS, 2002). No Brasil, no entanto, não há a obrigatoriedade de certificação de equipamentos para alimentos, mas por outro lado, são elencados os materiais, que podem apresentar contato direto com o alimento, através de listas positivas promulgadas pela ANVISA, via Resoluções de Diretoria Colegiada.

### 3.2.1.3 Resistência mecânica

A resistência mecânica de materiais depende das condições de aplicação do material e formas desejadas para utilização (formas possíveis como tubos, parafusos, entre outros). Ademais, a resistência mecânica é um fator primordial na construção de equipamentos empregados na indústria alimentícia, principalmente quando o processamento envolve grandes quantidades em um curto espaço de tempo, como ocorre em processos sazonais. Além disso, o bom comportamento mecânico é um fator fundamental no início dos estágios do processamento de matérias-primas, em que grandes quantidades são designadas para equipamentos de processos objetivando uma pré-manufatura das matérias-primas.

Deste modo, os equipamentos devem ser projetados a depender das forças atuantes. Os tipos de forças existentes sob materiais podem ser resumidas basicamente em: tensão, pressão e cisalhamento. A tensão sob materiais que compõem equipamentos deve-se a forças geradas por processos mecânicos, térmicos, químicos ou físicos (SARAVACOS, 2002).

Por conseguinte, as propriedades mecânicas dos materiais utilizados na construção de equipamentos e dispositivos industriais devem ser avaliados, buscando-se analisar se estão aptos frente aos esforços solicitantes. Dentre as principais propriedades mecânicas pode-se destacar (CALLISTER; RETHWISCH, 2016):

- Limite de resistência à tração: correspondente à tensão máxima que o material suporta sob tração.
- Limite de escoamento: tensão máxima que o material suporta ainda no regime elástico de deformação.
- Ductilidade: medida do grau de deformação plástica desenvolvida até a fratura.
- Dureza: medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada.

#### **3.2.1.4 Bom comportamento térmico**

O bom comportamento térmico objetiva a facilitação da transferência de calor ou o favorecimento da operação unitária em específico, requerendo deste modo, algum trabalho especial para fabricação do material. Além disso, no projeto de equipamentos deve ser considerada a faixa de temperatura em que o material de construção estará submetido, considerando que o aumento de temperatura impacta diretamente sob propriedades mecânicas, como de materiais metálicos, em que de modo geral, o aumento de temperatura ocasiona a diminuição do limite de escoamento, resistência, dureza e o módulo de elasticidade.

Deste modo, todos materiais têm temperaturas limites de emprego, em que acima da qual a resistência é consideravelmente baixa em que é obrigatória a adoção de medidas, como o aumento da espessura por exemplo. Ademais, deve-se evitar faixas de trabalho próximas a temperatura de fluência, visto que este fenômeno de deformação ocorre ao longo do tempo podendo levar a ruptura do material (SARAVACOS, 2002; TELLES, 2003).

#### **3.2.1.5 Facilidade de fabricação e reparo**

Visto que equipamentos precisam ser substituídos ou passarem por manutenção, com substituição de acessórios, a facilidade de fabricação e reparo constitui um fator primordial, impactando diretamente no custo, além da viabilidade orçamentária em projetos de equipamentos e processos (TELLES, 2003).

### **3.2.2 Opções de Materiais**

Considerando-se os critérios necessários para seleção de materiais para processos alimentícios, na Tabela 1 são apresentados os principais materiais utilizados na construção de equipamentos de processamento de alimentos, e suas respectivas adequabilidades frente alguns fatores, como resistência a tensão, condutividade térmica, e produtos químicos amplamente utilizados neste segmento industrial.

Tabela 1: Principais materiais empregados em equipamentos industriais.

Material	Lim. Resist. (Mpa)	Cond. térmica (W/m K)	CH <sub>3</sub> COOH	HNO <sub>3</sub>	HCl	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	NaOH	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
<b>Metálicos</b>								
Aço Carbono	350-490	35-46	-	-	-	-	++	-
304/316 SS	565	18,8	++	+++	-	+-	++	++
Cu	20-40		-	-	++	-	+-	-
Ligas Cu	400-450	375,8						
Al	50-60	208,8	+++	+-	-	-	-	+++
Ligas Al	150-470							
Monel	480-600		+	-	-	+-	++	++
<b>Poliméricos</b>								
Polyester	55-72	0,170	++	+	++	+++	-	++
PVC (soft)	20-60	0,160	+++	+++	++	+++	+++	+++
Polietileno	6-37	0,334	+++	+++	++	++	+++	++
Borracha			-	-	++	+++	+++	++
+++ : Ótima Resistência								
++ : Resistente Suficiente, sob condições normais								
+ : Resistência suficiente para contatos não permanentes								
- : Resistência Insuficiente								

Fonte: adaptado de SARAVACOS (2002).

### 3.3 Estratégias para Seleção de Materiais

A seleção de materiais incorretos e impróprios para um determinado produto ou processo pode ocasionar interferências sobre os processos produtivos e produtos fabricados, podendo ocasionar danos diretos a marca e ao fabricante. Neste sentido, deve-se haver um cuidado excepcional na seleção de critérios pertinentes para a decisão de seleção do material.

O método *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM) tem sido empregado na seleção de materiais em diferentes aplicações de engenharia, uma vez que o procedimento de seleção de materiais é considerado um problema de tomada de decisão multicritério (AGRAWAL, 2021). Nesta seção, são abordadas as diferentes metodologias MCDM: TOPSIS, VIKOR e MOORA.

Os métodos utilizam a matriz de decisão  $X$ , composta por elementos na forma  $x_{ij}$ , que corresponde ao resultado observado da alternativa  $i$  no critério  $j$ . Assume-se ainda  $A = \{A_i | i = 1, 2, \dots, n\}$  como o conjunto de todas as alternativas e  $C = \{C_j | j = 1, 2, \dots, m\}$  como conjunto de todos os critérios. A matriz  $X$  é evidenciada conforme Equação (1).

$$X = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & C_m \\ A_1 & x_{11} & x_{12} & x_{1m} \\ A_2 & x_{21} & x_{22} & x_{2m} \\ A_n & x_{n1} & x_{n2} & x_{nm} \end{matrix} \quad (1)$$

Após o estabelecimento da matriz de decisão  $X$ , o primeiro passo consiste na definição dos pesos de cada critério, havendo diferentes método para atribuição dos pesos, como *Information Entropy Method* (IEM) abordado nas sessões subsequentes. Por outro lado, pode-se optar pela atribuição dos pesos diretamente pelo tomador de decisão. Posteriormente para análise nos diferentes métodos MCDM é necessário estabelecer quais critérios são benéficos e quais são não benéficos (AGRAWAL, 2021).

Por fim, procede-se com o cálculo de desempenho de cada alternativa elencada com base nos critérios estabelecidos. Visto que os métodos MCDM possuem distintas etapas de normalização e diferentes meios de cálculos de desempenho de alternativas, o *ranking* alcançado por cada tipo de método MCDM pode variar. A correlação *Spearman* é utilizada para avaliar a semelhança entre os métodos, objetivando verificar se são esperados resultados de posicionamento de candidatos semelhantes entre as metodologias (AGRAWAL, 2021). A descrição detalhada das metodologias MCDM são descritas nas seções subsequentes.

### 3.3.1 TOPSIS

O método *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) proposto por Hwang e Yoon (1981), vem sendo aplicado a pesquisas científicas voltadas ao apoio à decisão multicritério (KREUZBERG et al., 2017).

Segundo Miranda (2008) o primeiro passo desta metodologia consiste na normalização dos dados da matriz de decisão  $X = [x_{ij}]$ , objetivando migrar todos os dados em uma mesma escala para comparação. A normalização da matriz de decisão pode ser realizada de diversos modos, destacando-se a normalização linear e a vetorial. A normalização vetorial pode ser feita conforme a Equação (2):

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (2)$$

em que  $r_{ij}$  corresponde à matriz normalizada.

Realizada a normalização, multiplica-se a matriz normalizada  $r_{ij}$  pelos respectivos pesos dos critérios, conforme Equação (3):

$$v_{ij} = w_{ij} \times r_{ij} \quad (3)$$

em que  $v_{ij}$  é a matriz ponderada com os pesos, e  $w_{ij}$  é o peso definido para cada critério.

Cabe salientar que a definição dos pesos é realizada de acordo com as percepções de valor do decisor ou advindo de métodos existentes. Posteriormente é realizada a identificação da solução ideal (PIS) e da solução anti-ideal (NIS). Determinam-se nesta etapa os melhores níveis, que representam a solução ideal (I+) para cada um dos critérios considerados. Procedese do mesmo modo para os piores níveis, que representam a solução anti-ideal, (I-). Deste modo são utilizadas as Equações (4) e (5) (MIRANDA, 2008):

$$I_j^+ = (\max v_{i1}, \max v_{i2}, \max v_{i3} \dots \max v_{in}) \quad (1 \leq i \leq m) \quad (4)$$

$$I_j^- = (\min v_{i1}, \min v_{i2}, \min v_{i3} \dots \min v_{in}) \quad (1 \leq i \leq m) \quad (5)$$

Com a definição dos valores I+ e I-, o próximo passo consiste no cálculo da distância (D) da solução ideal e cada alternativa (I+) e da situação anti-ideal e cada alternativa (I-), de acordo com as Equações (6) e (7) (MIRANDA, 2008):

$$D^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - I_j^+)^2} \quad (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n) \quad (6)$$

$$D^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - I_j^-)^2} \quad (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n) \quad (7)$$

Por fim, calcula-se o coeficiente de priorização expresso pelo Coeficiente C, se caracterizando pela aproximação relativa dos dados com a solução ideal (MIRANDA, 2008).

$$C = \frac{D^-}{D^- + D^+} \quad (8)$$

Cabe salientar que se uma alternativa apresenta  $C = 1$ , então ela é a solução ideal. Por outro lado, se  $C = 0$ , essa alternativa é a solução anti-ideal. Consequentemente, pode afirmar que quanto maior o valor da aproximação relativa C, mais próxima da solução ideal e por conseguinte mais distante da solução anti-ideal está a alternativa. Deste modo, as alternativas são elencadas em ordem decrescentes no intervalo de  $[0,0;1,0]$  (MIRANDA, 2008).

### 3.3.2 VIKOR

O método *VlseKriterijumska Optimizacija I Kompro-misno Resenje* (VIKOR) foi elaborado por Opricovic em 1998. O objetivo inicial da metodologia foi estabelecer um *ranking* conforme as distâncias em relação a um cenário ideal. O diferencial frente ao método de TOPSIS está relacionado ao vínculo à função de compromisso.

Segundo Opricovic e Tzeng (2004) o método VIKOR apresenta como benefício em relação à metodologia TOPSIS a ponderação de importância das distâncias em relação à solução ideal e melhor desempenho em um critério de potencial da alternativa analisada. Além disso, os autores afirmam que o método VIKOR apresenta um *ranking* mais estável do que o de TOPSIS. Considerando-se  $A = \{A_i | i = 1, 2, \dots, n\}$  como o conjunto de todas as alternativas e  $C = \{C_j | j = 1, 2, \dots, m\}$  como conjunto de todos os critérios. Assume-se que para a alternativa  $i$ , o valor padronizado de sua avaliação no critério  $j$  é dado por  $x_{ij}$ . Assim pode-se definir a função de compromisso como (KREUZBERG et al., 2017):

$$L_{p,i} = \left\{ \sum_{j=1}^m \left[ \frac{w_j \times (f_j^* - x_{ij})}{(f_j^* - f_j^-)} \right]^p \right\}^{\frac{1}{p}} \quad (9)$$

em que  $L_{p,i}$  é a função compromisso,  $j$  corresponde a um critério específico,  $m$  o número de critérios utilizados e a variável  $p$  que assume valores de  $p = 1$  para o cálculo da variável S, e  $p = \infty$  para o cálculo da variável R. Além disso,  $f_j^*$  corresponde ao melhor resultado frente ao critério  $j$ , e que  $f_j^-$  por sua vez, o pior resultado no critério  $j$ .

Deste modo, inicialmente calculam-se dois *rankings* via variáveis S e R, sendo vinculada a função de compromisso. Obtém-se deste modo (KREUZBERG et al., 2017):

$$S_i = \sum_{j=1}^m \left[ \frac{w_j \times (f_j^* - x_{ij})}{(f_j^* - f_j^-)} \right] \quad (10)$$

sendo que:

$$R_i = \max \left[ \frac{w_j \times (f_j^* - x_{ij})}{(f_j^* - f_j^-)} \right] \quad (11)$$

Cabe salientar que para determinação de  $f_j^*$  e  $f_j^-$  deve-se haver a classificação qualitativa dos critérios, em benéficos e não benéficos. Por exemplo, o critério de custo de fabricação se caracteriza por ser não benéfico, visto que sempre é pretendido o menor valor, e deste modo,  $f_j^*$  corresponde ao menor valor dentre as alternativas disponíveis (KREUZBERG et al., 2017).

Posteriormente, procede-se com o cálculo de S e R, via Equação (10) e (11). Por fim, calculam-se os valores de  $Q_i$  conforme Equação (12), em que  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  (KREUZBERG et al., 2017).

$$Q_i = \frac{v_j \times (S_i - S^*)}{(S^- - S^*)} + \frac{(1 - v_j) \times (R_i - R^*)}{(R^- - R^*)} \quad (12)$$

em que  $Q_i$  é o valor do índice de determinado candidato, e o peso  $v_j$  corresponde a uma ponderação, sendo definido como critério majoritário.

Sendo que:

$$S^* = \max (S_i) \quad (13)$$

$$S^- = \min (S_i) \quad (14)$$

$$R^* = \max (R_i) \quad (15)$$

$$R^- = \min (R_i) \quad (16)$$

Costuma-se estabelecer  $v_j = 0,5$  com o objetivo de atingir o consenso entre critérios (ZENG et al., 2013). Com o cálculo de  $Q_i$  procede-se com a ordenação em ordem crescente, sendo a melhor opção a alternativa com menor valor de  $Q_i$ , sendo esta afirmação válida se respeitar duas condições (KREUZBERG et al., 2017):

**Condição 1:**  $Q(1)$  deve possuir vantagem aceitável sobre as demais, quando comparada com  $Q(2)$  (alternativa imediatamente posterior no *ranking*), conforme Equação (17):

$$Q(2) - Q(1) \geq DQ \quad (17)$$

em que  $Q(1)$  é o valor do índice do primeiro colocado no *ranking* e  $Q(2)$  do segundo colocado, e  $DQ$  corresponde a uma variável genérica correspondente a Equação (18)

$$DQ = \frac{1}{(n - 1)} \quad (18)$$

em que  $n$  corresponde ao número de alternativas.

**Condição 2:**  $Q(1)$  tem estabilidade aceitável na tomada de decisão, se além de melhor valor em  $Q$ , também for melhor em  $S$  e/ou  $R$ , sendo o melhor classificado os menores valores das variáveis.

### 3.3.3 MOORA

Assim como no método de TOPSIS, no método MOORA existe a necessidade da normalização dos dados contidos na matriz de decisão, obtendo-se deste modo a matriz de dados normalizada  $X'_{ij}$ . Posteriormente é necessária a atribuição de pesos em relação aos critérios considerados, havendo deste modo critérios benéficos e não benéficos que devem ser considerados. Por fim, calcula-se a pontuação de desempenho de cada alternativa, em que os critérios benéficos são adicionados enquanto os não benéficos são subtraídos para cada alternativa existente, conforme Equação (19) (AGRAWAL, 2021).

$$Y_i = \sum_{j=1}^g w_j \times X'_{ij} - \sum_{j=g+1}^n w_j \times X'_{ij} \quad (19)$$

em que:  $w_j$  corresponde ao peso do critério  $j$ ;  $g$  o número de critérios benéficos e  $(n-g)$  o número de critérios não benéficos;  $Y_i$  o desempenho da alternativa em relação aos critérios estabelecidos.

O *ranking* de alternativas é elaborado de forma decrescente, em que o maior valor de  $Y_i$  corresponde à melhor alternativa (AGRAWAL, 2021).

### 3.3.4 Information Entropy Method (IEM)

Os métodos MCDM elencados, apresentam em seus cálculos a influência de pesos atribuídos aos critérios de decisão. Um dos métodos amplamente utilizados para atribuição dos pesos aos critérios é o Método da Entropia – IEM. Segundo o trabalho de Li, Wang, Liu, Xin, Yan Gao (2011), a ideia básica do método da entropia é que quanto maior a diferença dos valores entre as alternativas avaliadas no mesmo critério, mais importante é critério. Consequentemente, quanto mais importante o critério, mais decisivo será na tomada de decisão. Por outro lado, se um critério não apresentar variabilidade entre as alternativas, o critério não possuirá papel importante na tomada de decisão.

Deste modo, o primeiro passo no cálculo do método IEM, consiste na normalização dos dados da matriz de decisão conforme a classificação qualitativa dos dados frente ao critério, sendo aplicado a Equação (20) para critérios benéficos, e Equação (21) para critérios não benéfico.

$$X'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (20)$$

$$X'_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (21)$$

Posteriormente, o cálculo da entropia ( $e_j$ ) de cada critério é realizado conforme Equação (22).

$$e_j = -k \times \sum_{i=1}^m (Y_{ij} \times \ln(Y_{ij})) \quad (22)$$

em que as variáveis  $k$  e  $Y_{ij}$  são calculadas conforme as Equações (23) e (24), respectivamente, e  $m$  correspondendo ao número de alternativas consideradas frente a cada critério.

$$k = \frac{1}{\ln(m)} \quad (23)$$

$$Y_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^m X'_{ij}} \quad (24)$$

Após o cálculo de  $e_j$  procede-se com o cálculo da redundância de entropia ( $d_j$ ) de cada critério, conforme Equação (25).

$$d_j = 1 - e_j \quad (25)$$

Por fim, calcula-se o peso de cada critério ( $w_j$ ) conforme Equação (26).

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (26)$$

em que  $n$  é o número de critérios.

## 4 METODOLOGIA

O presente trabalho consistiu em um estudo de caso para seleção de materiais referentes à confecção de um filtro para retenção de limalhas metálicas da fase aquosa de preparação de maionese em uma indústria alimentícia brasileira.

A primeira etapa do trabalho compreendeu a compilação de propriedades dos materiais disponíveis para construção do filtro como densidade, resistência à tração, módulo de Young, condutividade térmica, entre outros a fim de estabelecer critérios de seleção e construir uma matriz de decisão.

Em seguida, foi selecionada a estratégia de seleção dentre as possibilidades amplamente abordadas na literatura para tomada de decisão multicritério (*Multi-Criteria Decision Making* – MCDM) (CHAKRABORTY; CHATTERJEE, 2013):

- VIKOR (*Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno*);
- TOPSIS (*Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution*);
- MOORA (*Multi - Objective Optimization based on Ratio Analysis*).

Por fim, compilaram-se regras heurísticas de seleção de materiais, para uma gama de possibilidades de aplicação, visando atender critérios econômicos e técnicos em diferentes setores da indústria química e alimentícia.

### 4.1 Estudo de Caso

O caso abordado tratou da problemática encontrada em uma indústria alimentícia em que há a utilização da matéria-prima sal em solução aquosa, utilizada na preparação de maionese.

Conforme estudo de *Hazard Analysis and Critical Control Point* (HACCP) realizado na referida indústria, foi evidenciada a probabilidade de contaminação na fase aquosa de preparação da maionese por limalhas metálicas e outros metais presentes da matéria-prima sal.

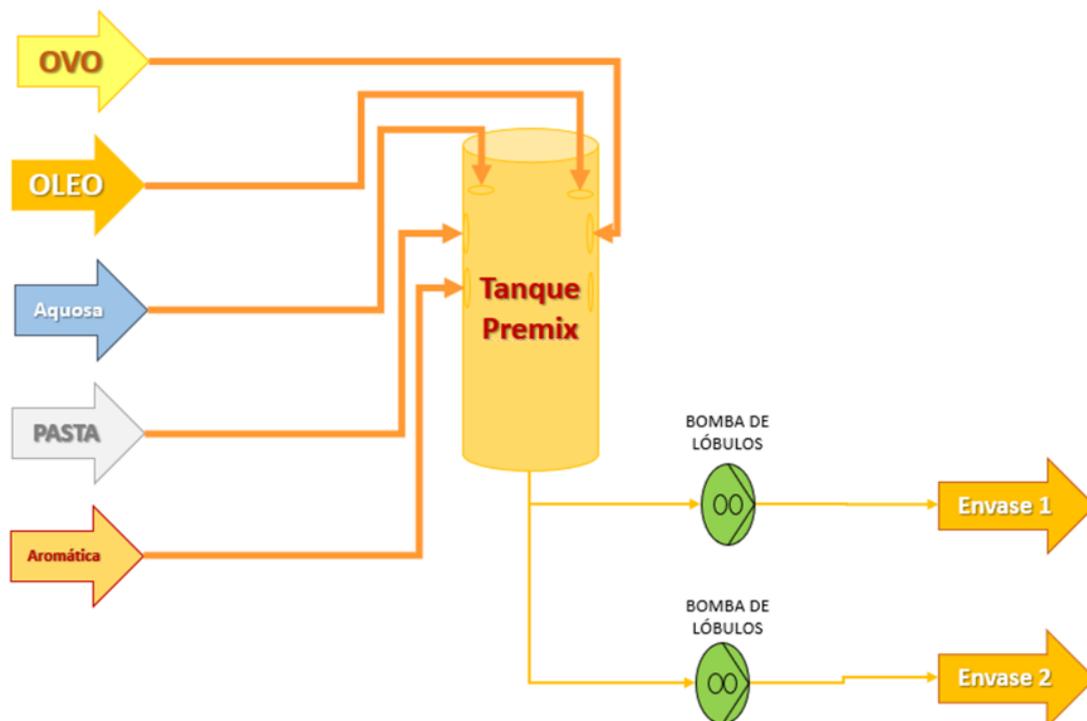
Por conseguinte, nas temáticas subsequentes são realizadas as etapas de tradução para seleção do material de construção do referido equipamento, ou seja, são especificados os

requisitos de projeto com o intuito de identificação das restrições que são impostas na seleção do material, e posterior etapa de triagem dentre os candidatos viáveis (ASHBY, 2013).

#### 4.1.1 Processo de produção de maionese

Para que seja possível a produção da maionese se faz necessário cinco matérias-primas, sendo elas: ovo, óleo, solução aquosa, pasta de amido e aromática (óleo de mostarda e páprica). As referidas matérias-primas devem ser preparadas adequadamente para que possam ser direcionadas ao “tanque premix”, se caracterizando como um reator semi-contínuo, em que ocorre, de fato, a produção da maionese, que após ser destinada ao envase, através de bombas de lóbulos, torna-se produto acabado ao passar por moinhos coloidais objetivando a trituração de produtos em suspensão. Na Figura 2, é ilustrado simplificadamente o sistema de produção de maionese.

Figura 2: Sistema de produção de maionese.

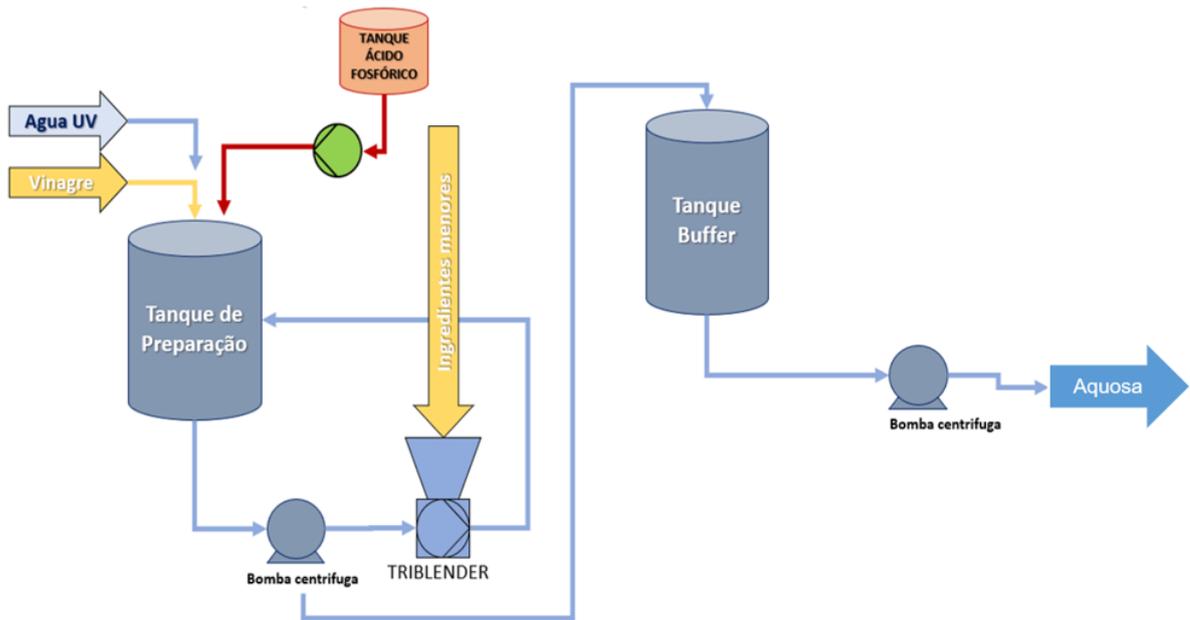


Fonte: Do autor (2022).

No caso específico da solução aquosa, o processo de produção/preparação consiste na mistura de água UV (proveniente do processo de desinfecção por ultravioleta), vinagre, ácido

fosfórico, junto ao tanque de preparação, e incremento de ingredientes menores (como o sal) através do “triblender”, sendo caracterizado por um equipamento de dissolução de compostos sólidos, como o sal, por exemplo. Na Figura 3 é apresentado o processo de produção de solução aquosa para produção de maionese.

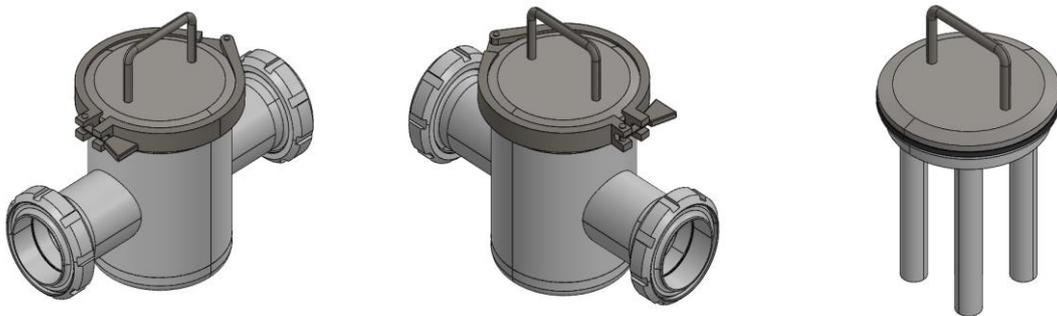
Figura 3: Sistema de preparação de solução aquosa.



Fonte: Do autor (2022).

Deste modo, como elencado anteriormente, a probabilidade de contaminação por limalhas metálicas advém do processo de preparação da solução aquosa, por meio da matéria-prima sal. Por conseguinte, para que haja redução do risco de contaminação, faz-se necessário a adoção de uma medida preventiva, que, neste caso específico, se dá por meio da instalação de elementos filtrantes que sejam capazes de capturar tais contaminações advindas do sal, ou seja, por meio de elementos magnéticos filtrantes, evidenciado na Figura 4.

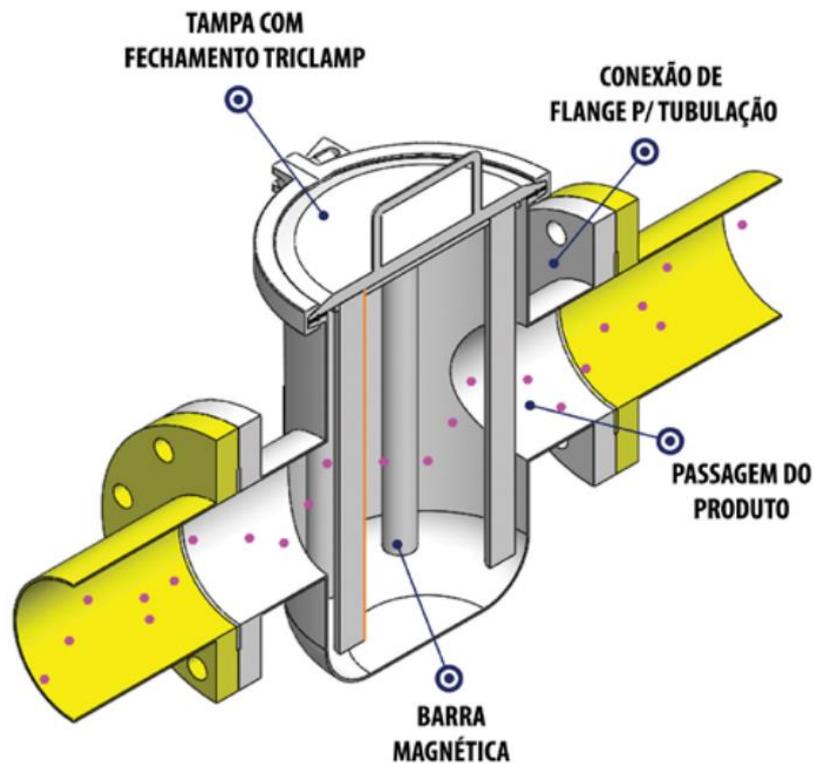
Figura 4: Design do elemento magnético filtrante.



Fonte: Do autor (2022).

Em suma, a descontaminação se dá pela passagem do fluido contaminado através das barras magnéticas do elemento magnético filtrante. Deste modo, conforme a densidade de fluxo magnético gerado, considerando que, para o referido estudo de caso, foi considerado uma densidade de fluxo magnético de 7500 Gauss conforme exigência do manual de boas práticas da referida indústria alimentícia, haverá a retenção das limalhas metálicas advindas do sal. O princípio de funcionamento do equipamento é evidenciado na Figura 5.

Figura 5: Princípio de funcionamento do elemento magnético filtrante.



Fonte: Oximag (2022).

Por conseguinte, avaliando-se o melhor local para instalação dos elementos filtrantes, constatou-se que, após o “tanque buffer”, seria o lugar mais oportuno, especificamente após a bomba centrífuga, visto que haveria variação de pressão ( $\Delta P$ ) suficiente para vencer a perda de carga proveniente do elemento filtrante. Além disso, seria o local mais adequado para posterior limpeza e manutenção do filtro devido à acessibilidade pela operação.

Deste modo, considerando o processo de produção de solução aquosa, aliado ao local proposto para instalação do elemento magnético filtrante, e particularidades do processo como, solução aquosa a base de sal e ácidos, vazão nominal de linha, pressão máxima de 10 bar, temperatura máxima em torno de 85 °C e condições/produtos utilizados para *Clean in place*

(CIP), o material de confecção do elemento filtrante deverá ser apto para as condições elencadas na tabela 2.

Tabela 2: Fatores Relativos ao Serviços/Condições de Empregabilidade.

<b>Parâmetro</b>	<b>Atribuição</b>
Temperatura mín.	20 °C
Temperatura máx.	85 °C
Pressão mín.	1 bar
Pressão operação	3 a 5 bar
Pressão máx.	10 bar
Composição do Fluido (variação de pH: ácido)	Água UV + Vinagre + Ácido Fosfórico + Sal ...

Fonte: Do autor (2022).

## 4.2 Seleção do Material de Construção

Empregou-se a metodologia MCDM, de modo que foram elencados os materiais conforme os critérios:

1. Classe de materiais: materiais metálicos, devido à disponibilidade no mercado, e consequentemente, facilidade de usinagem;
2. Aptidão magnética: metais ferrosos (apenas aços inoxidáveis) e metais não ferrosos (alumínio e ligas; cobre e ligas; níquel e ligas; titânio, zircônio e ligas). Devido à disponibilidade no mercado, foi delineado o emprego de aços inoxidáveis, especificamente austeníticos, visto que não apresentam propriedades magnéticas e deste modo, não interfere no campo magnético gerado pelo imã permanente presente no elemento magnético filtrante (Neodímio - NdFeB);
3. Lista positiva conforme ANVISA para materiais em contato direto com alimento - RDC 498/2021.

Deste modo, foram elencados os materiais candidatos, aços inoxidáveis AISI: 304, 304 L, 316, 316 L, 321 e 347.

Posteriormente, foram selecionados os critérios pertinentes para avaliação dos candidatos conforme estudo de caso e arcabouço literário, sendo as propriedades: custo (por unidade de filtro), limite de resistência (Mpa), limite de escoamento (Mpa), resistência à

corrosão, ductilidade (%AL) e dureza (HRB). Cabe salientar que propriedades como densidade, módulo de Young e condutividade térmica foram excluídas da matriz de decisão devido a não variabilidade frente aos materiais candidatos elencados, exercendo deste modo, nenhuma influência no processo de seleção. Além disso, o critério resistência a corrosão, se caracteriza por um critério qualitativo e, deste modo, para inserção nos cálculos da metodologia MCDM, foi necessária a conversão para valores quantitativos, similar ao trabalho de Rao (2008), conforme Tabela 3.

Tabela 3: Transformação do critério resistência a corrosão para valores quantitativos.

<b>Tipos mais recorrentes de corrosão - Indústria Alimentícia</b>	<b>304</b>	<b>304 L</b>	<b>316</b>	<b>316L</b>	<b>321</b>	<b>347</b>
Uniforme			Dado não disponível.			
Intergranular	SIM	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
Sob Tensão	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Puntiforme	SIM	SIM	POUCO	POUCO	SIM	SIM
Galvânica			Dado não disponível.			
Classificação frente as condições, conforme Rao (2008)	Baixa - 0,335	Média - 0,5	Acima da Média - 0,59	Muito alta - 0,745	Média - 0,5	Média - 0,5

Fonte: Adaptado de Telles (2003).

Deste modo, considerando os materiais elegíveis e os critérios necessários que precisam ser avaliados frente as condições de serviço foi estabelecida a matriz decisão X, conforme Tabela 4.

Tabela 4: Matriz de Decisão X.

<b>Material SAE/AISI</b>	<b>Custo (unidade)</b>	<b>Lim. de resistência (<math>\sigma</math> máx) Mpa</b>	<b>Lim. de escoamento (<math>\sigma</math> esc.) Mpa</b>	<b>Resist. corrosão</b>	<b>Ductilidade, %AL (Alongamento 50mm)</b>	<b>Dureza Rockwell B (HRB)</b>
304	R\$ 6.470,00	689	296	0,335	54	81
304 L	R\$ 7.764,00	672	338	0,500	53	83
316	R\$ 9.705,00	618	360	0,590	53	83
316 L	R\$ 10.850,00	618	360	0,745	53	83
321	R\$ 8.087,50	632	246	0,500	46	84
347	R\$ 9.381,50	645	248	0,500	51	87

Fonte: Do autor (2022).

Posterior ao estabelecimento da matriz de decisão necessária fez-se a atribuição de pesos aos critérios elencados conforme método IEM, visto à sua ampla aplicabilidade em estudo

recentes, como o trabalho de Agrawal (2021). Deste modo, conforme resolução matemática explicitada no Apêndice A, os pesos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Pesos atribuído aos critérios adotados, conforme método IEM.

<b>Custo (unidade)</b>	<b>Lim. resistência (<math>\sigma</math> máx) Mpa</b>	<b>Lim. de escoamento (<math>\sigma</math> esc.) Mpa</b>	<b>Resistência a corrosão</b>	<b>Ductilidade, %AL (Alongamento 50mm)</b>	<b>Dureza Rockwell B (HRB)</b>
0,1426	0,2768	0,2096	0,1282	0,0956	0,1472

Fonte: Do autor (2022).

Além disso, todos os métodos MCDM necessitam da atribuição de variável qualitativa aos critérios utilizados, como benéficos (o máximo favorece a problemática) ou não benéficos (o mínimo favorece a problemática), e deste modo, foram atribuídos aos critérios:

1. Custo: critério a ser minimizado, e deste modo, não benéfico;
2. Limite de resistência: critério a ser maximizado, visto maior resistência frente as cargas aplicadas, proveniente do sistema de transporte de fluido. Portanto, se caracteriza como critério benéfico;
3. Limite de escoamento: critério a ser maximizado, visto que corresponde a tensão máxima que o material suporta ainda no regime elástico de deformação (deformação reversível). Portanto, se caracteriza como critério benéfico;
4. Resistência a corrosão: critério a ser maximizado, e deste modo, benéfico;
5. Ductilidade: critério a ser maximizado, visto que é a medida do grau de deformação plástica desenvolvida até a fratura (se baixa, o material é considerado frágil). Portanto, se caracteriza como critério benéfico;
6. Dureza: critério a ser maximizado, visto que é uma medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada, o que não é desejado, pois o material não retorna ao seu estado inicial. Portanto, se caracteriza como critério benéfico.

Então, para ambos os métodos MCDM elencados, TOPSIS, VIKOR e MOORA, procedeu-se com a resolução matemática conforme equacionamentos abordados que são evidenciados no Apêndice B, C e D separadamente para cada metodologia.

Deste modo, chegou-se ao *ranking* dos materiais. Posteriormente foi calculado o coeficiente da correlação de *Spearman* ( $R_s$ ), via função CORREL através do Excel, objetivando-se a comparação entre os métodos abordados no que tange a existência de relação entre os métodos, aleatoriedade ou inexistência de relação. O cálculo do coeficiente  $R_s$  é

realizado conforme Equação (23), correspondendo ao cálculo efetuado pelo Excel através da função CORREL.

$$R_s = 1 - 6 \times \frac{\sum_{i=1}^m D_i^2}{m \times (m^2 - 1)} \quad (23)$$

em que  $D_i$  corresponde à diferença no *ranking* para determinado candidato de seleção frente a duas metodologias MCDM, e  $m$  o número de candidatos de materiais para seleção.

Por fim após a aplicação dos métodos para o conjunto de dados evidenciado na matriz de decisão X, e obtido o *ranking* final para cada metodologia, foi realizado uma análise de sensibilidade, em que foram alterados os pesos associados aos critérios e exclusão do pior material candidato frente a cada metodologia, objetivando analisar a existência ou não de problemas relacionados à reversão de classificação.

Cabe salientar que a alteração nos pesos atribuídos a cada critério via percepção do tomador de decisão (autor do trabalho) visou a maior influência dos critérios que na percepção do autor são mais críticos, sendo: custo, limite de resistência, limite de escoamento e resistência a corrosão. Na Tabela 6 são apresentados os novos valores dos pesos atribuído aos critérios conforme percepção do tomador de decisão.

Tabela 6: Peso dos critérios estabelecidos pelo tomador de decisão.

<b>Custo (unidade)</b>	<b>Lim. resistência (<math>\sigma</math> máx) Mpa</b>	<b>Lim. de escoamento (<math>\sigma</math> esc.) Mpa</b>	<b>Resistência a corrosão</b>	<b>Ductilidade, %AL (Alongamento 50mm)</b>	<b>Dureza Rockwell B (HRB)</b>
0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,1000	0,1000

Fonte: Do autor (2022).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a aplicação dos métodos MCDM para o conjunto de dados evidenciado na matriz de decisão X, foi obtido o *ranking* final de materiais para cada metodologia, conforme Tabela 7.

Tabela 7: *Ranking* dos materiais conforme cada metodologia MCDM.

Material	TOPSIS	VIKOR	MOORA
304	4	2	4
304 L	2	1	1
316	3	5	3
316 L	1	4	2
321	5	6	6
347	6	3	5

Fonte: Do autor (2022).

Em suma, os melhores materiais conforme comparação entre *ranking* são os aços inoxidáveis AISI 304 L e AISI 316 L. Conforme Telles (2003), aços austeníticos do tipo 304 são os mais empregados por apresentarem uma combinação entre resistência a corrosão e custo não muito elevado, estando em 50% das aplicações de aços inoxidáveis em geral. Já com o segmento 316, a existência do molibdênio confere ao material uma melhor resistência a corrosão, principalmente em meios ácidos, conforme problemática em questão, mas por outro lado um custo mais elevado. Deste modo, deve-se haver a ponderação frente a condição de uso e custo envolvido, pois a principal diferença dos mais bem colocados no *ranking* está no quesito econômico e resistência a corrosão.

Além disso, cabe destacar que os candidatos mais promissores, aços inoxidáveis AISI 304 L e AISI 316 L, apresentam a designação “L” que corresponde a aços de baixo carbono, com 0,03% de carbono na composição neste caso. Esta especificidade confere aos mesmos uma melhor resistência a corrosão, em particular à corrosão intergranular, quando comparado a versões com carbono normal, com 0,08% de carbono, no caso dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 316 (TELLES, 2003). A composição de cada candidato é evidenciada conforme Tabela 8.

Tabela 8: Composição de cada candidato.

Candidatos - SAE/AISI	Composição (%). Restante Fe
304	0,08 C;2 Mn; 1 Si; 18 a 20 Cr; 8 a 10,5 Ni
304 L	0,03 C;2 Mn; 1 Si; 18 a 20 Cr; 8 a 12 Ni
316	0,08 C;2 Mn; 1 Si; 16 a 18 Cr; 10 a 14 Ni; 2 a 3 Mo
316 L	0,03 C;2 Mn; 1 Si; 16 a 18 Cr; 10 a 14 Ni; 2 a 3 Mo
321	0,08 C;2 Mn; 1 Si; 17 a 19 Cr; 9 a 12 Ni; 5x% C Ti
347	0,08 C;2 Mn; 1 Si; 17 a 19 Cr; 9 a 13 Ni; 8x% C Nb + Ta

Fonte: Adaptado de Telles (2003).

Posteriormente foi calculado a correlação de *Spearman* para comparação entre os métodos abordados, cujos resultados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Correlação de *Spearman* aplicados aos métodos MCDM.

Comparação	$R_s$
TOPSIS-VIKOR	0,20
TOPSIS-MOORA	0,89
VIKOR-MOORA	0,54

Fonte: Do autor (2022).

O valor do coeficiente  $R_s$  frente a problemática explicitada atesta a existência ou não de relações entre as metodologias comparadas, sendo uma relação aleatória ou inexistente, quando o coeficiente  $R_s$  da correlação de *Spearman* se aproxima do zero. Já para casos em que existe uma relação estabelecida de crescimento de uma variável frente a outra, são esperados valores de  $R_s$  próximos de 1 (AGRAWAL, 2021). Deste modo, pode-se afirmar que as metodologias TOPSIS e VIKOR não apresentam uma relação, ou seja não são esperados resultados semelhantes entre as duas metodologias no *ranking* final. Por outro lado, TOPSIS e MOORA apresentam uma relação, sendo esperados resultados semelhantes no *ranking* final, o que é percebido quando analisamos o *ranking* final conforme Tabela 7.

Com o objetivo de demonstrar a dependência das metodologias frente aos pesos atribuídos aos critérios, procedeu-se com a alteração dos pesos associados aos critérios via percepção do tomador de decisão chegando deste modo ao novo *ranking* dos materiais, conforme Tabela 10. A percepção do tomador de decisão se baseou na valorização de critérios que na percepção do autor são de maior importância frente as condições de serviço, em detrimento de critérios de menor importância, como ductilidade e dureza, que estão mais associados a aptidão do material para usinagem, além do fato de que o tomador de decisão/projetista deve ter a capacidade e liberdade de atribuir pesos aos critérios conforme sua experiência e vivência no meio industrial.

Tabela 10: *Ranking* final conforme pesos atribuídos via tomador de decisão.

Candidato	TOPSIS <sup>IEM</sup>	VIKOR <sup>IEM</sup>	MOORA <sup>IEM</sup>	TOPSIS*	VIKOR*	MOORA*
304	4	2	4	5	2	4
304 L	2	1	1	3	1	2
316	3	5	3	2	4	3
316 L	1	4	2	1	3	1
321	5	6	6	4	6	5
347	6	3	5	6	5	6

<sup>IEM</sup> *ranking* obtido com  $w_j$  calculado via método da entropia.

\* *ranking* obtido via alteração de  $w_j$  – percepção do autor.

Fonte: Do autor (2022).

Comparando o posicionamento do *ranking* frente as alterações de  $w_j$  via percepção do tomador de decisão, conforme Tabela 10, os materiais com melhores posicionamentos no *ranking* continuam sendo os aços inoxidáveis AISI 304 L e AISI 316 L. No entanto, houve alterações no *ranking* de todas as metodologias, demonstrando a dependência das metodologias frente aos pesos atribuídos aos critérios e importância da atribuição deles no processo de escolha.

Além disso, com o objetivo de verificar a existência ou não do problema de reversibilidade no *ranking*, foi realizada a modificação do número de candidatos disponíveis para seleção com a exclusão do pior candidato conforme *ranking* demonstrado na Tabela 7 para cada metodologia. Procedeu-se com os novos cálculos dos pesos via método IEM, e resolução matemática para cada metodologia novamente, obtendo-se um novo *ranking* apresentado na Tabela 11.

Tabela 11: Comparação do *ranking* final frente a exclusão dos piores candidatos.

Candidato	TOPSIS	VIKOR	MOORA	TOPSIS**	VIKOR**	MOORA**
304	4	2	4	4	2	4
304 L	2	1	1	2	1	1
316	3	5	3	3	5	3
316 L	1	4	2	1	4	2
321	5	6	6	5	-	-
347	6	3	5	-	3	5

\*\* *ranking* obtido com exclusão do pior candidato.

- Candidato excluído.

Fonte: Do autor (2022).

Com a exclusão dos piores materiais posicionados para cada metodologia e novos cálculos dos *rankings*, não houve variabilidades quanto ao posicionamento dos candidatos para cada método MCDM, conforme demonstrado na Tabela 11.

Analisando-se contribuições presentes no segmento MCDM, como o trabalho de Zanakis et al. (1998), Kong (2011) são relatados problemas de reversão de *ranking* no que tange a metodologia TOPSIS, associado a normalização vetorial. Já no trabalho de Agrawal (2021) é relatado a reversão de *ranking* para as metodologias TOPSIS e MOORA. No entanto, no presente trabalho, todas as metodologias MCDM não apresentaram reversão de ordem, atestando deste modo, que ao incluir ou excluir materiais candidatos, a ordenação final não se modifica de maneira não esperada, demonstrando deste modo, solidez quanto aos métodos aplicados neste estudo de caso.

Além disso, outras contribuições no segmento MCDM, como os trabalhos de Chakraborty e Chatterjee (2013) e Agrawal (2021), constataram que:

1. O método VIKOR se baseia na medida de proximidade com a solução ideal e na seleção da melhor alternativa a partir de um conjunto de candidatos viáveis na presença dos critérios elencados, determinando uma solução de compromisso.
2. O método TOPSIS se ampara no conceito de que o melhor candidato escolhido possui a menor distância da solução PIS e maior distância da solução NIS. Deste modo, o método se baseia em dois pontos de referência utilizando o procedimento de normalização vetorial, desconsiderando a importância relativa da distância desses dois pontos. Por conseguinte, o melhor candidato nesta metodologia nem sempre é o mais próximo da solução PIS.
3. A diferença entre as metodologias TOPSIS e VIKOR também está na normalização adotada, visto que o método VIKOR utiliza a normalização linear, enquanto o método TOPSIS utiliza a normalização vetorial, e deste modo, o valor normalizado pode ser diferente para diferentes unidades de avaliação de um determinado critério.
4. O método VIKOR utiliza da verificação de duas condições, testando vantagens de aceitabilidade e estabilidade do melhor candidato frente aos demais, em que no caso de alguma condição não satisfeita, o método propõe um conjunto de soluções compromissos baseados na utilidade máxima do grupo e no mínimo arrependimento individual do candidato oponente.
5. O método MOORA se baseia na comparação entre pontuações dos critérios associados aos candidatos, em que é realizado a subtração da pontuação de critérios não benéficos e adição de critérios benéficos, baseando-se na ponderação e classificação qualitativa de beneficidade.

Deste modo, considerando os resultados obtidos neste trabalho e abordagens literárias, é expressamente recomendada a adoção de múltiplos métodos MCDM para auxílio no processo de escolha frente a uma mesma problemática, objetivando uma tomada de decisão mais assertiva.

Por fim, com base nos critérios avaliados e condições estabelecidas no estudo de caso, pode-se afirmar que para emprego de materiais em linha de produção com fluidos aquosos, submetidas a 10 bar, ambiente ácido e temperatura até 85°C, os metais austeníticos são os mais recomendados considerando critérios técnico-econômicos, especificamente os aços inoxidáveis da série 300 (aço níquel-cromo). Na referida indústria alimentícia em que é explicitada a problemática, optou-se pelo material com melhor resistência a corrosão, aço inoxidável 316 L, devido ao melhor tempo de vida útil em detrimento do custo.

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho consistiu em um estudo de caso da instalação de um elemento magnético filtrante em uma linha de produção de maionese com ênfase na escolha do material de construção do equipamento. O levantamento das condições de serviço do elemento filtrante, em linha de produção com fluidos aquosos, submetida a 10 bar, ambiente ácido e temperatura até 85°C evidenciou a adequabilidade dos metais austeníticos considerando critérios técnico-econômicos.

Assim foi construída uma matriz de decisão, a qual foram aplicadas as metodologias MCDM (TOPSIS, VIKOR e MOORA). Os melhores candidatos identificados foram os aços inoxidáveis AISI 304 L e AISI 316 L, estando em conformidade com os principais materiais empregados no segmento alimentício. Ambos os candidatos são considerados aços de baixo carbono, com até 0,03% de carbono, e deste modo apresentam melhor resistência a corrosão em comparação com aços inoxidáveis com composição de carbono normal, com 0,08% de carbono. Com base no estudo realizado e arcabouço literário é expressamente recomendado a utilização de diferentes métodos MCDM para apoio no processo de tomada de decisão, trazendo deste modo mais confiabilidade no processo de seleção. Além disso, não foi constatado, frente ao estudo de caso, problemas de reversibilidade no *ranking* final em nenhuma das metodologias MCDM abordadas.

Deste modo, pode-se afirmar que o presente trabalho auxilia os profissionais industriais do segmento alimentício no processo de tomada de decisão da seleção de materiais para os processos deste ramo industrial. Para trabalhos futuros, recomenda-se a utilização de outros métodos de normalização para as metodologias MCDM e ampliação de candidatos para aplicação na matriz de decisão.

Por fim, cabe destacar que na referida indústria alimentícia optou-se pela instalação do aço inoxidável AISI 316 L, devido a melhor resistência a corrosão e conseqüentemente melhor tempo de vida útil, em detrimento do custo.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Vigilância Sanitária. ANVISA. **Biblioteca dos Alimentos**. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/regulamentacao/legislacao/bibliotecas-tematicas/arquivos/biblioteca-de-alimentos>. Acesso em: 04 abril 2022.
- AGRAWAL, Rohit. **Sustainable material selection for additive manufacturing technologies: A critical analysis of rank reversal approach**. Journal of Cleaner Production, v. 296, p. 126500, 2021.
- ASHBY, Michael. **Seleção de materiais no projeto mecânico**. Elsevier Brasil, 2013.
- CALLISTER, William D. Jr.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2016.
- CHAKRABORTY, Shankar; CHATTERJEE, Prasenjit. **Selection of materials using multi-criteria decision-making methods with minimum data**. Decision Science Letters, v. 2, n. 3, p. 135-148, 2013.
- G1 Minas - Belo Horizonte. **Caso Backer**. disponível em G1: [https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2020/06/09/ministerio-da-agricultura-diz-que-contaminacao-de-cervejas-da-backer-comecou-em-janeiro-de-2019.ghtml](https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2020/06/09/ministerio-da-agricultura-diz-que-contaminacao-de- cervejas-da-backer-comecou-em-janeiro-de-2019.ghtml). Acesso em 5 de Dezembro de 2021,
- GENTIL, V. (2011). **Corrosão**. 6 ed. G. GEN, Ed. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-1944-4/>. Acesso em 19 de Agosto de 2021,
- GREEN, D. W., & PERRY, R. H. **Perry's Chemical Engineer's Handbook**. 8 ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2008.
- KOCH, Gerhardus. **Cost of corrosion**. Trends in oil and gas corrosion research and technologies, p. 3-30, 2017.
- KONG, F., 2011. **Rank reversal and rank preservation in TOPSIS**. In: Advanced Materials Research, vol. 204. Trans Tech Publications Ltd, pp. 36e41.
- KREUZBERG, Fernanda et al. **Métodos TOPSIS e VIKOR na verificação da resource advantage theory em empresas têxteis brasileiras**. Contabilidad y Negocios, v. 12, n. 23, p. 96-110, 2017.
- LÓPEZ-GÓMEZ, A., & BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. **Food plant design**. CRC Press, 2005.
- MIRANDA, Luiz Miguel. **Contribuição a um modelo de análise multicritério para apoio à decisão da escolha do corredor de transporte para escoamento da produção de granéis agrícolas de Mato Grosso**. Universidade Federal do Rio de Janeiro–COPPE, 2008.
- OPRICOVIC, Serafim; TZENG, Gwo-Hshiung. **Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS**. European journal of operational research, v. 156, n. 2, p. 445-455, 2004.

- RAO, R. Venkata; DAVIM, Joao Paulo. **A decision-making framework model for material selection using a combined multiple attribute decision-making method.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 35, n. 7, p. 751-760, 2008.
- SARAVACOS, G. D. **Handbook of food processing equipment.** Kluwer Academic/Plenum, 2002.
- TELLES, P. C. **Materiais para equipamentos de processo.** 6 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.
- THAKKER, A. et al. **A novel approach to materials selection strategy case study: Wave energy extraction impulse turbine blade.** Materials & Design, v. 29, n. 10, p. 1973-1980, 2008.
- WELCH, R. W., & MITCHELL, P. C. (2000). **Food processing: a century of change.** British Medical Bulletin, Volume 56, pp. 1-17. Disponível em: <https://doi.org/10.1258/0007142001902923>. Acesso: 11 fev. 2022.
- ZANAKIS, Stelios H. et al. **Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods.** European journal of operational research, v. 107, n. 3, p. 507-529, 1998.
- ZENG, Qiang-Lin; LI, Dan-Dan; YANG, Yi-Bin. **VIKOR method with enhanced accuracy for multiple criteria decision making in healthcare management.** Journal of medical systems, v. 37, n. 2, p. 1-9, 2013.

## APÊNDICE A – Cálculo dos pesos dos critérios via método IEM

O primeiro passo no cálculo do método IEM, consiste na classificação dos critérios em benéficos ou não benéficos, conforme abaixo.

<b>Critério</b>	<b>Classificação</b>
Custo - (Custo por unidade)	Não benéfico
Limite de resistência ( $\sigma$ máx.) Mpa	Benéfico
Limite de escoamento ( $\sigma$ escoamento) Mpa	Benéfico
Resistência a corrosão - Frente ao serviço	Benéfico
Ductilidade, %AL (Alongamento 50mm)	Benéfico
Dureza Rockwell B (HRB)	Benéfico

Posteriormente, é realizado a normalização dos dados da matriz de decisão X via Equação (20) para critérios benéficos, e Equação (21) para critérios não benéfico.

$$X'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (20)$$

$$X'_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (21)$$

Deste modo são obtidos os dados normalizados  $X'_{ij}$ :

<b>Candidatos SAE/AISI</b>	<b>Custo (R\$)</b>	<b>Lim. resistência (<math>\sigma</math> máx) Mpa</b>	<b>Lim. de escoamento (<math>\sigma</math> esc.) Mpa</b>	<b>Resistência a corrosão</b>	<b>Ductilidade, %AL (Alongamento 50mm)</b>	<b>Dureza Rockwell B (HRB)</b>
304	R\$ 1,00	1,00	0,44	0,00	1,00	0,00
304 L	R\$ 0,70	0,76	0,81	0,40	0,88	0,33
316	R\$ 0,26	0,00	1,00	0,62	0,88	0,33
316 L	R\$ 0,00	0,00	1,00	1,00	0,88	0,33
321	R\$ 0,63	0,20	0,00	0,40	0,00	0,50
347	R\$ 0,34	0,38	0,02	0,40	0,63	1,00

Objetivando o cálculo da entropia de cada critério ( $e_j$ ), procedeu-se com a resolução das variáveis  $k$  e  $Y_{ij}$  via Equações (23) e (24).

$$k = \frac{1}{\ln(m)} \quad (23)$$

$$Y_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^m X'_{ij}} \quad (24)$$

Deste modo, com seis candidatos de materiais para aplicação,  $m = 6$ , obtém-se  $k = 0,5581$  e matriz  $Y_{ij}$ :

Candidatos SAE/AISI	Custo (R\$)	Lim. resistência ( $\sigma$ máx) Mpa	Lim. de escoamento ( $\sigma$ esc.) Mpa	Resistência a corrosão	Ductilidade, %AL (Alongamento 50mm)	Dureza Rockwell B (HRB)
304	R\$ 0,34	0,428	0,134	0,000	0,235	0,000
304 L	R\$ 0,24	0,325	0,247	0,142	0,206	0,133
316	R\$ 0,09	0,000	0,306	0,220	0,206	0,133
316 L	R\$ 0,00	0,000	0,306	0,353	0,206	0,133
321	R\$ 0,22	0,084	0,000	0,142	0,000	0,200
347	R\$ 0,11	0,163	0,005	0,142	0,147	0,400

Consequente a entropia de cada critério é calculada via Equação (22):

$$e_j = -k \times \sum_{i=1}^m (Y_{ij} \times \ln(Y_{ij})) \quad (22)$$

Obtendo-se:

Candidatos SAE/AISI	Custo (R\$)	Lim. resistência ( $\sigma$ máx) Mpa	Lim. de escoamento ( $\sigma$ esc.) Mpa	Resistência a corrosão	Ductilidade, %AL (Alongamento 50mm)	Dureza Rockwell B (HRB)
304	-0,3669	-0,3633	-0,2697	0,0000	-0,3405	0,0000
304 L	-0,3426	-0,3653	-0,3455	-0,2774	-0,3254	-0,2687
316	-0,2155	0,0000	-0,3624	-0,3330	-0,3254	-0,2687
316 L	0,0000	0,0000	-0,3624	-0,3676	-0,3254	-0,2687
321	-0,3305	-0,2086	0,0000	-0,2774	0,0000	-0,3219
347	-0,2480	-0,2954	-0,0281	-0,2774	-0,2819	-0,3665
Soma	-1,5036	-1,2325	-1,3682	-1,5328	-1,5985	-1,4944
$e_j$	0,8392	0,6879	0,7636	0,8555	0,8921	0,8340

Posteriormente procede-se com o cálculo da redundância de entropia ( $d_j$ ) conforme Equação (25).

$$d_j = 1 - e_j \quad (25)$$

Obtendo-se os valores da redundância de entropia ( $d_j$ ):

<b>Candidatos SAE/AISI</b>	<b>Custo (R\$)</b>	<b>Lim. resistência (<math>\sigma</math> máx) Mpa</b>	<b>Lim. de escoamento (<math>\sigma</math> esc.) Mpa</b>	<b>Resistência a corrosão</b>	<b>Ductilidade, %AL (Alongamento 50mm)</b>	<b>Dureza Rockwell B (HRB)</b>
$d_j$	0,1608	0,3121	0,2364	0,1445	0,1079	0,1660

Por fim, calcula-se o peso de cada critério ( $w_j$ ) conforme Equação (26).

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (26)$$

em que  $n=6$ , correspondendo a quantidade de critérios.

Deste modo, obtém-se os pesos para cada critério ( $w_j$ ):

<b>Custo (R\$)</b>	<b>Lim. resistência (<math>\sigma</math> máx) Mpa</b>	<b>Lim. de escoamento (<math>\sigma</math> esc.) Mpa</b>	<b>Resistência a corrosão</b>	<b>Ductilidade, %AL (Alongamento 50mm)</b>	<b>Dureza Rockwell B (HRB)</b>
0,1426	0,2768	0,2096	0,1282	0,0956	0,1472

## APÊNDICE B – Método TOPSIS

A metodologia TOPSIS, inicia sua abordagem matemática com a normalização da matriz de decisão X, sendo adotado neste trabalho a normalização vetorial conforme Equação (2).

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (2)$$

Obtendo-se deste modo a matriz normalizada  $r_{ij}$ , abaixo.

<b>Candidatos SAE/AISI</b>	<b>Custo (R\$)</b>	<b>Lim. resistência (σ máx) Mpa</b>	<b>Lim. de escoamento (σ esc.) Mpa</b>	<b>Resistência a corrosão</b>	<b>Ductilidade, %AL (Alongamento 50mm)</b>	<b>Dureza Rockwell B (HRB)</b>
304	0,2992	0,4353	0,3876	0,2521	0,4261	0,3959
304 L	0,3591	0,4245	0,4426	0,3763	0,4182	0,4057
316	0,4489	0,3904	0,4715	0,4441	0,4182	0,4057
316 L	0,5018	0,3904	0,4715	0,5607	0,4182	0,4057
321	0,3741	0,3993	0,3222	0,3763	0,3630	0,4106
347	0,4339	0,4075	0,3248	0,3763	0,4024	0,4253

Posteriormente, calcula-se a matriz ponderada  $v_{ij}$ , conforme Equação (3):

$$v_{ij} = w_{ij} \times r_{ij} \quad (3)$$

Cabe salientar que o peso de cada critério  $w_{ij}$  foi obtido conforme Apêndice A, e deste modo, é obtido a matriz  $v_{ij}$  abaixo.

<b>Candidatos SAE/AISI</b>	<b>Custo (R\$)</b>	<b>Lim. resistência (σ máx) Mpa</b>	<b>Lim. de escoamento (σ esc.) Mpa</b>	<b>Resistência a corrosão</b>	<b>Ductilidade, %AL (Alongamento 50mm)</b>	<b>Dureza Rockwell B (HRB)</b>
304	0,0427	0,1205	0,0812	0,0323	0,0407	0,0583
304 L	0,0512	0,1175	0,0928	0,0482	0,0400	0,0597
316	0,0640	0,1081	0,0988	0,0569	0,0400	0,0597
316 L	0,0716	0,1081	0,0988	0,0719	0,0400	0,0597
321	0,0533	0,1105	0,0675	0,0482	0,0347	0,0604
347	0,0619	0,1128	0,0681	0,0482	0,0385	0,0626

Posteriormente é realizada a identificação da solução ideal (PIS) e da solução anti-ideal (NIS), considerando o caráter benéfico ou não de cada critério, conforme explicitado no Apêndice A. Deste modo são utilizadas as Equações (4) para PIS e (5) para NIS:

$$I_j^+ = (\max v_{i1}, \max v_{i2}, \max v_{i3} \dots \max v_{in}) \quad (1 \leq i \leq m) \quad (4)$$

$$I_j^- = (\min v_{i1}, \min v_{i2}, \min v_{i3} \dots \min v_{in}) \quad (1 \leq i \leq m) \quad (5)$$

	<b>Custo (R\$)</b>	<b>Lim. resistência (σ máx) Mpa</b>	<b>Lim. de escoamento (σ esc.) Mpa</b>	<b>Resistência a corrosão</b>	<b>Ductilidade %AL (Alongamento 50mm)</b>	<b>Dureza Rockwell B (HRB)</b>
<b>PIS</b> (Solução ideal)	0,0427	0,1205	0,0988	0,0719	0,0407	0,0626
<b>NIS</b> (Solução anti-ideal)	0,0716	0,1081	0,0675	0,0323	0,0347	0,0583

O próximo passo consiste no cálculo da distância (D) da solução ideal e cada alternativa (I+) e da situação anti-ideal e cada alternativa (I-), de acordo com as equações (6) e (7):

$$D^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - I_j^+)^2} \quad (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n) \quad (6)$$

$$D^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - I_j^-)^2} \quad (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n) \quad (7)$$

Por fim, calcula-se o coeficiente de priorização expresso pelo Coeficiente C, se caracterizando pela aproximação relativa dos dados com a solução ideal.

$$C = \frac{D^-}{D^- + D^+} \quad (8)$$

Deste modo, as alternativas são elencadas em ordem decrescentes no intervalo de [0,0,1,0].

<b>Candidatos SAE/AISI</b>	<b>D+</b>	<b>D-</b>	<b>Coefficiente C</b>	<b>Ordenação Decrescente</b>
304	0,0435	0,0348	0,4447	4
304 L	0,0262	0,0377	0,5904	2
316	0,0290	0,0409	0,5849	3
316 L	0,0316	0,0507	0,6163	1
321	0,0423	0,0244	0,3658	5
347	0,0440	0,0201	0,3132	6

Deste modo, o *ranking* gerado para cada candidato é explicitado abaixo.

<b>Material</b>	<b>TOPSIS</b>
304	4
304 L	2
316	3
316 L	1
321	5
347	6

### APÊNDICE C – Método VIKOR

A partir da matriz de decisão X, são denotados os melhores ( $f_j^*$ ) e piores ( $f_j^-$ ) valores para cada critério, considerando se o critério é benéfico ou não.

Candidatos SAE/AISI	Custo (R\$)	Lim. resistência ( $\sigma$ máx) Mpa	Lim. de escoam. ( $\sigma$ esc.) Mpa	Resistência a corrosão	Ductilidade, %AL (Alongamento 50mm)	Dureza Rockwell B (HRB)
304	R\$ 6.470,00	689,00	296,00	0,34	54,00	81,00
304 L	R\$ 7.764,00	672,00	338,00	0,50	53,00	83,00
316	R\$ 9.705,00	618,00	360,00	0,59	53,00	83,00
316 L	R\$ 10.850,00	618,00	360,00	0,75	53,00	83,00
321	R\$ 8.087,50	632,00	246,00	0,50	46,00	84,00
347	R\$ 9.381,50	645,00	248,00	0,50	51,00	87,00
Melhor ( $f_j^*$ )	R\$ 6.470,00	689,00	360,00	0,75	54,00	87,00
Pior ( $f_j^-$ )	R\$ 10.850,00	618,00	246,00	0,34	46,00	81,00

Posteriormente, calcula-se o valor das variáveis  $S_i$  e  $R_i$ , em que  $w_j$  foi obtido via método IEM – Apêndice A. O cálculo das variáveis é realizado conforme Equação (10) e (11).

$$S_i = \sum_{j=1}^m \left[ \frac{w_j \times (f_j^* - x_{ij})}{(f_j^* - f_j^-)} \right] \quad (10)$$

sendo que:

$$R_i = \max \left[ \frac{w_j \times (f_j^* - x_{ij})}{(f_j^* - f_j^-)} \right] \quad (11)$$

Obtemos deste modo, os dados abaixo.

SAE/ AISI	Custo (R\$)	Lim. resistên cia ( $\sigma$ máx) Mpa	Lim. de escoam. ( $\sigma$ esc.) Mpa	Resistê ncia a corrosã o	Ductili dade, %AL (Alonga mento 50mm)	Dureza Rockwe ll B (HRB)	Si	Ri
304	0,0000	0,0000	0,1177	0,1282	0,0000	0,1472	0,3931	0,1472
304 L	0,0421	0,0663	0,0404	0,0766	0,0120	0,0981	0,3355	0,0981
316	0,1053	0,2768	0,0000	0,0485	0,0120	0,0981	0,5407	0,2768
316 L	0,1426	0,2768	0,0000	0,0000	0,0120	0,0981	0,5295	0,2768
321	0,0527	0,2222	0,2096	0,0766	0,0956	0,0736	0,7303	0,2222
347	0,0948	0,1715	0,2059	0,0766	0,0359	0,0000	0,5847	0,2059

Por fim, calculam-se os valores de  $Q_i$  conforme Equação (12), em que  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ .

$$Q_i = \frac{v_j \times (S_i - S^*)}{(S^- - S^*)} + \frac{(1 - v_j) \times (R_i - R^*)}{(R^- - R^*)} \quad (12)$$

em que  $Q_i$  é o valor do índice de determinado candidato, e o peso  $v_j = 0,5$  para atingir o objetivo de consenso entre os critérios. Já as variáveis  $S^*, R^*, S^-, R^-$  são obtidas conforme abaixo.

Candidatos - SAE/AISI	Si	Ri
304	0,3931	0,1472
304 L	0,3355	0,0981
316	0,5407	0,2768
316 L	0,5295	0,2768
321	0,7303	0,2222
347	0,5847	0,2059
$S^*, R^*$ (MIN)	0,3355	0,0981
$S^-, R^-$ (MAX)	0,7303	0,2768

Candidatos - SAE/AISI	Si	Ri	Qi	Rank conforme Qi (ordem crescente)
304	0,3931	0,1472	0,2102	2
304 L	0,3355	0,0981	0,0000	1
316	0,5407	0,2768	0,7598	5
316 L	0,5295	0,2768	0,7457	4
321	0,7303	0,2222	0,8473	6
347	0,5847	0,2059	0,6173	3

Com o cálculo de  $Q_i$  para cada candidato procede-se com a ordenação em ordem crescente, sendo a melhor opção a alternativa com o menor valor de  $Q_i$ . O ranking gerado acima é válido, se atender as condições 1 e 2:

**Condição 1:**  $Q(1)$  deve possuir vantagem aceitável sobre as demais, quando comparada com  $Q(2)$  (alternativa imediatamente posterior no *ranking*), conforme equação (17).

$$Q(2) - Q(1) \geq DQ \quad (17)$$

$$0,2102 - 0 \geq 0,2$$

$$DQ = \frac{1}{(n - 1)} \quad (18)$$

$$DQ = \frac{1}{(6 - 1)} = 0,2$$

em que  $n$  corresponde ao número de alternativas, sendo  $n = 6$ .

**Condição 2:**  $Q(1)$  tem estabilidade aceitável na tomada de decisão, se além de melhor valor em  $Q$ , também for melhor em  $S$  e/ou  $R$ , sendo o melhor classificado os menores valores das variáveis, conforme abaixo.

<b>Si</b>	<b>Ri</b>
0,3355	0,0981

Deste modo, ambas as condições são válidas e o *ranking* gerado pode ser utilizado, conforme abaixo.

<b>Material</b>	<b>VIKOR</b>
304	2
304 L	1
316	5
316 L	4
321	6
347	3

## APÊNDICE D – Método MOORA

O primeiro passo consiste na normalização dos dados contidos na matriz de decisão X, obtendo-se deste modo a matriz de dados normalizada  $X'_{ij}$ , conforme Equação (2), em que  $X'_{ij} = r_{ij}$ .

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (2)$$

Com a aplicação dos pesos ( $w_j$ ) associados a cada critérios,  $w_j \times X'_{ij}$ , obtemos a matriz abaixo. Cabe salientar que os valores  $w_j$  são obtidos metodologia IEM, conforme Apêndice A.

<b>Candidatos - SAE/AISI</b>	<b>Custo - (Custo por unidade)</b>	<b>Limite de resistência (<math>\sigma</math> máx) Mpa</b>	<b>Limite de escoamento (<math>\sigma</math> escoamento) Mpa</b>	<b>Resistência a corrosão - Frente ao serviço</b>	<b>Ductilidade, %AL (Alongamento 50mm)</b>	<b>Dureza Rockwell B (HRB)</b>
304	0,0427	0,1205	0,0812	0,0323	0,0407	0,0583
304 L	0,0512	0,1175	0,0928	0,0482	0,0400	0,0597
316	0,0640	0,1081	0,0988	0,0569	0,0400	0,0597
316 L	0,0716	0,1081	0,0988	0,0719	0,0400	0,0597
321	0,0533	0,1105	0,0675	0,0482	0,0347	0,0604
347	0,0619	0,1128	0,0681	0,0482	0,0385	0,0626

Por fim, calcula-se a pontuação de desempenho ( $Y_i$ ) de cada alternativa, em que os critérios benéficos são adicionados enquanto os não benéficos são subtraídos para cada alternativa existente, conforme Equação (19). Cabe salientar que o único critério não benéfico é o custo, em que o objetivo é que seja minimizado.

$$Y_i = \sum_{j=1}^g w_j \times X'_{ij} - \sum_{j=g+1}^n w_j \times X'_{ij} \quad (19)$$

Deste modo, são obtidos os valores de  $Y_i$  abaixo.

<b>Candidatos - SAE/AISI</b>	<b>Yi</b>	<b>Ordem Decrescente</b>
304	0,2904	4
304 L	0,3070	1
316	0,2995	3
316 L	0,3069	2
321	0,2681	6
347	0,2683	5

O *ranking* de alternativas é elaborado de forma decrescente, em que o maior valor de  $Y_i$  corresponde à melhor alternativa, obtendo deste modo, o *ranking* abaixo.

<b>Material</b>	<b>MOORA</b>
304	4
304 L	1
316	3
316 L	2
321	6
347	5