

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ESTRATÉGIAS DE SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA  
VISEIRAS DE GOLEIRO DE HÓQUEI**

**DIANDRA BERNARDO**

**SÃO CARLOS - SP**

**2024**

# **ESTRATÉGIAS DE SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA VISEIRAS DE GOLEIRO DE HÓQUEI**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Juliano Marini

São Carlos-SP

2024



## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

**NOME:** Diandra Bernardo

**RA:** 758996

**TÍTULO:** Estratégias de seleção de materiais para viseiras de goleiro de hóquei

**ORIENTADOR(A):** Prof. Dr. Juliano Marini

**CO-ORIENTADOR(A):**


**DATA/HORÁRIO:** 02/02/2024, 11h

### BANCA – NOTAS:


	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Juliano Marini	10,0	10,0
Prof. Dr. Lucas Henrique Staffa	10,0	10,0
<b>Média</b>	10,0	10,0

### BANCA – ASSINATURAS:

Prof. Dr. Juliano Marini

Documento assinado digitalmente  
 JULIANO MARINI  
Data: 02/02/2024 11:44:40-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Lucas Henrique Staffa

Documento assinado digitalmente  
 LUCAS HENRIQUE STAFFA  
Data: 03/02/2024 17:15:43-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

## **DEDICATÓRIA**

À minha família, Vilma Salles, Luis Henrique e André Bernardo.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família pelo apoio e especialmente à minha mãe que não poupou esforços e sacrifícios durante a minha trajetória.

Aos meus queridos amigos pelo carinho e parceria durante todos estes anos de graduação.

Ao professor Juliano Marini, que me apresentou o tema em uma matéria da graduação da melhor forma possível, além do apoio em reuniões, com paciência, motivação e atenção.

E também agradeço a todos os atletas participantes da pesquisa que ajudaram a elucidar as dificuldades referentes ao uso do equipamento e assim possibilitar este trabalho.

## RESUMO

Viseira para capacete de goleiro é um tema relevante aos praticantes de hóquei, uma vez que o acesso é dificultado pela escassez de oferta em território nacional, o que acarreta um custo elevado aos praticantes. Por conta dos grandes esforços mecânicos sofridos em situação de jogo, bem como choques com a bola de jogo e *sticks*, o material ideal deve apresentar excelente resistência ao impacto e rigidez à flexão, garantindo durabilidade para a viseira e segurança ao usuário, além de possuir dureza elevada, sendo este último responsável por minimizar riscos superficiais que diminuem a visibilidade e conseqüentemente a utilidade do produto. Aliado ao desempenho mecânico otimizado, restrições de transparência e de processabilidade precisam ser consideradas. Portanto, a análise de seleção de materiais visando uma redução de custo deve levar em consideração múltiplas restrições, o que torna imprescindível o uso de teorias de tomada de decisão. Assim, utilizando as metodologias de TOPSIS e COPRAS, aliadas às metodologias de ponderação de Saaty que leva em consideração as preferências dos usuários das viseiras para goleiro, e ponderação por entropia, método matemático que de forma objetiva indica os fatores de ponderação para cada critério de acordo com a diversificação de valores dentro de um grupo de propriedades, a seleção foi realizada, classificando os potenciais candidatos. Este trabalho buscou indicar materiais poliméricos que possuem a melhor síntese das características esperadas de acordo com cada método de seleção. Como resultado, concluiu-se que a escolha do método de seleção não impactou o resultado tanto quanto o método de ponderação. O PCTA foi escolhido como melhor material candidato dentre os analisados.

**Palavras-chave:** Viseiras de goleiro. Seleção de materiais. TOPSIS. COPRAS. Saaty. Entropia.

## ABSTRACT

Visors for goalkeeper helmets are a relevant topic for hockey players, since access is made difficult by the lack of supply in the national territory, which results in a high cost for players. Due to the great mechanical stress suffered in a game situation, as well as shocks with the game ball and sticks, the ideal material must present excellent impact resistance and flexural rigidity, ensuring durability for the visor and safety for the user, in addition to have high hardness, being responsible for minimizing surface scratches that reduce the visibility and consequently the usefulness of the product. In addition to optimized mechanical performance, transparency and processability constraints need to be considered. Therefore, the material selection analysis aiming at cost reduction must consider multiple constraints, making it essential to use decision-making theories. Thus, using the TOPSIS and COPRAS methodologies, combined with the Saaty weighting methodologies that takes into consideration the preferences of goalkeeper visor users, and entropy weighting, a mathematical method that objectively indicates the weighting factors for each criterion according to the diversification of values within a group of properties, selection was carried out by ranking the potential candidates. This work aimed to indicate polymeric materials that have the best synthesis of expected characteristics according to each selection method. As a result, it was concluded that the choice of selection method did not impact the result as much as the weighting method. PCTA was chosen as the best material candidate among those analyzed.

Keyword: Visors for goalkeepers. Materials selection. TOPSIS. COPRAS. Saaty. Entropy.





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de capacete para goleiros, modelo Bauer IMS 5.0.....	4
Figura 2 – Fluxo de atividades para selecionar materiais pelo método Ashby.....	6
Figura 3 – Mapa de propriedades para triagem. ....	16
Figura 4 – Segunda etapa de triagem de materiais candidatos. ....	17
Figura 5 – Mapa de propriedades (tenacidade e preço/volume) para os materiais candidatos.....	18
Figura 6 – Gráfico indicando quanto os usuários do capacete de goleiro de hóquei costumam pagar pelo produto.....	20
Figura 7 – Preferência dos usuários desconsiderando preço e disponibilidade.....	21

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tradução e detalhamento dos requisitos para as viseiras de goleiro de hóquei. ....	7
Tabela 2 – Escala de Saaty. ....	9
Tabela 3 – Comparação em pares dos critérios. ....	10
Tabela 4 – Tabela de atributos. ....	11
Tabela 5 – Tabela normalizada de atributos. ....	12
Tabela 6 – Tabela de valores normalizados e ponderados. ....	12
Tabela 7 – Preferência por um modelo de viseira de acordo com o tempo de prática no esporte. ....	19
Tabela 8 – Atribuição de peso para as características que os atletas buscam em uma viseira. Disp = disponibilidade, Risc. = facilidade de riscar, Dur. = durabilidade, Lev. = leveza, Man. = manutenção, Conf. = conforto, Vis. = visibilidade. ....	21
Tabela 9 – Matriz de propriedades. K1c é a tenacidade à fratura, E é o módulo de flexão, D é a dureza Vickers e Cv o custo por unidade de volume. ....	23
Tabela 10 – Matriz de propriedades normalizadas. ....	24
Tabela 11 – Definição da ponderação pelo cálculo de entropia. ....	25
Tabela 12 – Aplicação da escala de Saaty. ....	26
Tabela 13 – Tabela de Saaty normalizada. ....	27
Tabela 14 Tabela 14 – Vetores de prioridade para cada atributo. ....	27
Tabela 15 – Matriz normalizada e ponderada pelo método TOPSIS/Entropia. ....	28
Tabela 16 – Valores ideais e não-ideais para os requisitos para o método TOPSIS/Entropia. ....	29
Tabela 17 – Medidas de separação para o método TOPSIS/Entropia. ....	29
Tabela 18 – Classificação dos materiais candidatos de acordo com o método TOPSIS/Entropia. ....	30
Tabela 19 – Matriz normalizada e ponderada para o método TOPSIS/Saaty. ....	31
Tabela 20 – Cálculo das medidas de separação. ....	32
Tabela 21 – Classificação dos materiais candidatos pelo método TOPSIS/Saaty. ....	33
Tabela 22 – Soma benéfica e não-benéfica para o método COPRAS/Entropia. ....	34
Tabela 23 – Significância relativa e utilidade relativa para o método COPRAS/Entropia. ....	35
Tabela 24 – Classificação dos materiais candidatos pelo método COPRAS/Entropia. ....	36
Tabela 25 – Medidas de separação para o método COPRAS/Saaty. ....	37
Tabela 26 – Significância relativa e utilidade relativa para o método COPRAS/Saaty. ....	38
Tabela 27 – Classificação dos materiais candidatos pelo método COPRAS/Saaty. ....	38
Tabela 28 – Materiais classificados nas três primeiras posições de cada metodologia. ....	39
Tabela 29 – Materiais classificados nas últimas três posições de cada metodologia. ....	41

## LISTA DE SIGLAS

PMMA - Poli(metil metacrilato)

PC - Policarbonato

PA410 - Poliamida 4,10

SAN - Copolímero Estireno-Acrilonitrila

PA - Poliamida

SMA - Copolímero de estireno-anidrido maleico

MABS - Blenda de metil metacrilato acrilonitrila butadieno estireno

PETG - Polietileno tereftalato glicol

PCTA - Policiclohexanedimetanol tereftalático

PSU - Polisulfona

COC - Copolímero de olefina cíclica

PEI - Polieterimida

PPC - Poliéstercarbonato

PLA - Políácido láctico

TPU(r) - Poliuretano

Tg - Transição vítrea

COPRAS - Complex Proportional Assessment - Avaliação Proporcional Complexa

TOPSIS - Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution - Técnica para Ordenar de Preferência Por Similaridade Com a Solução Ideal

N/A – Não aplicável

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\forall$	Para todo
$\Sigma$	Somatório

# Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.1.1 OBJETIVO GERAL.....	2
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>4</b>
2.1 FUNCIONAMENTO E OBTENÇÃO DO PRODUTO .....	4
2.2 METODOLOGIA DE ASHBY PARA A SELEÇÃO DE MATERIAIS.....	5
2.3 METODOLOGIAS DE PONDERAÇÃO .....	7
2.3.1 MÉTODO DA ENTROPIA.....	8
2.3.2 MÉTODO DE SAATY .....	9
2.4 METODOLOGIAS DE TOMADA DE DECISÃO .....	11
2.4.1 TOPSIS.....	11
2.4.2 MÉTODO COPRAS.....	13
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>14</b>
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>15</b>
4.1 SELEÇÃO PELO MÉTODO DE ASHBY (TRIAGEM).....	15
4.2 PESQUISA DE PREFERÊNCIA.....	18
4.2.1 ATRIBUIÇÃO DE PESO.....	21
4.3 DEFINIÇÃO DOS FATORES DE PONDERAÇÃO .....	23
4.3.1 ENTROPIA .....	23
4.3.2 SAATY.....	26
4.4 METODOLOGIAS DE TOMADA DE DECISÃO .....	27
4.4.1 SELEÇÃO PELO MÉTODO TOPSIS UTILIZANDO A PONDERAÇÃO PELO MÉTODO DA ENTROPIA.....	27
4.4.2 SELEÇÃO PELO MÉTODO TOPSIS UTILIZANDO A PONDERAÇÃO PELO MÉTODO DE SAATY .....	31
4.4.3 SELEÇÃO PELO MÉTODO COPRAS UTILIZANDO A PONDERAÇÃO PELO MÉTODO DA ENTROPIA.....	34
4.4.4 SELEÇÃO PELO MÉTODO COPRAS UTILIZANDO A PONDERAÇÃO PELO MÉTODO DE SAATY .....	37
<b>5 DISCUSSÃO</b> .....	<b>39</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>43</b>
<b>7 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>44</b>
<b>APÊNDICE A – Tabelas de cálculo</b> .....	<b>46</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O uso de equipamentos de segurança é essencial para o desempenho de atividades que apresentam riscos à saúde e à integridade física, tais como trabalho e prática de esportes, como é o hóquei sobre patins.

O hóquei sobre patins é um esporte de quadra, principalmente praticado em países europeus como Portugal, Espanha e Alemanha, mas também é popular na América do Sul, tendo seus principais campeonatos disputados na Argentina e no Brasil.

Este esporte conta com 5 jogadores em cada time, sendo um o goleiro. Todos os praticantes utilizam patins e *stick*, instrumento de jogo utilizado para manipular uma pequena e densa bola de borracha, onde o objetivo principal é fazer gols na equipe adversária. Por conta dos riscos físicos como choques com outros jogadores e patins, boladas e até mesmo golpes acidentais com o *stick*, o goleiro utiliza proteções a mais nas mãos, pernas, coxas, ombros, braços e pescoço, além do capacete. Sendo assim, para o esporte hóquei sobre patins, o uso do capacete é obrigatório para goleiros, uma vez que a bola do jogo atinge altas velocidades e pode facilmente causar graves fraturas ao praticante a frente do gol, sendo necessário uma alta proteção em partes sensíveis como cabeça e rosto. Então além do capacete, uma viseira é acoplada para proteger o rosto e ao mesmo tempo possibilitar a visão, podendo ser feita de grades de metal ou uma peça única fabricada em polímero transparente.

Além do fator segurança, os equipamentos devem apresentar conforto ao usuário, serem duráveis, apresentarem requisitos mínimos para a sua utilização, tais como resistência mecânica, visibilidade e durabilidade contra riscos e quebra, e terem custos compatíveis com o nível de performance. Entretanto, um fator crítico para a prática desse esporte é o custo dos equipamentos, seja em ligas amadoras ou profissionais.

Pelo alto custo do produto, que engloba o valor da matéria-prima e processo de fabricação, no Brasil o acesso aos equipamentos é dificultado, sendo geralmente obtido através da importação da Argentina ou Europa, onde o custo é mais elevado por conta da valorização da moeda.

É possível encontrar modelos que geralmente são trazidos do exterior e revendidos no país pelos próprios atletas, sendo encontrados a partir de R\$700, enquanto para a compra direta em lojas especializadas, é possível encontrar em

valores a partir de €80 [1] para produtos mais básicos, o que é um valor elevado para os padrões brasileiros de consumo, considerando que é apenas a parte de um dos equipamentos essenciais. Assim, a prática do esporte enfrenta barreiras econômicas e oferece riscos, visto que os equipamentos são utilizados por mais tempo, mesmo em condições distantes da ideal, podendo falhar durante o uso e causar graves acidentes.

Portanto, o uso de cada tipo de viseira (de grades ou polimérica) pode ser influenciado pela durabilidade em relação ao custo, uma vez que as poliméricas podem apresentar defeitos como riscos, diminuindo a visão, e rompimento, impossibilitando o seu uso.

Com base nos problemas expostos, há uma necessidade de diminuir custos de viseiras poliméricas utilizadas nos capacetes de goleiros sem que a qualidade seja significativamente prejudicada. Sendo assim, a seleção de materiais, balanceando e ponderando os requisitos é necessária para um melhor desenvolvimento do esporte, através da acessibilidade ao mesmo.

Estimando-se aproximadamente 80000 materiais diferentes [2], a missão de escolher os melhores candidatos dentre esta enorme gama requer uma análise minuciosa e a utilização de métodos de seleção de materiais para chegar a um denominador comum que atenda às necessidades específicas dos praticantes deste esporte.

Assim, neste trabalho será realizada uma pesquisa de preferência pessoal de tipo de viseira, bem como a importância de cada requisito na escolha do equipamento, a fim de aplicar a importância destes parâmetros em diferentes metodologias de seleção de materiais, atendendo as necessidades do usuário.

## **1.1 OBJETIVOS**

A fim de analisar possíveis soluções para o problema de seleção de materiais para a fabricação de viseiras poliméricas, os objetivos a seguir são propostos:

### **1.1.1 OBJETIVO GERAL**



Utilizar diferentes metodologias para a seleção de materiais candidatos para a produção de viseiras poliméricas para equipamento de proteção de goleiros de hóquei sobre patins, comparando como a metodologia aplicada e a ponderação relativa de importância entre os requisitos influenciam nessa escolha.

### **1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Entender as exigências para utilização através de pesquisa com os usuários;
- ✓ Elencar materiais candidatos;
- ✓ Analisar as propriedades necessárias para o desempenho e fabricação do produto;
- ✓ Identificar qual ou quais materiais atendem melhor às exigências, utilizando dois métodos e duas ponderações para cada método.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão apresentados os requisitos de segurança esperados para o produto em análise, a viseira polimérica para aplicação em capacetes de goleiros de hóquei, além do seu funcionamento.

Também será apresentado o método de fabricação empregado e por fim como será realizada a seleção dos materiais candidatos.

### 2.1 FUNCIONAMENTO E OBTENÇÃO DO PRODUTO

As viseiras são essenciais para a proteção individual dos praticantes deste esporte, zelando pela integridade física do rosto, orelhas e crânio do usuário.

Sendo assim, são acopladas a um capacete reforçado, cobrindo toda a parte frontal e lateral do rosto, indo do queixo até a testa, assim como na Figura 1.

Figura 1 - Exemplo de capacete para goleiros, modelo Bauer IMS 5.0.



Fonte: Casa dos patins, 2024<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Disponível em: <<https://www.casadospatins.pt/produtos/1372/capacete-bauer-ims-50-com-viseira-hybrid-policarbonato-e-aco>>. Acesso em: 5 jan. de 2024.

Além da proteção mecânica, é necessário que a superfície transparente seja resistente a riscos, visto que choques (com bola, *stick*, outros equipamentos) são comuns e os riscos afetam a visibilidade, fator importante para um bom desempenho. Nesta mesma linha, por conta da respiração e suor do usuário que criam vapores dentro do capacete, características antiembaçantes são obrigatórias também, novamente para garantir a visibilidade durante o jogo.

O material padrão para a fabricação desse equipamento, comumente chamado de viseira acrílica, é o poli(metil metacrilato) (PMMA) [1], portanto, será o material padrão para comparação durante a seleção dos materiais candidatos.

## **2.2 METODOLOGIA DE ASHBY PARA A SELEÇÃO DE MATERIAIS**

Os materiais são divididos entre poliméricos, metálicos, cerâmicos, compósitos e naturais. Para o uso em viseira, são utilizados essencialmente os poliméricos e os metálicos, sendo aplicados em diferentes formas a fim de garantir os requisitos de funcionamento.

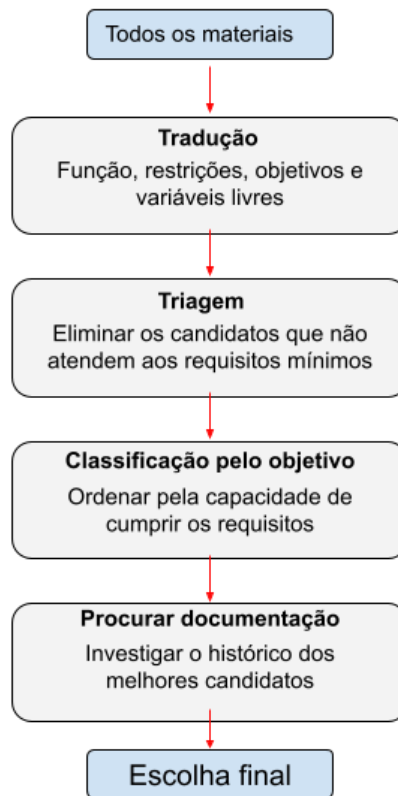
Neste trabalho o escopo de estudo é a família dos materiais poliméricos, essencialmente transparentes, para esta aplicação.

É necessário então um material polimérico que possua alta resistência ao impacto, rigidez à flexão, baixa densidade, alta processabilidade por injeção, ser antiembaçante, possuir dureza superficial alta e ser altamente transparente e não ter perda das propriedades ópticas por conta de microfaturas resultantes de tensionamento no sistema de fixação. Então, deve-se selecionar os materiais que possuam todas essas características, aliadas ao menor custo.

O método de seleção de materiais desenvolvido por Michael F. Ashby funciona como uma estratégia que conecta as funções exigidas, os materiais e seus atributos. Combinados com a forma e o processo, é possível elencar e ranquear os melhores candidatos para uma dada aplicação.

Na Figura 2 a seguir está exemplificado o procedimento para seleção de materiais, desde a tradução dos requisitos em propriedades, a triagem dos materiais, a classificação de acordo com seus atributos até a finalização do processo [3].

Figura 2 - Fluxo de atividades para selecionar materiais pelo método Ashby.



Fonte: Adaptado de Ashby, M. F, 2012.

Para este trabalho, o método de Ashby será aplicado com modificações, sendo empregado diretamente para a tradução dos requisitos e a triagem de materiais; para o processo de classificação, diferentes metodologias de tomada de decisão (TOPSIS, COPRAS) serão aplicadas, visando-se uma análise mais abrangente do problema.

Como destacado anteriormente, há uma preferência por produtos com altas propriedades mecânicas.

Resistência ao impacto é a propriedade principal uma vez que o equipamento está sujeito a choques e pancadas ao decorrer do jogo. Também em decorrência destas solicitações, a resistência ao risco é importante e pode ser traduzida como dureza superficial.

Para garantir a estabilidade e segurança do atleta, os choques não podem provocar mudanças na geometria de forma que a bola atinja o rosto. Sendo assim, o material deve apresentar alta rigidez em flexão.

Portanto, a tradução dos requisitos citados anteriormente para que os capacetes cumpram a sua função, se dá pelas seguintes propriedades descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Tradução e detalhamento dos requisitos para as viseiras de goleiro de hóquei.

<b>Tradução</b>	<b>Detalhamento</b>
Função	Proteger mecanicamente o usuário de impactos
Restrições	Tenacidade a fratura mínima de 1,81 MPa.m <sup>1/2</sup> Módulo em flexão (rigidez) Transparência Processabilidade por moldagem por injeção Dureza mínima de 14,1 HV Material polimérico
Objetivo	Minimizar custo e maximizar o desempenho mecânico em relação à resistência ao impacto, módulo em flexão e dureza
Variável livre	Material

Como a resistência ao impacto não é uma propriedade absoluta e analisando os dados disponíveis para consulta através do software GRANTA EduPack, optou-se por utilizar a tenacidade à fratura ( $K_{1c}$ ) como propriedade de comparação para analisar este quesito. De forma semelhante, a resistência ao risco também será quantificada através da dureza Vickers, que mostra a capacidade de resistir à deformação plástica quando recebe um esforço pontual.

O poli(metil metacrilato) (PMMA) será o material padrão para comparação e triagem dos materiais em relação à resistência ao impacto.

### **2.3 METODOLOGIAS DE PONDERAÇÃO**

Em problemas de seleção de materiais mais complexos, considerando-se múltiplas restrições e objetivos, faz-se necessário realizar uma ponderação relativa entre os valores de propriedades e/ou índices de mérito, ou seja, adiciona-se pesos aos atributos analisados, de forma que seja possível indicar sua importância relativa durante a aplicação dos materiais.

Como os métodos de seleção escolhidos não possuem ponderação própria, é necessário, de forma paralela, atribuir as ponderações para as características analisadas.

Sendo assim, dois métodos distintos para obter a ponderação das propriedades serão utilizados: o método da entropia e o método utilizando a escala de Saaty.

### 2.3.1 MÉTODO DA ENTROPIA

O conceito de entropia, desenvolvido por Gibbs, foi utilizado para avaliar sistemas termodinâmicos de acordo com a sua espontaneidade. Para Shannon e Weaver, a entropia é definida pela incerteza associada a eventos aleatórios.

Desta forma, a entropia de uma variável se define pela sua distribuição de probabilidade, sendo assim uma medida de incerteza [4].

Quando utilizamos métodos de seleção multicritérios, a distribuição de probabilidades de variáveis aleatórias é semelhante à distribuição de pesos para cada critério, sendo assim podendo ser utilizado para atribuir a ponderação de critérios quando a preferência entre os mesmos não foi definida anteriormente.

Para medir a entropia associada a uma matriz de decisão, o primeiro passo é normalizar a matriz de decisão, onde cada critério tem um valor associado a uma variável. No caso da seleção de materiais, cada critério (atributo) terá um valor para cada material, que serão normalizados pela soma de todos os valores de cada critério. Definindo cada valor normalizado descrito como  $p_{ij}$ , a entropia  $E_j$  para o sistema de atributos e materiais é definido pela equação 1:

$$E_j = -K \sum_{i=1}^n p_i \log(p_i), \forall j \quad (1)$$

Onde  $n$  é a quantidade de probabilidades, ou seja, materiais possíveis, e  $K$  é a constante definida por  $1/\log(\pi)$  [5].

O grau de diversificação indica o quão diferentes as alternativas de seleção de um critério são, de forma que se um grupo de alternativas apresentar valor discriminatório semelhante, o seu grau de diversificação é menor e, portanto, o peso do critério associado àquelas alternativas também é menor. É possível definir o grau de diversificação  $d_j$  para cada atributo como:

$$d_j = 1 - E_j, \forall j \quad (2)$$

Por fim, o peso de cada critério é definido na equação 3 [4]:

$$W_j^0 = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j}, \forall j \quad (3)$$

Com o peso  $W_j$  de cada critério definido, o método da entropia oferece uma ponderação baseada na diversificação de probabilidades, sem que o critério subjetivo de preferência seja utilizado.

### 2.3.2 MÉTODO DE SAATY

Uma das maneiras para atribuir pesos em diversos atributos ao realizar uma análise de multicritérios é a utilização da Escala Fundamental de Saaty, que é absoluta e permite decidir quais critérios possuem maior importância, auxiliando posteriormente na aplicação das metodologias de seleção de materiais.

Assim, a escala de Saaty possui valores de 1 a 9 [6], tendo cada uma a sua devida importância, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Escala de Saaty.

<b>Intensidade</b>	<b>Definição</b>	<b>Explicação</b>
1	Igual importância	Ambos contribuem de forma similar para o objetivo
3	Pouco mais importante	Importância levemente mais importante
5	Mais importante	Há favorecimento de importância entre um e outro
7	Muito mais importante	Dominância de um sobre o outro é clara

9	Extremamente mais importante	A certeza de dominância é absoluta
2,4,6 e 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre os critérios

Fonte: Adaptado de SAATY.

Desta forma é possível construir um quadro para comparação em pares entre diversas propriedades, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação em pares dos critérios.

Critério	Critério 1	Critério 2	Critério 3
Critério 1	1	Comparação entre critérios 1 e 2	Comparação entre critérios 1 e 3
Critério 2	Comparação entre critérios 2 e 1	1	Comparação entre critérios 2 e 3
Critério 3	Comparação entre critérios 3 e 1	Comparação entre critérios 3 e 2	1

Fonte: Adaptado de SAATY.

Por este método, caso um critério domine o outro, o seu recíproco será o inverso. Por exemplo, caso o Critério 1 domine o Critério 2, tendo intensidade 5 de acordo com a escala de Saaty, tem-se a relação 5. Já na avaliação contrária, na comparação entre o Critérios 2 e 1, esse valor será 1/5.

Em seguida, é feita a normalização desta tabela com relação à soma de cada coluna.

Por fim, calcula-se o vetor prioridade, que representa o peso de cada critério em relação aos outros. Este vetor prioridade se dá pela soma de cada linha da tabela normalizada, dividindo o montante pela quantidade de critérios analisados, retornando o peso de cada critério [6].

Apesar de ser uma escala absoluta, a subjetividade ainda pode ser utilizada para comparar os critérios entre si. Assim, para uma comparação de forma objetiva e



sem viés, a pesquisa é uma fonte de dados para que a comparação seja feita com base na experiência dos usuários.

## 2.4 METODOLOGIAS DE TOMADA DE DECISÃO

Em problemas de seleção onde vários critérios ou requisitos devem ser simultaneamente considerados, a metodologia proposta por Ashby pode não ser suficiente para determinar a melhor escolha e alguns métodos de tomada de decisão podem ser aplicados como ferramentas para auxiliar a escolha. Neste projeto, serão utilizadas duas metodologias: TOPSIS e COPRAS.

### 2.4.1 TOPSIS

O TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) é uma técnica de avaliação de performances de alternativas através da similaridade dela com uma solução ideal. A melhor alternativa é aquela mais próxima da solução ideal e mais distante da solução não ideal, sendo a solução ideal aquela que maximiza os critérios de benefício e minimiza os critérios de custo.

Para isto, inicialmente é feita uma quantização dos requisitos, separando entre quantitativos e qualitativos.

Para se utilizar a metodologia TOPSIS, é necessário definir anteriormente fatores de ponderação relativos entre os critérios analisados. Neste trabalho, tanto o método proposto por Saaty quanto o método da entropia serão utilizados para que a seleção seja realizada de forma efetiva.

Após realizar a triagem de acordo com o método Ashby em relação aos atributos convenientes para o funcionamento do produto, ordena-se uma matriz de decisão inicial,  $x_{ij}$ , onde  $i$  é valor atribuído e  $j$  é a característica analisada. É possível ordená-los em uma tabela com esses dados, que em seguida serão normalizados pela somatória total de cada coluna, como na Tabela 4.

Tabela 4 – Tabela de atributos.

<b>Material</b>	<b>Atributo 1</b>	<b>Atributo 2</b>	<b>Atributo 3</b>
Material 1	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$

Material 2	$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$
Material 3	$x_{31}$	$x_{32}$	$x_{33}$
<b>Somatório</b>	<b><math>\Sigma x_{i1}</math></b>	<b><math>\Sigma x_{i2}</math></b>	<b><math>\Sigma x_{i3}</math></b>

É obtida então uma segunda tabela intitulada matriz normalizada R, sendo utilizada para comparação. Isso é demonstrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Tabela normalizada de atributos.

<b>Material</b>	<b>Atributo 1</b>	<b>Atributo 2</b>	<b>Atributo 3</b>
Material 1	$x_{11}/\Sigma x_{i1}$	$x_{12}/\Sigma x_{i2}$	$x_{13}/\Sigma x_{i3}$
Material 2	$x_{21}/\Sigma x_{i1}$	$x_{22}/\Sigma x_{i2}$	$x_{23}/\Sigma x_{i3}$
Material 3	$x_{31}/\Sigma x_{i1}$	$x_{32}/\Sigma x_{i2}$	$x_{33}/\Sigma x_{i3}$

Em seguida, com a ponderação de cada atributo ( $r_i$ ), obtém-se o produto entre o peso e o valor  $x_{ij}$  normalizado, sendo a tabela da matriz normalizada e ponderada D como demonstrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Tabela de valores normalizados e ponderados.

<b>Material</b>	<b>Atributo 1</b>	<b>Atributo 2</b>	<b>Atributo 3</b>
Material 1	$x_{11}/\Sigma x_{i1} \times r_1 = D_{11}$	$x_{12}/\Sigma x_{i2} \times r_2 = D_{12}$	$x_{13}/\Sigma x_{i3} \times r_3 = D_{13}$
Material 2	$x_{21}/\Sigma x_{i1} \times r_1 = D_{21}$	$x_{22}/\Sigma x_{i2} \times r_2 = D_{22}$	$x_{23}/\Sigma x_{i3} \times r_3 = D_{23}$
Material 3	$x_{31}/\Sigma x_{i1} \times r_1 = D_{31}$	$x_{32}/\Sigma x_{i2} \times r_2 = D_{32}$	$x_{33}/\Sigma x_{i3} \times r_3 = D_{33}$

O valor ideal ( $v_j^+$ ) é definido como o melhor valor possível para aquele requisito. Caso o objetivo seja maximizar certo atributo, o valor ideal será o maior dentre os candidatos. Caso o objetivo seja minimizar esse atributo, o valor ideal será o menor.

Por outro lado, o valor não-ideal ( $v_j^-$ ) indica o contrário, seja o menor valor quando se busca maximizar uma propriedade ou o maior valor quando o objetivo é minimizar.

Assim, da tabela ponderada e normalizada é possível obter estes valores ideais e não-ideais para cada atributo.

Em seguida deve-se obter as medidas de separação que indica a distância de cada solução em relação aos valores ideais ( $S_i^+$ ) e não ideais ( $S_i^-$ ). Esta medida é dada pela distância euclidiana de acordo com as equações 4 e 5.

$$S_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^N (V_{ij} - V_j^+)^2 \right\}^{1/2}, i = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

$$S_i^- = \left\{ \sum_{j=1}^N (V_{ij} - V_j^-)^2 \right\}^{1/2}, i = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

Por fim, a proximidade de cada solução em relação à solução ideal,  $C_i$ , é calculada através da equação 6:

$$C_i = \frac{S_i^-}{(S_i^+ + S_i^-)} \quad (6)$$

Assim, a classificação se dá por  $C_i$ , onde, por ordem decrescente, obtêm-se do melhor ao pior candidato pelo método TOPSIS [7].

#### 2.4.2 MÉTODO COPRAS

O método COPRAS (*Complex Proportional Assessment*) utiliza das dependências diretas e proporcionais de importância e grau de utilidade dos materiais candidatos, levando em consideração os critérios e o peso de cada critério na definição do material mais adequado. Sendo assim, é possível classificar as possibilidades entre o melhor candidato e o pior [2].

Similarmente ao método TOPSIS, deve-se obter a matriz ou tabela de propriedades normalizadas e ponderadas de acordo com a ponderação escolhida.

O próximo passo é encontrar os atributos que devem ser maximizados e minimizados, sendo as propriedades benéficas ( $S_{+i}$ ) e não-benéficas ( $S_{-i}$ ) para o

objetivo, respectivamente. Esses valores são obtidos de acordo com as equações 7 e 8, onde  $x_{ij}$  são os valores normalizados e ponderados obtidos anteriormente.

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^n x_{+ij} \quad (7)$$

$$S_{-i} = \sum_{j=1}^n x_{-ij} \quad (8)$$

O próximo passo é definir a significância relativa  $Q_i$ , dado pela relação entre  $S_{-min}$ , dado pelo menor valor de  $S_{-i}$ , utilizando a equação 9:

$$Q_i = S_{+i} + \frac{S_{-imin} \sum_{i=1}^m S_{-i}}{S_{-i} \sum_{i=1}^m \left(\frac{S_{-min}}{S_{-i}}\right)}, \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

Encontrando o maior valor de  $Q_i$ , dado por  $Q_{max}$ , encontramos a razão  $Q_i/Q_{max}$  em valores percentuais, que corresponde ao valor  $U_i$ , ou seja, a utilidade quantitativa de cada candidato.

Com isso, é possível classificar os candidatos com relação a sua utilidade, sendo o maior  $U_i$  como melhor candidato, e o menor  $U_i$  como pior candidato [2].

### 3 METODOLOGIA

A análise do problema proposto neste trabalho de conclusão foi efetuada utilizando-se a metodologia de Ashby para Seleção de Materiais, aplicando-se diferentes teorias de tomada de decisão (TOPSIS e COPRAS) e de ponderação relativa entre os atributos (Entropia e Escala Fundamental de Saaty).

O processo de triagem dos candidatos potenciais para aplicação em viseiras de capacetes para goleiros de hóquei sobre patins foi realizado utilizando-se o software GRANTA EduPack 2020.

Para a definição dos fatores de ponderação através da metodologia de Saaty, que depende de uma comparação relativa de importância entre os critérios analisados, realizou-se uma pesquisa de preferência/opinião com usuários do produto, visando-se evitar que a análise subjetiva levasse em consideração apenas o

juízo do discente. O formulário foi enviado a 16 usuários do produto, obtendo-se o retorno de 10 atletas.

## **4 RESULTADOS**

Nesta seção serão discutidas e aplicadas a metodologia de Ashby, seguida das técnicas de TOPSIS e COPRAS para a seleção de materiais, além dos métodos da entropia e a Escala Fundamental de Saaty para atribuição de pesos, juntamente com os resultados da pesquisa de preferência.

### **4.1 SELEÇÃO PELO MÉTODO DE ASHBY (TRIAGEM)**

Para a obtenção dos dados para análise pelo método de Ashby, o software GRANTA EduPack foi utilizado.

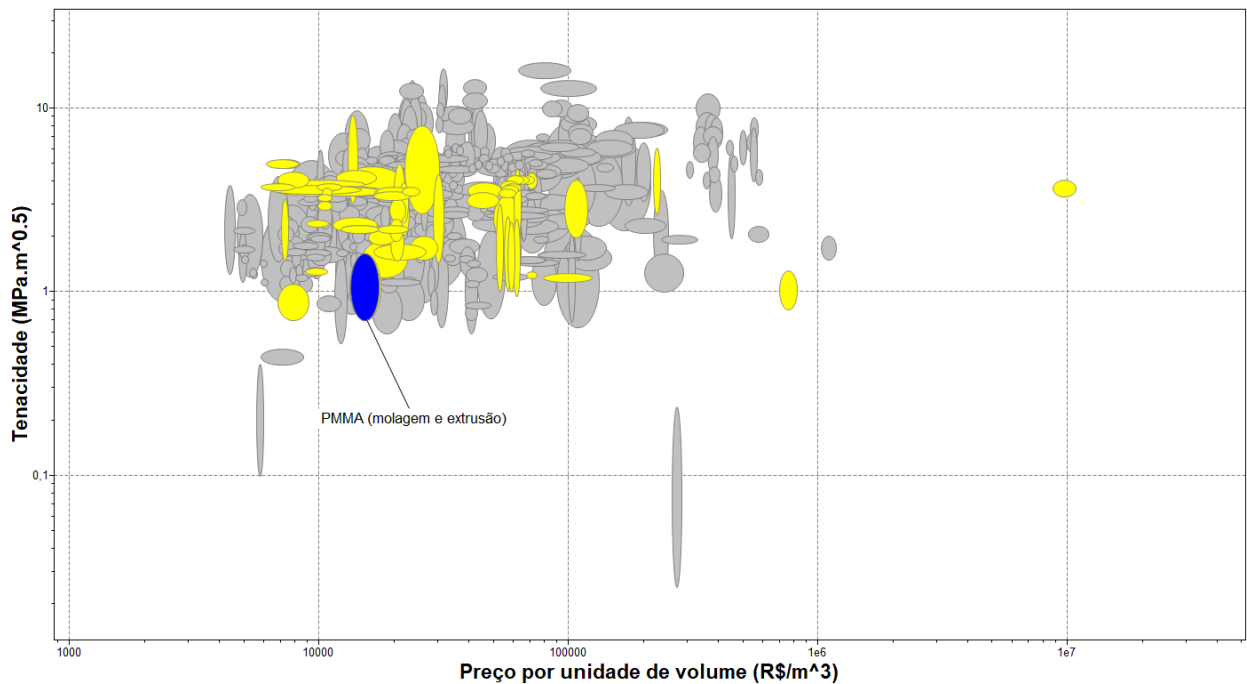
Sabendo que o PMMA é material padrão para a fabricação das viseiras, utilizou-se então de suas propriedades como requisitos mínimos de restrições absolutas.

A propriedade óptica exigida, transparência, não é quantitativa. Portanto, para definir qual o valor mínimo para ser considerado um candidato, apenas os materiais com alta transparência foram considerados. Assim como a transparência, a moldabilidade por injeção é uma característica qualitativa. Sendo assim, apenas os materiais com alta moldabilidade por injeção foram considerados candidatos. O PMMA modificado para impacto, que possui aditivos elastoméricos a fim de aumentar a resistência ao impacto, possui uma tenacidade à fratura mínima de  $1,81 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  e dureza de 14,1 HV [7], portanto, os materiais precisam ter pelo menos esses valores em suas propriedades para seguirem como potenciais candidatos.

Além disso, o material deve ser obrigatoriamente polimérico, transparente e processável por injeção.

Tendo à disposição uma base de dados com centenas de materiais no software, foi realizada uma triagem nesta base utilizando as restrições anteriormente citadas, obtendo um mapa de propriedades com os materiais no gráfico da Figura 3.

Figura 3 – Mapa de propriedades para triagem.

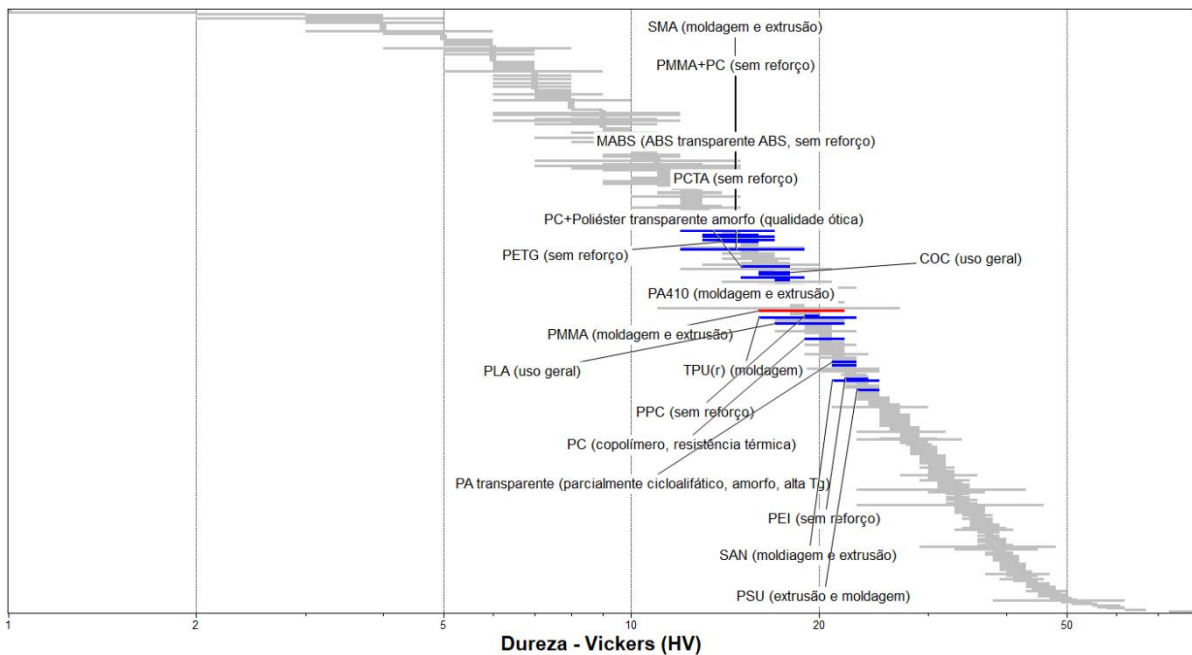


Fonte: GRANTA EduPack 2020.

É possível observar que, em relação ao PMMA destacado em azul, muitos materiais (destacados em amarelo) possuem uma tenacidade à fratura maior que a do próprio PMMA, da mesma forma que alguns materiais custam até 10 vezes mais.

Em seguida, os materiais foram triados em relação à dureza, devendo apresentar uma dureza de pelo menos 14,1 HV, que é a dureza média do PMMA [7], destacado em vermelho, que é o material padrão. Portanto, os materiais candidatos estão descritos no gráfico da Figura 4, destacados em azul pois atendem ao requisito mínimo de dureza.

Figura 4 – Segunda etapa de triagem de materiais candidatos.



Fonte: GRANTA EduPack 2020.

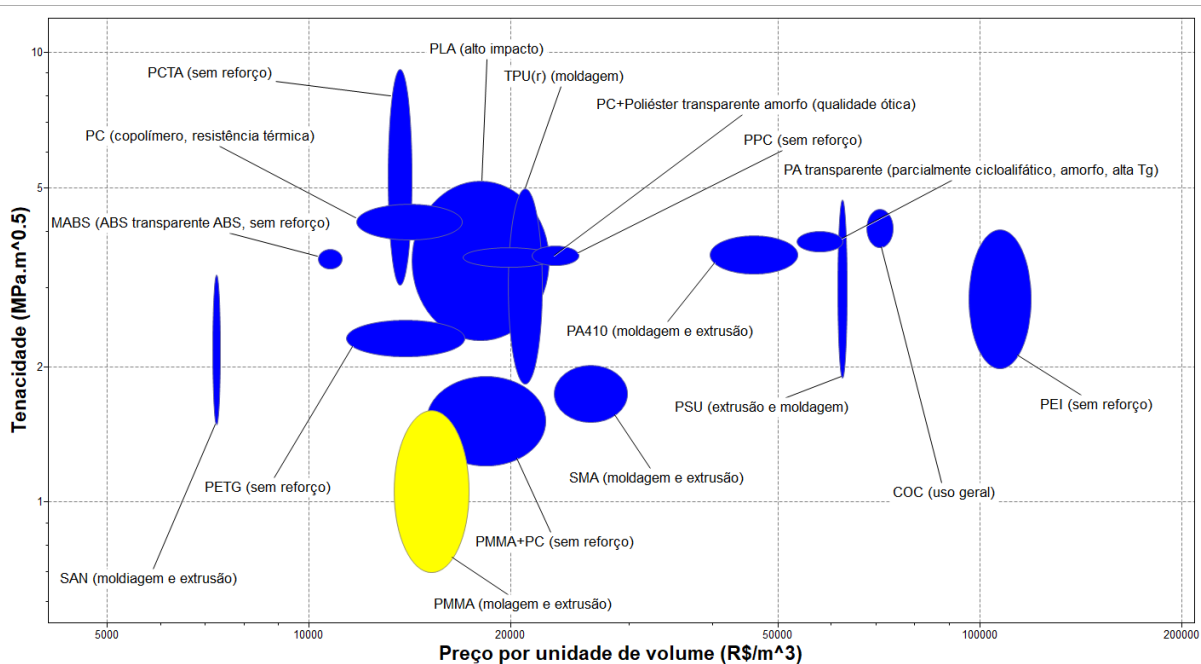
Portanto, após a triagem, os seguintes materiais serão analisados pelos métodos TOPSIS e COPRAS:

- PMMA + PC: Blenda de poli(metil metacrilato) com policarbonato;
- SMA (moldagem e extrusão): Copolímero de estireno-anidrido maleico;
- MABS (ABS transparente): Blenda de metil metacrilato acrilonitrila butadieno estireno;
- PMMA (modificado para impacto): Poli(metil metacrilato);
- PC + poliéster transparente e amorfo (qualidade ótica): Blenda de policarbonato com poliéster transparente e amorfo;
- PA410 (moldagem e extrusão): Poliamida 4,10;
- PLA (uso geral): Poliacido láctico;
- PPC (sem reforço): Poliéstercarbonato;
- TPU(r) (moldagem): Poliuretano termoplástico;
- PC (copolímero, resistência ao calor): Policarbonato;
- PA transparente (parcialmente cicloalifático, amorfo, alta Tg);
- PSU (extrusão e moldagem): Polisulfona;
- SAN (extrusão e moldagem): Copolímero estireno-acrilonitrila;

- PETG (sem reforço): Polietileno tereftalato glicol;
- PCTA (sem reforço): Policiclohexanedimetanol tereftilático;
- COC (uso geral): Copolímero de olefina cíclica;
- PEI (sem reforço): Polieterimida.

Estes materiais estão descritos no gráfico da Figura 5 em relação à tenacidade e o preço.

Figura 5 – Mapa de propriedades (tenacidade e preço/volume) para os materiais candidatos.



Fonte: GRANTA EduPack 2020.

## 4.2 PESQUISA DE PREFERÊNCIA

Foi realizada uma pesquisa anônima com usuários do produto, através do encaminhamento de formulário, com o intuito de embasar a comparação entre importância relativa de diferentes critérios analisados para a seleção, etapa necessária para a ponderação a ser definida através da metodologia de Saaty.

No formulário online para coleta de dados disponibilizado aos goleiros em atividade no Brasil, os seguintes questionamentos foram aplicados:

1. Idade;
2. Há quanto tempo atua na posição;



3. Qual o custo médio do equipamento, desconsiderando os valores de frete;
4. Qual modelo é utilizado para proteção, se a preferência é por viseira de grades metálicas ou de viseira polimérica;
5. Para quem utiliza a viseira polimérica, atribuição de notas de 1 (menos importante) a 7 (mais importante) para os seguintes itens: custo, conforto, visibilidade, facilidade de compra, durabilidade, leveza e manutenção;
6. Para quem utiliza a viseira de grades metálicas, atribuição de notas de 1 (menos importante) a 6 (mais importante) do porquê da não utilização de viseira polimérica: custo, disponibilidade para compra, facilidade de riscar o equipamento, baixa resistência que faz com que quebra mais facilmente, peso e manutenção;
7. Preferência de uso desconsiderando custo e disponibilidade para compra;

Os itens 1, 2 e 3 foram utilizados para traçar o perfil de consumo, os itens 4 e 5 para traçar a ordem de importância que os requisitos das viseiras possuem e o item 6 para verificar se as características atuais da viseira polimérica são suficientes para manter ou modificar o perfil de consumo dos usuários. Ao final, o item 7 pode indicar se os usuários consideram a mudança do tipo de equipamento de proteção.

Através das respostas obtidas pela aplicação do formulário de opinião, determinou-se o perfil apresentado na Tabela 7, correlacionando o tempo de prática no esporte e o tipo de viseira utilizada.

Tabela 7 – Preferência por um modelo de viseira de acordo com o tempo de prática no esporte.

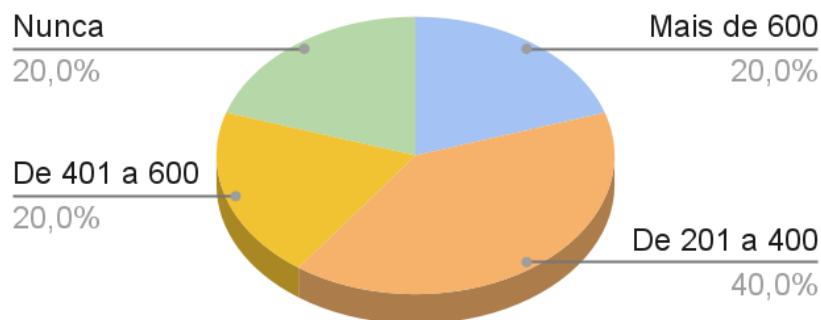
<b>Tempo de prática</b>	<b>Utiliza a viseira metálica</b>	<b>Utiliza a viseira polimérica</b>
Até 1 ano	20%	0%
De 2 a 5 anos	10%	0%
De 6 a 10 anos	10%	10%
De 11 a 20 anos	10%	0%
Mais de 20 anos	20%	20%

Pela Tabela 7 é possível observar que a grande maioria dos atletas, 70%, preferem o uso das viseiras metálicas. Assim, dentre os que utilizam a polimérica, a maioria, 20% do todo, praticam o esporte há mais tempo.

A Figura 6 contém o gráfico com os valores pagos pelos atletas em seus respectivos materiais, sendo possível observar que, excluindo os que não compraram seus equipamentos, a maioria paga entre 201 e 400 reais para a obtenção mesmo, sendo 40% dos participantes.

Figura 6 – Gráfico indicando quanto os usuários do capacete de goleiro de hóquei costumam pagar pelo produto.

### Valor pago pelo produto (R\$)



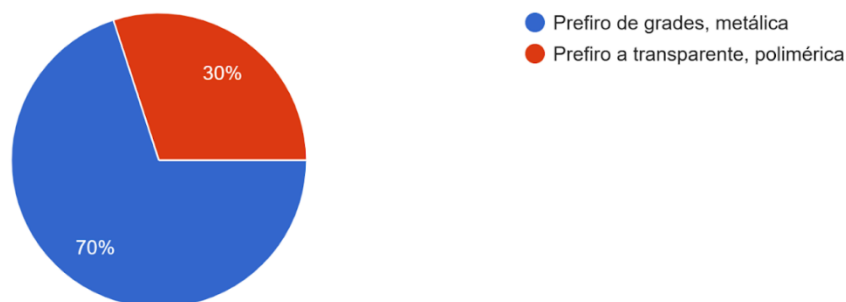
Sendo assim, é possível concluir que há uma grande gama de valores que foram pagos pelos atletas para se obter o produto, entretanto, todos eles são valores altos, considerando que a viseira é apenas uma das partes de um dos equipamentos, o que dificulta o acesso ao esporte.

Por fim, foi questionado aos usuários das viseiras com grades se desconsiderando o preço do produto a viseira polimérica era uma opção viável. Na Figura 7, no gráfico ilustrado está descrito a preferência dos usuários.

Figura 7 – Preferência dos usuários desconsiderando preço e disponibilidade.

Não considerando o preço e a disponibilidade do equipamento para compra, assinale a que você utilizaria:

10 respostas



Sendo assim, novamente 30% dos atletas possuem preferência pela polimérica. Isso indica que, além do preço ser mais atrativo, a viseira de grades não possui os problemas apresentados pelo outro tipo de viseira: riscos, durabilidade e segurança de que não vai quebrar.

#### 4.2.1 ATRIBUIÇÃO DE PESO

Além do perfil de consumo, também foi traçado a atribuição de peso entre as características anteriormente citadas que se relacionam com o desempenho do produto.

Na tabela a seguir, os valores atribuídos de peso acerca das considerações que os levam a não escolher a viseira polimérica estão descritos.

Com esses valores, uma média de peso foi realizada ao final, obtendo assim o peso de cada característica apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Atribuição de peso para as características que os atletas buscam em uma viseira. Disp = disponibilidade, Risc. = facilidade de riscar, Dur. = durabilidade, Lev. = leveza, Man. = manutenção, Conf. = conforto, Vis. = visibilidade.

	<b>Custo</b>	<b>Disp.</b>	<b>Risc.</b>	<b>Dur.</b>	<b>Lev.</b>	<b>Man.</b>	<b>Conf.</b>	<b>Vis.</b>
Atleta 1	3	4	5	6	1	2	N/A	N/A
Atleta 2	1	2	4	5	3	6	N/A	N/A

Atleta 3	5	3	N/A	7	2	1	4	6
Atleta 4	4	6	2	3	1	5	N/A	N/A
Atleta 5	3	1	6	5	4	2	N/A	N/A
Atleta 6	1	2	6	5	4	3	N/A	N/A
Atleta 7	1	2	N/A	6	4	3	7	5
Atleta 8	3	2	N/A	6	4	1	7	5
Atleta 9	1	2	6	5	3	4	N/A	N/A
Atleta 9	1	2	6	5	3	4	N/A	N/A
Atleta 10	2	3	5	6	1	4	N/A	N/A
<b>Média</b>	<b>2,50</b>	<b>2,90</b>	<b>4,00</b>	<b>5,90</b>	<b>3,00</b>	<b>3,50</b>	<b>1,80</b>	<b>1,60</b>

Para as considerações que não aplicáveis como facilidade de riscar para as viseiras metálicas e conforto e visibilidade para as viseiras poliméricas, atribui-se N/A (não aplicável) como valor. Sendo assim, não foram considerados no cálculo da média de cada característica.

Os atletas 3, 7 e 9 optam pela viseira polimérica, enquanto os demais optam pela viseira de grades metálicas e responderam de acordo com as características que são buscadas em um equipamento ideal.

É possível, então, perceber que, no geral, os atletas buscam o equipamento pela durabilidade, portanto, materiais com boas propriedades mecânicas são mais visados. Além disso, a susceptibilidade ao risco é o segundo maior desafio quanto a utilização das viseiras poliméricas.

Além disso, dentre os usuários da viseira polimérica, as maiores razões para a escolha se dão pelo conforto e a visibilidade, requisitos que não se aplicam perfeitamente às viseiras metálicas por questões de construção do equipamento.

Assim, a escolha de materiais com um alto grau de transparência se faz necessária, visto que a importância desta característica é alta.

### 4.3 DEFINIÇÃO DOS FATORES DE PONDERAÇÃO

Dentre as restrições elencadas na Tabela 1 (tradução do problema segundo a metodologia de Ashby), algumas propriedades foram utilizadas para a triagem dos potenciais candidatos, enquanto as restrições relacionadas com os objetivos (propriedades mecânicas e custo) serão utilizadas para otimizar a escolha dos melhores materiais candidatos. Como dito anteriormente, as metodologias de tomada de decisão escolhidas (TOPSIS e COPRAS) dependem da definição de fatores de ponderação de importância relativa entre os requisitos e na sequência são apresentados os cálculos desses fatores de acordo com os métodos de Entropia e Saaty.

#### 4.3.1 ENTROPIA

Como definido anteriormente, o método da entropia considera a diversificação de probabilidades em um grupo de critérios. Na Tabela 9 são apresentados os valores médios dos requisitos a serem otimizados (propriedades mecânicas e custo) dos materiais candidatos anteriormente triados. Os valores médios das propriedades foram obtidos utilizando-se o software GRANTA EduPack 2020.

Tabela 9 – Matriz de propriedades.  $K_{1c}$  é a tenacidade à fratura, E é o módulo de flexão, D é a dureza Vickers e  $C_v$  o custo por unidade de volume.

<b>Material</b>	<b><math>K_{1c}</math> (MPa.m<sup>1/2</sup>)</b>	<b>E (GPa)</b>	<b>D (HV)</b>	<b><math>C_v</math> (R\$/m<sup>3</sup>) (10<sup>4</sup>)</b>
PMMA + PC	1,52	2,3	14	1,83
PC + poliéster transparente e amorfo (qualidade óptica);	3,51	2,11	14,6	1,98
PA410 (moldagem e extrusão)	3,55	1,43	17,8	4,6
SAN (extrusão e moldagem)	2,18	3,8	22,9	0,72

PA transparente (parcialmente cicloalifático, amorfo, alta Tg)	3,81	2,29	22,4	5,77
SMA (moldagem e extrusão)	1,74	2,67	13,7	2,63
PC (copolímero, resistência ao calor)	4,2	2,3	19,4	1,41
PMMA	1,99	2,02	14,1	1,78
MABS (ABS transparente)	3,48	2,24	14,3	1,07
PSU (extrusão e moldagem)	2,98	2,54	24	6,24
PETG	2,32	2,06	15	1,39
PCTA	5,29	1,8	15,1	1,36
COC	4,07	3,1	17	7,08
PEI	2,83	3,3	23	10,7
PPC	3,53	2,17	19,5	2,33
PLA	4	3,34	19,3	1,64
TPU(r) (moldagem)	3,02	2,13	19,2	2,09
<b>SOMATÓRIO</b>	<b>54,02</b>	<b>41,6</b>	<b>305,3</b>	<b>54,62</b>

Na Tabela 10 é apresentada a matriz de propriedades normalizada.

Tabela 10 – Matriz de propriedades normalizadas.

<b>Material</b>	<b>K<sub>1c</sub></b>	<b>E</b>	<b>D</b>	<b>C<sub>v</sub></b>
PMMA + PC	0,028	0,055	0,046	0,034
PC + poliéster transparente e amorfo (qualidade óptica);	0,065	0,051	0,048	0,036
PA410 (moldagem e extrusão)	0,066	0,034	0,058	0,084
SAN (extrusão e moldagem)	0,040	0,091	0,075	0,013
PA transparente (parcialmente cicloalifático, amorfo, alta Tg)	0,071	0,055	0,073	0,106

SMA (moldagem e extrusão)	0,032	0,064	0,045	0,048
PC (copolímero, resistência ao calor)	0,078	0,055	0,064	0,026
PMMA	0,037	0,049	0,046	0,033
MABS (ABS transparente)	0,064	0,054	0,047	0,020
PSU (extrusão e moldagem)	0,055	0,061	0,079	0,114
PETG	0,043	0,050	0,049	0,025
PCTA	0,098	0,043	0,049	0,025
COC	0,075	0,075	0,056	0,130
PEI	0,052	0,079	0,075	0,196
PPC	0,065	0,052	0,064	0,043
PLA	0,074	0,080	0,063	0,030
TPU(r) (moldagem)	0,056	0,051	0,063	0,038

Calculou-se então a entropia  $E_j$ , onde  $k$  é dado por  $k = 1/\log(17) = 0,812711509$ , visto que há 17 probabilidades de escolha para cada critério. Na Tabela 11,  $E_j$  e  $W_j$  são calculados de acordo com as equações 1, 2 e 3, demonstradas anteriormente.

Tabela 11 – Definição da ponderação pelo cálculo de entropia.

	<b>K<sub>1c</sub></b>	<b>E</b>	<b>D</b>	<b>C<sub>v</sub></b>
$E_j$	0,98	0,99	0,99	0,90
$1-E_j$	0,02	0,01	0,01	0,10
$W_j$	0,13	0,08	0,05	0,75

Portanto, as ponderações calculadas através do método da entropia são: tenacidade = 0,13; módulo de flexão média = 0,08; dureza Vickers média = 0,05; e preço/volume = 0,75.

Por este método de atribuição de pesos fica claro que há grande variação de possibilidades em relação ao preço médio dos materiais candidatos, o que é refletido, portanto, em um peso maior em relação aos outros critérios.

### 4.3.2 SAATY

Como discutido anteriormente, a pesquisa de perfil de consumo dos usuários revelou, de forma simplista, uma hierarquia de importância dos pontos que são analisados ao considerar a obtenção de uma nova viseira. Portanto, com os valores médios de peso atribuídos, a classificação de importância se dá por:

- Durabilidade, com nota atribuída de 5,90. Implica nos requisitos de tenacidade ( $K_{1c}$ ) e rigidez (E), uma vez estes requisitos estão diretamente relacionados com o quanto o material irá resistir aos impactos, sendo mais durável;
- Susceptibilidade à riscos, com nota atribuída de 5,71. Implica no requisito de dureza (D), pois quanto maior a dureza, menos suscetível ao risco o material é;
- Custo ( $C_v$ ), com nota 2,50. Com a menor nota média atribuída pelos participantes da pesquisa, este é o requisito menos importante a se considerar na obtenção do produto.

Portanto, de acordo com a pesquisa realizada, tenacidade e rigidez são igualmente importantes, e ligeiramente mais importantes que a dureza. Por fim, o custo é o menos importante, apresentando grande diferença de importância em relação aos outros requisitos.

Utilizando a escala de Saaty, na Tabela 12 é possível observar a importância de cada requisito.

Tabela 12 – Aplicação da escala de Saaty.

	<b><math>K_{1c}</math></b>	<b>E</b>	<b><math>C_v</math></b>	<b>D</b>
$K_{1c}$	1	1	5	3
E	1	1	5	3
$C_v$	0,20	0,20	1	0,33
D	0,33	0,33	3	1
<b>Soma</b>	<b>2,53</b>	<b>2,53</b>	<b>14</b>	<b>7,33</b>



Na Tabela 13 são apresentados os dados normalizados.

Tabela 13 – Tabela de Saaty normalizada.

	<b>K<sub>1c</sub></b>	<b>E</b>	<b>C<sub>v</sub></b>	<b>D</b>
K <sub>1c</sub>	0,39	0,39	0,36	0,41
E	0,39	0,39	0,36	0,41
C <sub>v</sub>	0,08	0,08	0,07	0,05
D	0,13	0,13	0,21	0,14
<b>Soma</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>

Por fim, o vetor de prioridade é calculado pela média aritmética de cada critério, como na Tabela 14.

Tabela 14 Tabela 14 – Vetores de prioridade para cada atributo.

<b>Atributo</b>	<b>Vetor de prioridade</b>
K <sub>1c</sub>	0,39
E	0,39
C <sub>v</sub>	0,07
D	0,15

Portanto, as ponderações calculadas através do método de Saaty são: tenacidade = 0,39; módulo de flexão média = 0,39; dureza Vickers média = 0,15; e preço/volume = 0,07.

#### **4.4 METODOLOGIAS DE TOMADA DE DECISÃO**

Após a definição dos fatores de ponderação, aplicou-se as metodologias de tomada de decisão baseadas em TOPSIS e COPRAS para classificar os candidatos de acordo com a otimização de desempenho que proporcionam.

##### **4.4.1 SELEÇÃO PELO MÉTODO TOPSIS UTILIZANDO A PONDERAÇÃO PELO MÉTODO DA ENTROPIA**

O método TOPSIS para seleção de materiais busca o material que mais se adequa à solução ideal para o problema. Portanto, partindo-se da matriz de propriedades normalizadas (Tabela 10) e aplicando-se os fatores de ponderação anteriormente calculados ( $K_{1c} = 0,13$ ;  $E = 0,08$ ;  $D = 0,05$ ;  $C_v = 0,75$ ), obteve-se a matriz de propriedades normalizadas e ponderadas (Tabela 15).

Tabela 15 – Matriz normalizada e ponderada pelo método TOPSIS/Entropia.

<b>Material</b>	<b><math>K_{1c}</math></b>	<b>E</b>	<b>D</b>	<b><math>C_v</math></b>
PMMA + PC	0,004	0,004	0,002	0,025
PC + poliéster transparente e amorfo (qualidade óptica);	0,008	0,004	0,002	0,027
PA410 (moldagem e extrusão)	0,008	0,003	0,003	0,063
SAN (extrusão e moldagem)	0,005	0,007	0,004	0,010
PA transparente (parcialmente cicloalifático, amorfo, alta Tg)	0,009	0,004	0,004	0,079
SMA (moldagem e extrusão)	0,004	0,005	0,002	0,036
PC (copolímero, resistência ao calor)	0,010	0,004	0,003	0,019
PMMA	0,005	0,004	0,002	0,024
MABS (ABS transparente)	0,008	0,004	0,002	0,015
PSU (extrusão e moldagem)	0,007	0,005	0,004	0,086
PETG	0,005	0,004	0,002	0,019
PCTA	0,012	0,003	0,002	0,019
COC	0,010	0,006	0,003	0,097
PEI	0,007	0,006	0,004	0,147
PPC	0,008	0,004	0,003	0,032
PLA	0,009	0,006	0,003	0,023
TPU(r) (moldagem)	0,007	0,004	0,003	0,029

Os valores destacados em vermelho indicam os valores não-ideais para aquele requisito, enquanto os destacados em azul indicam os valores ideais. Para as propriedades de tenacidade, módulo de flexão e dureza, os valores mais altos são os que se aproximam da idealidade pois busca-se maximizá-los. Por outro lado, a relação entre preço e volume deve ser minimizada, a fim de se obter um produto com custo mais baixo.

Sendo assim,  $v_{i+}$  e  $v_{i-}$ , que são as distâncias ideais e não-ideais, respectivamente, são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Valores ideais e não-ideais para os requisitos para o método TOPSIS/Entropia.

	<b>K<sub>1c</sub></b>	<b>E</b>	<b>D</b>	<b>C<sub>v</sub></b>
Valor ideal $v_{j+}$	0,012	0,007	0,004	0,010
Valor não ideal $v_{j-}$	0,004	0,003	0,002	0,147

As medidas de separação ( $S_{i+}$  e  $S_{i-}$ ) calculadas são apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 – Medidas de separação para o método TOPSIS/Entropia.

<b>Material</b>	<b>S<sub>i+</sub></b>	<b>S<sub>i-</sub></b>
PMMA + PC	0,018	0,122
PC + poliéster transparente e amorfo (qualidade óptica);	0,018	0,120
PA410 (moldagem e extrusão)	0,054	0,084
SAN (extrusão e moldagem)	0,007	0,137
PA transparente (parcialmente cicloalifático, amorfo, alta T <sub>g</sub> )	0,069	0,068
SMA (moldagem e extrusão)	0,028	0,111
PC (copolímero, resistência ao calor)	0,010	0,128
PMMA	0,017	0,122

MABS (ABS transparente)	0,007	0,132
PSU (extrusão e moldagem)	0,076	0,061
PETG	0,012	0,128
PCTA	0,010	0,129
COC	0,087	0,050
PEI	0,137	0,005
PPC	0,023	0,115
PLA	0,013	0,125
TPU(r) (moldagem)	0,020	0,118

Por fim, a classificação se dá de acordo com os coeficientes de separação, demonstrada na Tabela 18.

Tabela 18 – Classificação dos materiais candidatos de acordo com o método TOPSIS/Entropia.

<b>Material</b>	<b>Ci+</b>	<b>Classificação</b>
SAN (extrusão e moldagem)	0,950	1
MABS (ABS transparente)	0,949	2
PCTA	0,930	3
PC (copolímero, resistência ao calor)	0,926	4
PETG	0,914	5
PLA	0,905	6
PMMA	0,879	7
PMMA + PC	0,872	8
PC + poliéster transparente e amorfo (qualidade óptica);	0,869	9
TPU(r) (moldagem)	0,857	10
PPC	0,835	11
SMA (moldagem e extrusão)	0,800	12

PA410 (moldagem e extrusão)	0,610	13
PA transparente (parcialmente cicloalifático, amorfo, alta Tg)	0,494	14
PSU (extrusão e moldagem)	0,447	15
COC	0,365	16
PEI	0,034	17

Sendo assim, por este método de seleção, o SAN se destaca como o melhor candidato para a fabricação do produto.

#### 4.4.2 SELEÇÃO PELO MÉTODO TOPSIS UTILIZANDO A PONDERAÇÃO PELO MÉTODO DE SAATY

Partindo-se da matriz de propriedades normalizadas (Tabela 10) e aplicando-se os fatores de ponderação anteriormente calculados ( $K_{1c} = 0,39$ ;  $E = 0,39$ ;  $D = 0,15$ ;  $C_v = 0,07$ ), obteve-se a matriz de propriedades normalizadas e ponderadas (Tabela 19).

Tabela 19 – Matriz normalizada e ponderada para o método TOPSIS/Saaty.

Material	$K_{1c}$	E	D	$C_v$
PMMA + PC	0,011	0,022	0,007	0,002
PC + poliéster transparente e amorfo (qualidade óptica);	0,025	0,020	0,007	0,003
PA410 (moldagem e extrusão)	0,026	0,013	0,009	0,006
SAN (extrusão e moldagem)	0,016	0,036	0,011	0,001
PA transparente (parcialmente cicloalifático, amorfo, alta Tg)	0,028	0,021	0,011	0,007
SMA (moldagem e extrusão)	0,013	0,025	0,007	0,003

PC (copolímero, resistência ao calor)	0,030	0,022	0,010	0,002
PMMA	0,014	0,019	0,007	0,002
MABS (ABS transparente)	0,025	0,021	0,007	0,001
PSU (extrusão e moldagem)	0,022	0,024	0,012	0,008
PETG	0,017	0,019	0,007	0,002
PCTA	0,038	0,017	0,007	0,002
COC	0,029	0,029	0,008	0,009
PEI	0,020	0,031	0,011	0,014
PPC	0,025	0,020	0,010	0,003
PLA	0,029	0,031	0,009	0,002
TPU(r) (moldagem)	0,022	0,020	0,009	0,003

Os valores de  $v_{i+}$  e  $v_{i-}$  estão destacados em azul e vermelho, respectivamente.

Os valores de medida de separação  $S_{i+}$  e  $S_{i-}$  estão demonstrados na Tabela 20.

Tabela 20 – Cálculo das medidas de separação.

Material	$S_{i+}$	$S_{i-}$
PMMA + PC	0,028	0,014
PC + poliéster transparente e amorfo (qualidade óptica)	0,014	0,019
PA410 (moldagem e extrusão)	0,013	0,017
SAN (extrusão e moldagem)	0,022	0,026
PA transparente (parcialmente cicloalifático, amorfo, alta $T_g$ )	0,011	0,020
SMA (moldagem e extrusão)	0,026	0,016
PC (copolímero, resistência ao calor)	0,008	0,024
PMMA	0,024	0,013
MABS (ABS transparente)	0,014	0,020

PSU (extrusão e moldagem)	0,017	0,017
PETG	0,022	0,015
PCTA	0,004	0,030
COC	0,009	0,025
PEI	0,018	0,020
PPC	0,013	0,020
PLA	0,010	0,028
TPU(r) (moldagem)	0,017	0,017

Por fim, na Tabela 21 os coeficientes de aproximação relativa ( $C_{i+}$ ) são obtidos, revelando a classificação de cada material para este método.

Tabela 21 – Classificação dos materiais candidatos pelo método TOPSIS/Saaty.

<b>Material</b>	<b><math>C_{i+}</math></b>	<b>Classificação</b>
PCTA	0,873	1
PC (copolímero, resistência ao calor)	0,748	2
PLA	0,745	3
COC	0,723	4
PA transparente (parcialmente cicloalifático, amorfo, alta Tg)	0,650	5
PPC	0,602	6
MABS (ABS transparente)	0,593	7
PC + poliéster transparente e amorfo (qualidade óptica)	0,586	8
PA410 (moldagem e extrusão)	0,564	9
SAN (extrusão e moldagem)	0,541	10
PEI	0,535	11
TPU(r) (moldagem)	0,507	12
PSU (extrusão e moldagem)	0,500	13

PETG	0,399	14
SMA (moldagem e extrusão)	0,374	15
PMMA	0,351	16
PMMA + PC	0,336	17

Portanto, para o método TOPSIS utilizando a ponderação pela escala de Saaty, o PCTA é o material mais ideal para a aplicação. Por outro lado, o PMMA que é padrão para a fabricação de viseiras de goleiro, foi classificado como o 16° melhor material.

#### 4.4.3 SELEÇÃO PELO MÉTODO COPRAS UTILIZANDO A PONDERAÇÃO PELO MÉTODO DA ENTROPIA

O método COPRAS, semelhante ao método TOPSIS, se inicia com a normalização e ponderação dos valores dos requisitos para cada material. Portanto, a partir da Tabela 15, calculou-se a soma benéfica ( $S_{+i}$ ) e não-benéfica ( $S_{-i}$ ) dos atributos, de forma que a lógica de minimizar o preço e maximizar as propriedades mecânicas deve ser seguida. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Soma benéfica e não-benéfica para o método COPRAS/Entropia.

<b>Material</b>	<b><math>S_{+i}</math></b>	<b><math>S_{-i}</math></b>
PMMA + PC	0,010	0,025
PC + poliéster transparente e amorfo (qualidade óptica)	0,014	0,027
PA410 (moldagem e extrusão)	0,014	0,063
SAN (extrusão e moldagem)	0,016	0,010
PA transparente (parcialmente cicloalifático, amorfo, alta Tg)	0,017	0,079
SMA (moldagem e extrusão)	0,011	0,036
PC (copolímero, resistência ao calor)	0,017	0,019
PMMA	0,011	0,024
MABS (ABS transparente)	0,014	0,015
PSU (extrusão e moldagem)	0,015	0,086
PETG	0,012	0,019
PCTA	0,018	0,019
COC	0,018	0,097



PEI	0,016	0,147
PPC	0,015	0,032
PLA	0,018	0,023
TPU(r) (moldagem)	0,014	0,029

Na Tabela 23 são apresentados os valores de significância relativa  $Q_i$  e a utilidade relativa  $U_i$ , dado  $S_{-min} = 0,0099$ .

Tabela 23 – Significância relativa e utilidade relativa para o método COPRAS/Entropia.

<b>Material</b>	<b><math>Q_i</math></b>	<b><math>Q_{max}</math></b>	<b><math>U_i</math> (%)</b>
PMMA + PC	0,057	0,134	42,177
PC + poliéster transparente e amorfo (qualidade óptica);	0,057	0,134	42,823
PA410 (moldagem e extrusão)	0,032	0,134	24,055
SAN (extrusão e moldagem)	0,134	0,134	100,000
PA transparente (parcialmente cicloalifático, amorfo, alta $T_g$ )	0,031	0,134	23,411
SMA (moldagem e extrusão)	0,044	0,134	32,449
PC (copolímero, resistência ao calor)	0,078	0,134	57,840
PMMA	0,059	0,134	43,605
MABS (ABS transparente)	0,094	0,134	70,236
PSU (extrusão e moldagem)	0,029	0,134	21,662
PETG	0,073	0,134	54,369
PCTA	0,081	0,134	60,211
COC	0,030	0,134	22,276
PEI	0,024	0,134	18,059
PPC	0,052	0,134	38,695

PLA	0,071	0,134	52,556
TPU(r) (moldagem)	0,055	0,134	40,852

Os materiais candidatos são então classificados de acordo com a utilidade relativa, como apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 – Classificação dos materiais candidatos pelo método COPRAS/Entropia.

<b>Material</b>	<b>Ui (%)</b>	<b>Classificação</b>
SAN (extrusão e moldagem)	100,0	1
MABS (ABS transparente)	70,2	2
PCTA	60,2	3
PC (copolímero, resistência ao calor)	57,8	4
PETG	54,4	5
PLA	52,6	6
PMMA	43,6	7
PC + poliéster transparente e amorfo (qualidade óptica);	42,8	8
PMMA + PC	42,2	9
TPU(r) (moldagem)	40,9	10
PPC	38,7	11
SMA (moldagem e extrusão)	32,4	12
PA410 (moldagem e extrusão)	24,1	13
PA transparente (parcialmente cicloalifático, amorfo, alta Tg)	23,4	14
COC	22,3	15
PSU (extrusão e moldagem)	21,7	16
PEI	18,1	17

Portanto, para este método, o melhor candidato para a fabricação de viseiras poliméricas para goleiros é o copolímero SAN. Por outro lado, o PEI é o material que menos se adequa à solução do problema segundo esse método.

#### 4.4.4 SELEÇÃO PELO MÉTODO COPRAS UTILIZANDO A PONDERAÇÃO PELO MÉTODO DE SAATY

A partir da Tabela 19, calculou-se a soma benéfica ( $S_{+i}$ ) e não-benéfica ( $S_{-i}$ ) dos atributos, de forma que a lógica de minimizar o preço e maximizar as propriedades mecânicas deve ser seguida. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Medidas de separação para o método COPRAS/Saaty.

<b>Material</b>	<b><math>S_{+i}</math></b>	<b><math>S_{-i}</math></b>
PMMA + PC	0,039	0,002
PC + poliéster transparente e amorfo (qualidade óptica)	0,052	0,003
PA410 (moldagem e extrusão)	0,048	0,006
SAN (extrusão e moldagem)	0,063	0,001
PA transparente (parcialmente cicloalifático, amorfo, alta Tg)	0,060	0,007
SMA (moldagem e extrusão)	0,044	0,003
PC (copolímero, resistência ao calor)	0,061	0,002
PMMA	0,040	0,002
MABS (ABS transparente)	0,053	0,001
PSU (extrusão e moldagem)	0,057	0,008
PETG	0,043	0,002
PCTA	0,062	0,002
COC	0,067	0,009
PEI	0,063	0,014
PPC	0,055	0,003
PLA	0,070	0,002
TPU(r) (moldagem)	0,051	0,003

Com o valor de  $S_{i-\min}$  sendo 0,001, é possível obter então os valores de  $Q_i$ ,  $Q_{i\max}$  e conseqüentemente  $U_i$ , conforme apresentado na Tabela 26.

Tabela 26 – Significância relativa e utilidade relativa para o método COPRAS/Saaty.

	<b>Qi</b>	<b>Qmax</b>	<b>Ui (%)</b>
PMMA + PC	0,044	0,075	54,192
PC + poliéster transparente e amorfo (qualidade óptica)	0,056	0,075	75,564
PA410 (moldagem e extrusão)	0,050	0,075	66,432
SAN (extrusão e moldagem)	0,074	0,075	98,860
PA transparente (parcialmente cicloalifático, amorfo, alta Tg)	0,061	0,075	82,329
SMA (moldagem e extrusão)	0,047	0,075	63,535
PC (copolímero, resistência ao calor)	0,067	0,075	89,985
PMMA	0,045	0,075	59,986
MABS (ABS transparente)	0,061	0,075	81,304
PSU (extrusão e moldagem)	0,058	0,075	78,349
PETG	0,049	0,075	65,964
PCTA	0,068	0,075	91,698
COC	0,068	0,075	91,134
PEI	0,063	0,075	85,082
PPC	0,059	0,075	78,932
PLA	0,075	0,075	100,000
TPU(r) (moldagem)	0,055	0,075	73,818

Classificando-os, então, pela utilidade relativa  $U_i$ , obtemos a Tabela 27.

Tabela 27 – Classificação dos materiais candidatos pelo método COPRAS/Saaty.

<b>Material</b>	<b>Ui (%)</b>	<b>Classificação</b>
PLA	100,000	1
SAN (extrusão e moldagem)	98,860	2
PCTA	91,698	3
COC	91,134	4

PC (copolímero, resistência ao calor)	89,985	5
PEI	85,082	6
PA transparente (parcialmente cicloalifático, amorfo, alta Tg)	82,329	7
MABS (ABS transparente)	81,304	8
PPC	78,932	9
PSU (extrusão e moldagem)	78,349	10
PC + poliéster transparente e amorfo (qualidade óptica)	75,564	11
TPU(r) (moldagem)	73,818	12
PA410 (moldagem e extrusão)	66,432	13
PETG	65,964	14
SMA (moldagem e extrusão)	63,535	15
PMMA	59,986	16
PMMA + PC	54,192	17

É possível notar então que PLA é o material candidato que mais se adequa à aplicação de acordo com o método COPRAS com a ponderação de Saaty. Novamente, o PMMA, apesar de ser o material padrão para esta aplicação, se encontra apenas na 16ª posição, seguido da blenda PMMA+PC.

## 5 DISCUSSÃO

Nesta seção serão discutidos os resultados obtidos através dos diferentes métodos de seleção de materiais. Na Tabela 28 as três primeiras colocações de cada método estão descritas.

Tabela 28 – Materiais classificados nas três primeiras posições de cada metodologia.

Classificação	TOPSIS		COPRAS	
	Saaty	Entropia	Saaty	Entropia
1	PCTA	SAN (extrusão e moldagem)	PLA	SAN (extrusão e moldagem)

2	PC (copolímero, resistência ao calor)	MABS (ABS transparente)	SAN (extrusão e moldagem)	MABS (ABS transparente)
3	PLA	PCTA	PCTA	PCTA

Sendo assim, o SAN obteve a 1ª posição em duas ocasiões com ponderação semelhante: tanto pelo método TOPSIS quanto COPRAS, utilizando a ponderação por entropia, indicaram que este material é o melhor candidato para a fabricação de viseiras poliméricas para capacetes de goleiro. Este mesmo material figurou na 2ª posição pelo método COPRAS/Saaty.

Este copolímero possui propriedades como alta transparência, resistência química contra ácidos e bases, além de suas propriedades mecânicas anteriormente expostas. Por isso ele é utilizado para substituir o poliestireno em aplicações que exijam resistência química, mas também na indústria de eletrônicos, eletrodomésticos e embalagens [8].

Além disso, os materiais MABS, PCTA e PLA também apresentaram um desempenho satisfatório, aparecendo como boas opções em diferentes metodologias.

O MABS, que se trata de uma blenda de metil metacrilato acrilonitrila butadieno estireno, se polimeriza da mistura do SAN com metil metacrilato e butadieno, formando um material de alta transparência e resistência ao impacto [9], características imprescindíveis para o bom funcionamento do equipamento de goleiro.

Geralmente utilizado em embalagens plásticas, o PCTA é um copoliéster modificado e amorfo que também tem diversas aplicações como eletrônicos e equipamentos esportivos [9]. Ademais, pode ser moldado em peças com precisão pelo método de moldagem por injeção [10], característica imprescindível para a fabricação de produtos de geometria complexa como as viseiras para goleiro de hóquei. Além disso, foi o único material presente entre os três melhores candidatos para todas as metodologias. Em comparação ao PMMA, com uma densidade de 1,14 kg/m<sup>3</sup>, a sua densidade também é similar, sendo de 1,21 kg/m<sup>3</sup> [7].

Já o PLA, um poliéster alifático obtido através do ácido láctico, é um biopolímero biodegradável, utilizado principalmente na indústria biomédica pois também é biocompatível [13]. Também é encontrado em filmes para embalagem de

produtos agrícolas [14] e produtos domésticos como copos e vestuário [13]. Entretanto, o seu tempo de vida é encurtado por conta de suas características de biodegradação

Por fim, o PC, esteve na 2ª posição pelo método COPRAS-Saaty, indicando que também é uma ótima opção, visto que possui excelentes características de transparência e desempenho mecânico.

Por outro lado, as últimas posições indicam que o método utilizado exerce grande influência na classificação. Na Tabela 29 as últimas colocações estão descritas.

Tabela 29 – Materiais classificados nas últimas três posições de cada metodologia.

Classificação	TOPSIS		COPRAS	
	Saaty	Entropia	Saaty	Entropia
15	SMA (moldagem e extrusão)	PSU	SMA (moldagem e extrusão)	COC
16	PMMA	COC	PMMA	PSU
17	PMMA + PC	PEI	PMMA + PC	PEI

Nota-se que não houve candidatos repetidos entre as metodologias Saaty e entropia, indicando que a metodologia exerceu grande influência na classificação.

É possível observar que a ponderação Saaty influenciou de forma que houve repetição entre os materiais menos adequados para a fabricação das viseiras. Por esta metodologia, o material padrão PMMA se classificou nas últimas posições, juntamente com a blenda PMMA+PC.

O PMMA, conhecido como acrílico é utilizado para a substituição de vidros em determinados ambientes, e apesar de possuir excelentes propriedades de transparência, não é tão resistente ao impacto e superficialmente duro quanto o policarbonato, além de ser mais custoso. Portanto, a blenda PMMA+PC pode se apresentar em proporções em que todas as características necessárias sejam equilibradas, permitindo um material seguro e funcional. Entretanto, tanto o PMMA quanto a blenda PMMA+PC possuem uma tenacidade relativamente baixa em comparação aos seus concorrentes, sendo de 1,52 e 1,99 MPa<sup>1/2</sup>, respectivamente.

Como a metodologia Saaty apresentou ponderação alta para estes requisitos, isto influenciou as suas colocações.

Já o SMA, um copolímero aleatório de estireno e anidrido maleico, é utilizado em partes interiores de carros [15] e também como alternativa para espumas para embalagens alimentícias [16]. Entretanto, assim como o PMMA e a blenda PMMA+PC, este material polimérico possui uma tenacidade baixa ( $1,74 \text{ Mpa}^{1/2}$ ) em relação aos outros materiais candidatos, além de uma baixa dureza Vickers, sendo 13,7 HV, a menor entre os candidatos.

Para a metodologia utilizando a entropia, os três últimos candidatos também se repetiram alternando as posições. Também foi evidenciado que os polímeros de engenharia PEI, COC e PSU, dentre os polímeros previamente selecionados, não são os mais adequados para a produção do produto-alvo. Isso se dá porque mesmo com suas excelentes propriedades mecânicas, o seu alto custo dificulta a sua utilização em aplicações em que o custo deve ser reduzido.

A resina polieterimida (PEI) foi obtida pela primeira vez pela General Electric Company pela marca ULTEM e se destaca pela capacidade de manter as suas propriedades mecânicas em elevadas temperaturas, associada a uma boa processabilidade [17].

O COC, um copolímero de olefina cíclica, é utilizado em CD-ROM, embalagens, aparatos médicos, capacitores e aglutinantes de toner de impressora devido às suas boas propriedades ópticas e mecânicas. Sendo assim, são excelentes para aplicações de alta performance [18].

Principalmente utilizado em aplicações de alta temperatura, a polisulfona (PSU) possui uma ampla gama de aplicações envolvendo o campo hospitalar, principalmente por sua resistência à hidrólise, automobilístico, eletroeletrônico [19], bem como tratamento de água e destilação por membrana [20].



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que os métodos de seleção de materiais e ponderação de fatores foram satisfatórios para analisar os melhores materiais para a aplicação em viseiras para goleiros de hóquei.

Mesmo com os resultados divergentes, foi observado que o PCTA é uma boa escolha porque se manteve nas melhores posições independente da metodologia, além de possuir uma densidade similar à do material atualmente utilizado, implicando em conforto aos usuários em relação ao peso do equipamento.

Além disso, não se pode ser descartada a utilização de outros materiais como SAN, MABS, PLA e PC pois também apresentaram desempenho satisfatório.

Por outro lado, alguns materiais como os polímeros de engenharia (PEI, COC e PSU) possuem custo alto e suas aplicações são de alta performance, possuindo um baixo custo-benefício para esta aplicação. Já o SMA não apresentou desempenho suficiente para se destacar para esta aplicação em relação aos materiais analisados, estando entre as últimas colocações.

Por fim, conclui-se que o método de ponderação exerceu maior influência para a classificação dos materiais, uma vez que mudando o método de seleção e mantendo o método de ponderação, a classificação se manteve similar. Sendo assim, a metodologia de Saaty se destacou pela capacidade de ponderar os materiais em relação às exigências dos usuários, enquanto o método da entropia influenciou a ponderação pela discrepância de custo dos materiais, que não foi a característica mais importante de acordo com a opinião dos usuários.

## 7 REFERÊNCIAS

- [1] HoqueiShop -. Disponível em:  
<<https://hoqueishop.com/?zona=catalogos&fam=472&id=473>>. Acesso em: 7 jan. 2024.
- [2] CHATTERJEE, P.; ATHAWALE, V. M.; CHAKRABORTY, S. Materials selection using complex proportional assessment and evaluation of mixed data methods. *Materials & Design*, v. 32, n. 2, p. 851–860, fev. 2011.
- [3] Ashby, M. F. Seleção de materiais no projeto mecânico. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- [4] AL-AOMAR, Raid. A combined ahp-entropy method for deriving subjective and objective criteria weights. *Int. J Ind. Eng. Theory Appl. Pract*, v. 17, p. 12-24, 2010.
- [5] SHANNON, C. E.; WEAVER, W. The Mathematical Theory of Communication. *The Mathematical Gazette*, v. 34, n. 310, p. 312, dez. 1949.
- [6] Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. doi:10.1016/0377-2217(90)90057-i.
- [7] RAO, R. V.; DAVIM, J. P. 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. 7-8, p. 751–760, 8 nov. 2006.
- [8] Software, GRANTA EduPack 2020.
- [9] DOREL FELDMAN; BARBALATA, A. Synthetic polymers: technology, properties, applications. London: Chapman & Hall, 1996.
- [10] RODRIGUES, B.; TAVARES, C. UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS CENTRO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS Trabalho de Conclusão de Curso ESTUDO DE CASO DE UMA PEÇA POLIMÉRICA APLICADA NA INDÚSTRIA MÉDICA. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://wp.ufpel.edu.br/engmateriais/files/2019/02/TCC-Bernardo.pdf>>. Acesso em: 7 jan. 2024.
- [11] DuraStar Polymer DS1910HF - Natural | Eastman. Disponível em: <<https://www.eastman.com/en/products/product-detail?product=71048441&pn=durastar+polymer+ds1910hf+--+natural>>. Acesso em: 7 jan. 2024.

- [12] S. RICHARD TURNER; SEYMOUR, R. W.; DOMBROSKI, J. R. Amorphous and Crystalline Polyesters Based on 1,4-Cyclohexanedimethanol. p. 267–292, 21 jun. 2004.
- [13] LEE TIN SIN; W A W A RAHMAN; RAHMAT, A. R. Polylactic acid : PLA biopolymer technology and applications. Oxford, Uk: William Andrew ; Elsevier, 2013.
- [14] FARAH, S.; ANDERSON, D. G.; LANGER, R. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. Other repository, 1 jun. 2016.
- [15] KLUMPERMAN, B. Mechanistic considerations on styrene – maleic anhydride copolymerization reactions. *Polymer Chemistry*, v. 1, n. 5, p. 558–562, 2010.
- [16] ROBERTS, R. D.; KWOK, J. C. Styrene–Maleic Anhydride Copolymer Foam for Heat Resistant Packaging. *Journal of Cellular Plastics*, v. 43, n. 2, p. 135–143, 1 mar. 2007.
- [17] JOHNSON, R. O.; H. BURLHIS. Polyetherimide: A new high-performance thermoplastic resin. *Journal of Polymer Science: Polymer Symposia*, v. 70, n. 1, p. 129–143, 8 mar. 2007.
- [18] LAMONTE, R. R. et al. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.elite-plastic.com.tw/COC-1.pdf>>.
- [19] LANDO, G. Universidade Federal do Rio Grande do Sul Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais FILMES DE POLISULFONA MODIFICADOS SUPERFICIALMENTE POR IRRADIAÇÃO UV-ASSISTIDA PARA AVALIAÇÃO DA BIODEGRADAÇÃO POR MICRO-ORGANISMOS. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/142187/000992801.pdf?sequence=1&locale-attribute=es>>. Acesso em: 7 jan. 2024.
- [20] KHEIRIEH, S.; ASGHARI, M.; AFSARI, M. Application and modification of polysulfone membranes. *Reviews in Chemical Engineering*, v. 34, n. 5, p. 657–693, 28 ago. 2018.
- [21] TSAI, Y. et al. Amorphous copolyesters based on 1,3/1,4-cyclohexanedimethanol: Synthesis, characterization and properties. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 109, n. 4, p. 2598–2604, 2008.

## **APÊNDICE A – Tabelas de cálculo**

Link para planilha eletrônica utilizada para cálculos: <  
[https://docs.google.com/spreadsheets/d/1O\\_oydrkMGUsWWxCoe18nTmGWJmIldNnO7ggU3RlihKs/edit?usp=sharing](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1O_oydrkMGUsWWxCoe18nTmGWJmIldNnO7ggU3RlihKs/edit?usp=sharing) >.