

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

TÚLIO ESTEVES TORMIN BOTELHO

SELEÇÃO DE ESPUMA POLIMÉRICA PARA ISOLAMENTO TÉRMICO VISANDO  
REDUÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS

BELO HORIZONTE

2019

TÚLIO ESTEVES TORMIN BOTELHO

SELEÇÃO DE ESPUMA POLIMÉRICA PARA ISOLAMENTO TÉRMICO VISANDO  
REDUÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcello Dumont

BELO HORIZONTE

2019

TÚLIO ESTEVES TORMIN BOTELHO

**SELEÇÃO DE ESPUMA POLIMÉRICA PARA ISOLAMENTO TÉRMICO VISANDO  
REDUÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado no Curso de Graduação em  
Engenharia de Materiais do Centro Federal  
de Educação Tecnológica de Minas Gerais  
como requisito parcial para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia de  
Materiais.

Aprovado em:

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Marcello Dumont - Orientador

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Aline Bruna da Silva

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Aline Silva Magalhães

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me mantido na trilha certa durante este projeto de pesquisa, com saúde e forças para chegar até o final.

Sou grato também à minha família, meu pai Virgílio, minha mãe Regina e meu irmão Tomás, pelo apoio que sempre me deram durante toda essa jornada.

Agradeço à minha namorada, Giuliana, por todo incentivo.

Deixo um agradecimento especial ao meu orientador, Marcello Dumont, pela ajuda, orientação e pela dedicação de seu escasso tempo ao meu projeto de pesquisa.

Não poderia esquecer dos meus professores, que tiveram toda paciência e esforço pelo ensino.

## RESUMO

*Eco-design* é o *design* voltado para diminuição de impactos ambientais, buscando pelo desenvolvimento de produtos ecologicamente responsáveis, sem que performance e custo sejam prejudicados. A seleção de materiais com foco nessa definição visa o estabelecimento de atributos ecológicos que auxiliam a escolha do material de menor impacto dentro dos critérios estabelecidos e abrem a possibilidade de substituição de antigos e tradicionais materiais, por outros que desempenham função igual ou semelhante, com conceitos, no entanto, alinhados à sustentabilidade. Dessa forma, este trabalho propôs a seleção de espuma polimérica para isolamento térmico visando o *eco-design*. A metodologia utilizada baseou-se na metodologia de seleção de materiais desenvolvida por Michael Ashby. Atributos ecológicos ou eco-atributos foram estabelecidos para serem analisados em conjunto com a condutividade térmica, parâmetro definido como de maior relevância dentro da aplicação em questão. Diagramas de propriedades de materiais foram construídos por meio do software CES EduPack e índices de mérito foram definidos e obtidos com o objetivo de classificar as espumas, incluindo a espuma de poliuretano, espuma mais utilizada para aplicações de isolamento térmico e que atuou como base comparativa nas análises. A classificação final das espumas foi realizada pela soma dos índices de mérito encontrados para cada conjunto de eco-atributo e condutividade térmica. A espuma que apresentou o maior somatório de índices de mérito e, portanto, apresentou a melhor combinação das propriedades estabelecidas e estudadas, foi a espuma fenólica. Além desta, outras seis espumas apresentaram somatório de índices de mérito superior ao da espuma de poliuretano e, por isso, também são candidatas potenciais para substituição desta espuma na aplicação analisada.

**Palavras-chave:** *eco-design*, seleção de materiais, espumas, isolamento térmico.

## ABSTRACT

Eco-design is the design aimed at reducing environmental impacts, seeking the development of ecologically responsible products, without impairing performance and cost. The materials selection focused on this definition aims to establish ecological attributes that help to choose the least impact material within the established criteria and open the possibility of replacing old and traditional materials with others that perform the same or similar function with concepts, however, aligned with sustainability. Thus, this work proposed the selection of polymeric foam for thermal insulation aiming the eco-design. The methodology used was based on the material selection methodology developed by Michael Ashby. Ecological attributes or eco-attributes were established to be analyzed together with the thermal conductivity, parameter defined as of greater relevance within the application in question. Material properties diagrams were constructed using the CES EduPack software and merit indices were defined and obtained with the objective of classifying foams, including polyurethane foam, which is the foam most used for thermal insulation applications and was used as a comparative basis in the analyzes. The final classification of foams was performed by summing the merit indices found for each set of eco-attributes and thermal conductivity. The foam that presented the highest sum of indices of merit and, therefore, presented the best combination of established and studied properties, was the phenolic foam. In addition, six other foams presented a sum of merit indices higher than that of polyurethane foam and, therefore, are also potential candidates for replacement of this foam in the analyzed application.

**Keywords:** eco-design, materials selection, foams, thermal insulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura celular tridimensional de espumas com (a) células abertas e.....	15
(b) células fechadas.....	15
Figura 2: Condutividade térmica como função da porosidade de espuma polimérica .....	18
Figura 3: Diagrama de propriedades de materiais – Módulo de Young x Densidade	24
Figura 4: Ciclo de vida esquemático de um produto.....	26
Figura 5: Energia consumida em cada etapa do ciclo de vida de variados produtos	27
Figura 6: Etapas de desenvolvimento do trabalho.....	30
Figura 7: Diagrama da emissão de CO <sub>2</sub> na produção primária em função da condutividade térmica para o universo das espumas.....	33
Figura 8: Diagrama da emissão de CO <sub>2</sub> na produção primária em função da condutividade térmica com foco no IM1.....	35
Figura 9: Diagrama do uso de água na produção primária em função da condutividade térmica para o universo das espumas.....	35
Figura 10: Diagrama do uso de água na produção primária em função da condutividade térmica com foco no IM2.....	37
Figura 11: Diagrama da emissão de CO <sub>2</sub> na combustão em função da condutividade térmica para o universo das espumas.....	38
Figura 12: Diagrama da emissão de CO <sub>2</sub> na combustão em função da condutividade térmica com foco no IM3.....	40
Figura 13: Diagrama do calor de combustão em função da condutividade térmica para o universo das espumas.....	41
Figura 14: Diagrama do calor de combustão em função da condutividade térmica com foco no IM4.....	43
Figura 15: Diagrama da análise de custo das melhores espumas poliméricas analisadas nesse estudo.....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Histórico do desenvolvimento de espumas poliméricas.....	12
Tabela 2: Pares de gases e polímeros utilizados na formação de espumas.....	14
Tabela 3: Potencial nocivo dos gases CFC e HCFC.....	21
Tabela 4: Classificação das espumas de acordo com o índice de Mérito 1 (IM1).....	34
Tabela 5: Classificação das espumas de acordo com o índice de Mérito 2 (IM2).....	36
Tabela 6: Classificação das espumas de acordo com o índice de Mérito 3 (IM3).....	39
Tabela 7: Classificação das espumas de acordo com o índice de Mérito 4 (IM4).....	42
Tabela 8: Classificação das espumas de acordo com o somatório dos índices de Mérito IM1, IM2, IM3 e IM4.....	44



## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVOS.....	11
2.1 OBJETIVO GERAL.....	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1 ESPUMAS.....	12
3.1.1 PRODUÇÃO E PROCESSAMENTO.....	13
3.1.2 PROPRIEDADES E PRINCIPAIS APLICAÇÕES.....	14
3.1.3 ESPUMAS PARA ISOLAMENTO TÉRMICO.....	17
3.1.4 ESPUMAS E O MEIO AMBIENTE.....	19
3.2 SELEÇÃO DE MATERIAIS.....	22
3.2.1 SELEÇÃO DE MATERIAIS VISANDO REDUÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS.....	25
3.2.2 SELEÇÃO ECOLÓGICA DE ESPUMAS PARA ISOLAMENTO TÉRMICO. .	28
4. METODOLOGIA.....	30
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
5.1 EMISSÃO DE CO <sub>2</sub> NA PRODUÇÃO PRIMÁRIA.....	33
5.2 USO DE ÁGUA NA PRODUÇÃO PRIMÁRIA.....	35
5.3 EMISSÃO DE CO <sub>2</sub> NA COMBUSTÃO.....	37
5.4 CALOR DE COMBUSTÃO.....	40
5.5 SELEÇÃO FINAL.....	43
6. CONCLUSÃO.....	47
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

## 1. INTRODUÇÃO

A busca pelo desenvolvimento sustentável tem se intensificado nas últimas décadas, devido aos já existentes danos ambientais causados pelos mais diversos tipos de práticas industriais. No entanto, este ainda é um conceito pouco claro para grande parte da população (VEZZOLI; MANZINI, 2008; LAMBRECHTS et al, 2019). O termo desenvolvimento sustentável foi introduzido pela primeira vez na Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, em 1987 e, de maneira simplificada, foi definido como o desenvolvimento que visa suprir as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades. Sabe-se hoje que a abrangência e complexidade deste termo é infinitamente maior do que sua primeira definição, mas desde então, incutiu na sociedade um princípio ético de responsabilização das gerações presentes pelas gerações futuras (VEZZOLI; MANZINI, 2008; BOSSELMANN, 2008).

De forma prática e atual, a sustentabilidade requer que o desenvolvimento ocorra sob condições sistêmicas tais que o meio ambiente seja preservado, ao mesmo tempo em que o desenvolvimento econômico e social não seja prejudicado. Para isso, políticas públicas têm direcionado esforços para motivar empresas a adotarem práticas sustentáveis como meio para isenção de impostos e aumento da lucratividade (LAMBRECHTS et al, 2019; BOSSELMANN, 2008). Já os ganhos sociais gerados pela implementação dessas práticas incluem diminuição de doenças físicas, como gripes e infecções, e psicológicas, melhorando, portanto, a qualidade de vida geral da população (SHEALY, 2016).

Esse novo olhar sobre o desenvolvimento vem fazendo com que as novas gerações de profissionais se formem ambientalmente conscientes. Dessa forma, a tendência atual é a de inclusão da responsabilidade ambiental em todas as etapas de um projeto, criando-se um novo conceito conhecido como *Eco-design* (LAMBRECHTS et al, 2019). *Eco-design* ou *design* para a sustentabilidade, significa desenvolver um produto ou processo baseando-se também em critérios ecológicos, ou seja, é uma tendência de design consciente dos impactos ambientais gerados por seus produtos. Dessa forma, além dos aspectos tradicionais, o projeto passa a levar em consideração aspectos como uso de matéria-prima, consumo de energia e água,

geração de resíduos, entre outros (VEZZOLI; MANZINI, 2008; LAMBRECHTS et al, 2019).

O *Eco-design*, portanto, leva ao desenvolvimento de produtos de baixo impacto ambiental que, no entanto, podem competir em performance e preço com produtos já estabelecidos no mercado e que não carregam essa preocupação ambiental consigo (BENKREIRA et al, 2011). Para que esse objetivo seja alcançado, uma das fases mais importantes do projeto é a fase de seleção de materiais (ASHBY, 2005; SERAFINI et al, 2015).

A seleção de materiais voltada para o *Eco-design*, como dito, deve levar em conta fatores ambientais, o que frequentemente é visto como um desafio, uma vez que a diminuição dos impactos ambientais nem sempre está de acordo com os outros requisitos do projeto, como, por exemplo, a diminuição do custo (ASHBY, 2005; VEZZOLI; MANZINI, 2008). Porém, o desenvolvimento e melhoramento contínuo de materiais faz com que o projetista tenha a sua disposição centenas ou milhares de materiais aptos a desempenhar de forma semelhante ou superior as mesmas funções que um antigo material e de maior impacto ambiental desempenharia. Logo, possibilidades de substituição são abertas e muitas vezes favorecem o design voltado para a sustentabilidade (ASHBY, 2005; SERAFINI et al, 2015).

Nesse contexto, esse trabalho propõe uma metodologia que visa selecionar a melhor espuma para isolamento térmico, tendo como foco o *Eco-design*. A metodologia de seleção de materiais adotada foi a desenvolvida por Ashby e o *software* CES EduPack foi utilizado na elaboração de gráficos e tabelas que levaram à melhor escolha do material dentro do objetivo proposto.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Aplicar a metodologia de seleção de materiais para identificar as espumas mais adequadas à aplicação de isolamento térmico, quando leva-se em conta a redução dos impactos ambientais.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Definir os atributos ecológicos que serão utilizados para realizar a análise de redução do impacto ambiental;
- Construir os diagramas de propriedades de materiais com base nos critérios determinados;
- Estabelecer os índices de mérito para cada atributo ecológico previamente definido;
- Classificar os materiais mais indicados para cada atributo ecológico;
- Relacionar os resultados encontrados em cada atributo e selecionar a espuma mais indicada para a aplicação proposta.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 ESPUMAS

As primeiras espumas poliméricas sintéticas foram patenteadas e produzidas comercialmente na primeira metade do século XX, encontrando aplicações militares durante a Segunda Guerra Mundial. Desde então e devido às interessantes e particulares propriedades dessa classe de materiais, a indústria de espumas apresentou crescimento acelerado e, atualmente, é parte importante da indústria de polímeros (SUH et al, 2000; LEE; RAMESH, 2004).

Embora as espumas poliméricas possam ser fabricadas a partir de uma grande variedade de materiais e produzidas de diversas formas distintas, alguns conceitos se aplicam à todas as espumas (EAVES, 2004). Geralmente, espumas poliméricas, também conhecidas como plásticos ou materiais celulares, são formadas por pelo menos duas fases – uma matriz sólida polimérica, que forma as paredes da estrutura celular, e uma fase gasosa acomodada em meio à matriz ou células. O polímero sólido pode ser composto de material inorgânico, orgânico ou organometálico. No caso de blendas poliméricas, pode haver mais de uma fase sólida presente e, tratando-se de compósitos, a segunda fase não é necessariamente polimérica, podendo ser cerâmica ou metálica (OKOROAFOR; FRISCH, 1995). Um breve histórico dos materiais poliméricos primeiramente utilizados no desenvolvimento de espumas está apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1: Histórico do desenvolvimento de espumas poliméricas**

Ano	Material
1931	Poliestireno (PS)
1937	Poliuretano (PU)
1941	Polietileno (PE)
1966	Poliisocianurato
1967	Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS)
1967	Policloreto de vinila (PVC)
1968	Polietileno reticulado (XPE)
1971	Politereftalato de etileno (PET)
1972	Polipropileno (PP)

Fonte: LEE, 2004 (adaptada).

##### 3.1.1 PRODUÇÃO E PROCESSAMENTO

A produção de espumas poliméricas inclui primeiramente a formação de bolhas de gás em um sistema líquido, seguida por crescimento e estabilização dessas bolhas a medida que a viscosidade do sistema polimérico aumenta. A introdução do gás pode ocorrer de diversas formas, como por decomposição térmica do agente de expansão, agitação mecânica, volatilização de líquidos de baixo ponto de ebulição e expansão de gás dissolvido no líquido pela redução da pressão do sistema (OKOROAFOR; FRISCH, 1995).

De forma mais detalhada e independente do processo de introdução do gás, o processo de produção de espumas ocorre de acordo com os seguintes estágios (EAVES, 2004):

- Inicialmente, pequenas bolhas se dispersam pela matriz polimérica líquida, ocasionando redução da densidade;
- As bolhas permanecem esféricas a princípio, mas à medida que se expandem e entram em contato umas com as outras, sofrem distorção, atingindo empacotamento denso e gerando células de geometria poliédrica;
- A densidade do material é mínima quando o empacotamento denso das bolhas é atingido;
- O aumento da viscosidade e tensão superficial do polímero promove a estabilização das bolhas e, conseqüentemente, do sistema;

Devido as mais diversas técnicas de introdução de gás utilizadas na indústria, quase todo polímero, termoplástico ou termorrígido, pode ser produzido na forma celular. No entanto, para que bons resultados sejam atingidos, é necessário que haja boa compatibilidade entre o polímero e o gás utilizado (OKOROAFOR; FRISCH, 1995; EAVES, 2004).

A substância da qual origina-se o gás responsável pela formação da estrutura celular é chamada agente de expansão. Os agentes de expansão desempenham um importante papel não apenas na manufatura, como também na performance final da espuma, uma vez que são responsáveis pelo controle da densidade do material, pela microestrutura e morfologia celular. Essas propriedades são basicamente controladas pela solubilidade e difusividade do gás no polímero. Na tabela 2 estão apresentados os principais pares de polímeros e gases empregados industrialmente nas últimas décadas (EAVES, 2004; LEE, 2004; NAWABI; ZHANG, 2005).

**Tabela 2: Pares de gases e polímeros utilizados na formação de espumas**

Gás	Polímero
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	ABS, PC, PMMA, PLA, FPVC, UPVC, PS, PBS, PBSA, PCTFE, PTFE, TPX, PI, CPE, LDPE, PP, HDPE, PET
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	LDPE, HDPE, PP, PS
Argônio (Ar)	LDPE, HDPE
HCFC*-142b	PS
HFC**-134 <sup>a</sup>	PS
HFC-152 <sup>a</sup>	PS
HCFC-22	PS, PP, HDPE, LDPE, PVC, PC, PPO
CFC***-11 e CFC-12	PS, PP
CFC-114	PS, LDPE, HDPE, PP, PVC, PC, PPO
Butano	PS, PP
Isobutano	PS, PP
Metano	LDPE, PS, PIB, HDPE
Etileno	PE

\*Hidroclorofluorcarbono (HCFC); \*\*Hidrofluorcarbono (HFC); \*\*\* Clorofluorcarbono (CFC);

Fonte: NAWABI; ZHANG, 2005 (adaptada).

Atualmente, porém, a seleção do agente de expansão tem se baseado não apenas em requisitos técnicos e econômicos, como também em requisitos relativos à segurança ambiental (EAVES, 2004; GROLIER; RANZIO, 2012). Esse tema será discutido em maiores detalhes no subíndice 'Espumas e o meio ambiente'.

Em relação ao processamento, produtos de espumas poliméricas podem ser fabricados por moldagem por compressão, moldagem por injeção, pulverização, extrusão, laminação, entre outras técnicas (LEE, 2004).

### 3.1.2 PROPRIEDADES E PRINCIPAIS APLICAÇÕES

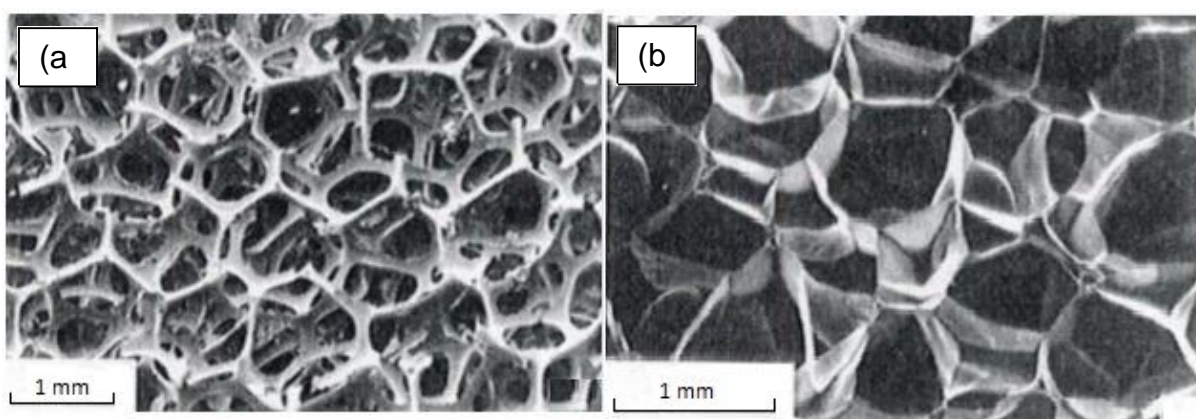
A drástica diferença entre as fases gasosa e sólida faz com que as espumas possuam propriedades únicas. Espumas poliméricas podem ser flexíveis ou rígidas a depender da temperatura ambiente, composição química e grau de cristalinidade. Espumas semi-rígidas ou semi-flexíveis estão em posição intermediária. Além disso, a geometria da célula, tamanho e o fato destas serem abertas ou fechadas influenciam fortemente as propriedades das espumas (OKOROAFOR; FRISCH, 1995; LEE, 2004; GIBSON; ASHBY, 1997).

O grau de expansão da espuma determina o tamanho da célula e, conseqüentemente, o volume de gás presente na estrutura. A densidade relativa da

espuma é uma importante forma de caracterizar o grau de expansão, uma vez que compara a densidade da espuma com a densidade do polímero que deu origem à espuma. Espumas de baixa densidade são definidas como aquelas com fração volumétrica de polímero menor do que 0,1 (EAVES, 2004).

A determinação do tamanho das células é normatizada e usualmente realizada de forma direta por meio da inspeção da seção transversal da espuma. Devido a vasta distribuição de tamanhos, é comum que esse parâmetro seja expresso em média. Células fechadas são células de paredes contínuas que impedem a saída de gás de seu interior, enquanto células abertas se comunicam e permitem que haja certa troca de gás no interior da estrutura e com o ambiente. Estruturas celulares de espumas de células abertas e fechadas estão mostradas na Figura 1. A determinação da razão de células abertas e células fechadas de uma espuma pode ser feita por ensaios de absorção ou permeabilidade e é importante na caracterização de espumas de baixa densidade (EAVES, 2004). Devido as diferenças de tamanhos, tipos e formatos de células, espumas são consideradas materiais anisotrópicos (OKOROAFOR; FRISCH, 1995; LEE, 2004).

**Figura 1: Estrutura celular tridimensional de espumas com (a) células abertas e (b) células fechadas**



Fonte: GIBSON; ASHBY, 1997.

As propriedades mecânicas de espumas são geralmente proporcionais à sua densidade, de modo que o tipo de aplicação determina qual faixa de densidades deve ser produzida. Logo, quando a aplicação requer certa resistência mecânica para suporte de carga, espumas de alta densidade são usadas. Por outro lado, espumas de baixa densidade são empregadas para isolamento térmico e acústico (OKOROAFOR; FRISCH, 1995).



A transmissão do som através de um material poroso, como as espumas, ocorre pela propagação através do gás contido nos poros e através da matriz polimérica. A onda sonora que chega a uma espuma pode ser refletida, absorvida ou transmitida. A reflexão pode ocorrer na superfície da espuma e nas paredes das células. Espumas de baixa densidade minimizam a reflexão na superfície. O gás contido nos poros exerce um importante papel de absorção do som, enquanto a matriz polimérica está mais relacionada às perdas de transmissão. Logo, a porosidade e distribuição de tamanho dos poros de uma espuma afetam de maneira mais efetiva o coeficiente de absorção, enquanto a densidade do polímero e espessura das paredes das células afetam a perda de transmissão do som (HUNG et al; 2014; HOPKINS; 2007; GIBSON; ASHBY, 1997). Espumas de células abertas, com relativamente baixa resistência à passagem do ar, encontram melhor empregabilidade em aplicações de isolamento acústico, pois a energia sonora é absorvida principalmente pela fricção do ar em movimento nos poros interconectados (HUNG et al; 2014; HOPKINS, 2007; OKOROAFOR; FRISCH, 1995). Os principais parâmetros utilizados para caracterizar espumas utilizadas em isolamento acústico são coeficiente de absorção sonora e perda de transmissão sonora. Espumas para isolamento acústico são usadas em paredes, pisos e tetos residenciais e comerciais, salões de festas, estúdios, salas de gravação e locução, teatros, cinemas, entre outros ambientes (GOMES, 2015; HOPKINS, 2007).

Outra importante habilidade das espumas é a de absorver energia durante impacto. Essa habilidade é dependente do polímero base, densidade, geometria, comportamento tensão vs. deformação e magnitude da tensão aplicada. Espumas flexíveis absorvem parte da energia gerada pelo trabalho externo durante a deformação e a liberam após o impacto. No entanto, alguma energia é dissipada por histerese, devido ao fluxo viscoso do gás contido em células abertas e pela deformação do próprio polímero. Já a absorção de energia em espumas rígidas ocorre com pouca recuperação, de modo que a energia decorrente do impacto é utilizada para promover a ruptura das paredes celulares e, conseqüentemente, falha da espuma. Logo, espumas flexíveis podem ser empregadas em situações de múltiplos impactos, enquanto espumas rígidas não (EAVES, 2004; BIRD et al, 2018). Espumas para absorção de energia são amplamente utilizadas na indústria automobilística, no interior e exterior de automóveis, com o intuito de absorver

energia durante acidentes e proteger motorista e passageiros. Além disso, a presença de espumas no design do veículo traz a vantagem de diminuição de peso e, conseqüentemente, redução do consumo de combustível (SUH et al, 2000; SPIRK et al, 2018).

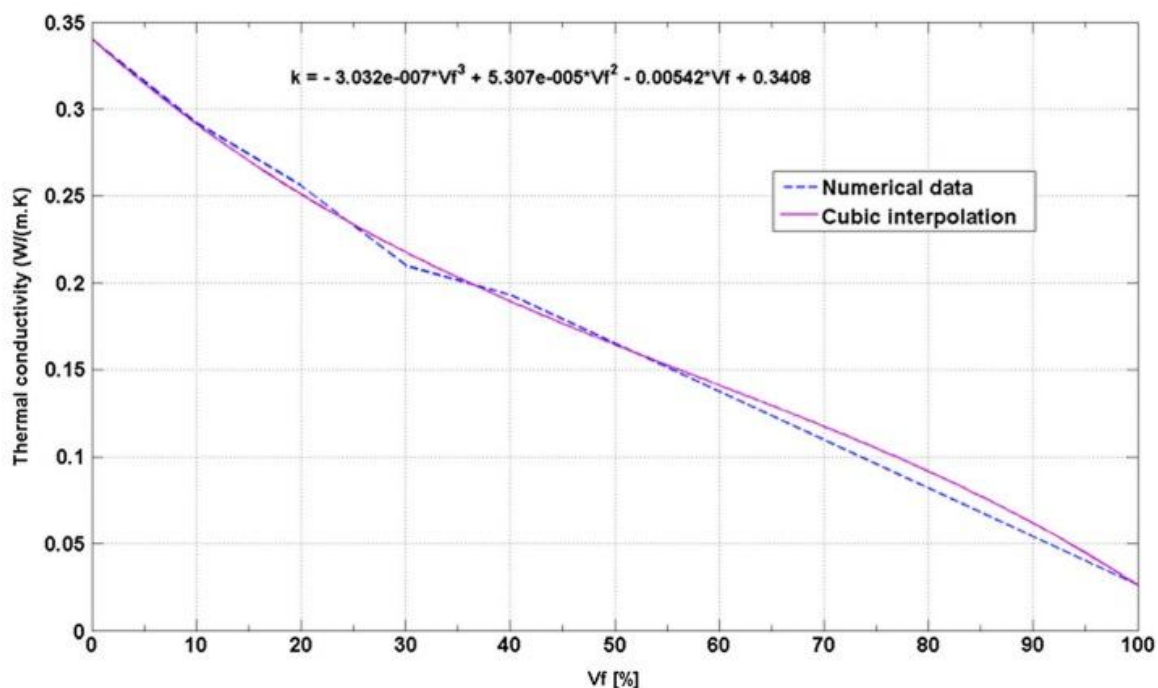
Espumas são também empregadas para isolamento térmico. Essa aplicação será melhor discutida a seguir.

### 3.1.3 ESPUMAS PARA ISOLAMENTO TÉRMICO

A transferência de calor é um fluxo natural e ininterrupto de energia que o ser humano, porém, na busca por conforto térmico, tenta há séculos minimizar por meio do isolamento. Além disso, o isolamento térmico promove a redução do consumo da energia utilizada para aquecer ou resfriar estruturas, o que atualmente é uma necessidade mediante a diminuição de reservas energéticas ao redor do mundo. Os principais materiais utilizados para essa aplicação são as espumas poliméricas, pois, comparadas a outros materiais isolantes, as espumas apresentam algumas vantagens, como baixo custo, elevada processabilidade e, claro, excelente performance (ASSÉKO et al, 2016; HU et al, 2018).

A condutividade térmica das espumas é governada por quatro fatores, são eles: condução de calor através do polímero sólido, condução de calor através do gás, convecção através das células e radiação através das paredes das células e vazios. A convecção, no entanto, só é considerada significativa em espumas com células de tamanhos elevados. Já a condução através do gás, devido à baixa condutividade térmica dos gases, é o fator de maior importância. A redução da densidade de uma espuma, ou seja, o aumento da fase gasosa no material, leva ao aumento de sua habilidade em ser um isolante térmico (OKOROAFOR; FRISCH, 1995; EAVES, 2004). Logo, o aumento da porosidade, leva a diminuição da condutividade térmica, como pode ser observado na Figura 2 (ASSÉKO et al, 2016).

**Figura 2: Condutividade térmica como função da porosidade de espuma polimérica**



$$\lambda_{\text{sólido}} = 0,34 \text{ W/m.K};$$

Vf = Porosidade da espuma polimérica;

$$\lambda_{\text{gás}} = 0,02963 \text{ W/m.K};$$

Fonte: ASSÉKO et al, 2016.

Enquanto espumas de células abertas são mais empregadas para isolamento acústico, espumas de células fechadas são mais indicadas para isolamento térmico, uma vez que o gás aprisionado nas células reduz a transmissão de calor através da estrutura. De fato, espumas de células fechadas apresentam condutividade térmica inferior a qualquer outro tipo convencional de isolamento sem a utilização de vácuo (GIBSON; ASHBY, 1997).

A principal espuma utilizada comercialmente para isolamento térmico é a espuma de poliuretano. Poliuretano é considerado um polímero muito versátil, pois pode ser produzido como espuma ou não, para uma enorme variedade de aplicações. No caso de espumas, as propriedades mecânicas, densidade, forma das células, grau de expansão, entre outras características, podem ser determinadas pela formulação e processo de fabricação (EAVES, 2004).

Espuma de poliuretano rígido de células fechadas é o tipo de espuma de poliuretano utilizada para isolamento térmico. A produção consiste na mistura dos ingredientes principais – polioli, isocianato e agente de expansão físico. O agente de expansão fica retido nas células e tem influência significativa sobre as propriedades da

espuma, em especial, sobre a condutividade térmica. Quando as espumas rígidas de poliuretano foram introduzidas na década de 50, experimentaram crescimento acelerado, uma vez que as espumas utilizadas na época, flexíveis e de células abertas, não possuíam resistência à penetração de água e ar/vapor, apresentando condutividade térmica de aproximadamente 32 mW/m.K a 10°C. Já as espumas rígidas de células fechadas, fabricadas com a utilização de gases de baixa condutividade térmica, passaram a apresentar condutividade de aproximadamente 17 mW/m.K a 10°C. Dessa forma, a espessura do isolamento poderia ser reduzida pela metade em relação às antigas espumas. Atualmente, o ajuste da formulação permitiu que valores de condutividade térmica em torno de 15 mW/m.K fossem atingidos. Como a retenção do gás de expansão é característica mandatória para a manutenção da propriedade de isolamento térmico, é necessário que o gás apresente baixa solubilidade e baixa difusividade no polímero da espuma e, além disso, possua inércia química (EAVES, 2004; OKOROAFOR; FRISCH, 1995).

As principais aplicações das espumas poliméricas como isolantes térmicos são na área de construção civil, como isolamento para paredes, pisos, tetos e tubulações, na área de transporte, como isolamento de caminhões refrigerados e tanques de gás liquefeito, em eletrodomésticos, como, por exemplo, no revestimento de geladeiras e, mais recentemente, em estruturas de veículos espaciais, como isolamento do tanque de combustível (EAVES, 2004; PAPADOPOULOS, 2005; BARRIOS; SCIVER, 2013). Na área de construção civil, as espumas podem também fazer parte de compósitos, como painéis sanduíche, que muitas vezes são usados em aplicações combinadas de isolamento térmico e acústico (HOPKINS, 2007; WU et al, 2018).

#### 3.1.4 POLIURETANO

A espuma de Poliuretano é a mais utilizada atualmente para fins de isolamento térmico. Poliuretano (PU) é um polímero, ou grupo de polímeros, utilizado para a confecção de vários utensílios plásticos, que forma um material sólido com textura muito similar à esponja ou espuma. O poliuretano engloba o que se pode chamar de plástico, mas sua capacidade não é tão restritiva.

Poliuretano é um material que proporciona alta resistência, flexível e durável, que se devidamente fabricado pode tomar o lugar de tinta, plástico (substituindo o plástico convencional, inclusive), algodão, borracha, e até mesmo metal, ou seja, o número de aplicações alcança níveis antes inimagináveis em praticamente todos os campos.

Dependendo da fabricação, poliuretano pode ser rígido como fibra de vidro ou mole como espuma estofados. Pode ainda ser pegajoso como cola ou elástico como borracha. Novamente deve-se dizer: O plástico está dentro do leque de possibilidades do poliuretano. Uma vantagem dos elastômeros de poliuretano com relação aos plásticos é que eles não são quebradiços. Muitos plásticos, particularmente os de alta dureza, tendem a trincarem ou quebrarem quando recebem impactos ou um carregamento. Poliuretanos enquanto elastômeros mantêm sua resistência ao impacto mesmo com altas durezas.

Poliuretanos tem memória elastomérica, isto é, eles podem ser tencionados mesmo com altas durezas a um alongamento significativo e retornaram a sua dimensão original. A maioria dos plásticos, uma vez tencionados após certo ponto, não retornarão à sua dimensão original, permanecendo esticados permanentemente.

Finalmente, plásticos não possuem alta resistência à abrasão como os poliuretanos. Uma terceira família de materiais que compete com poliuretano são os vários tipos de borracha natural e sintética.

### 3.1.5 ESPUMAS E O MEIO AMBIENTE

Apesar da boa performance apresentada em diversas áreas pelas espumas, muitos impactos ambientais estão relacionados ao ciclo de vida destes materiais. Três principais tópicos podem ser destacados: matéria-prima utilizada, gases de expansão empregados e descarte em fim de vida útil (VACHON, 2005; HOUSEL, 2004; OKOROAFOR; FRISCH, 1995).

Em relação à matéria-prima utilizada, assim como outros materiais plásticos convencionais, espumas são produzidas a partir de fonte não renovável, o petróleo. Esses materiais praticamente não se degradam e contribuem para o aquecimento global por meio das emissões de CO<sub>2</sub> associadas à energia utilizada no processo de fabricação. Logo, torna-se necessário encontrar novas técnicas de fabricação que utilizam produtos naturais renováveis e menos poluentes, como os óleos vegetais

(MONTEIRO et al, 2010; ZHANG; LUO, 2015). Diversos estudos têm sido realizados com esse objetivo e bioespumas estão sendo produzidas em sua maioria a partir da mistura de produtos vegetais e derivados do petróleo, reduzindo, portanto, o uso de matéria-prima derivada da indústria petroquímica. Alguns dos produtos vegetais utilizados na produção de bioespumas são soja, canola, palma, lignina e buriti (LUO et al, 2013; ZHANG; LUO, 2015; MONTEIRO et al, 2010).

Já em relação aos agentes e gases de expansão utilizados na fabricação de espumas, muitas mudanças ocorreram nas últimas décadas, principalmente por questões ambientais. Desde o desenvolvimento inicial do processo, o gás clorofluorcarbono ou CFC foi utilizado como agente de expansão, devido a seu baixo custo, adequação técnica e facilidade de estocagem. Essas características fizeram com que o uso desse gás, na indústria de espumas e outras, crescesse vertiginosamente e de forma indiscriminada. Durante longas décadas, o impacto ambiental causado pelo uso desse gás não era nem sequer conhecido, até que, em 1974, resultados de uma pesquisa demonstraram que o CFC presente na atmosfera destrói a camada de ozônio de forma irreversível. Além do efeito do aquecimento global, a ausência da camada de ozônio está relacionada à diminuição da imunidade do corpo humano, câncer de pele e desequilíbrio dos ecossistemas marinhos e terrestres. Dessa forma, em 1987, o Protocolo de Montreal estabeleceu a diminuição do uso deste gás, visando sua futura eliminação de todos os processos produtivos (VACHON, 2005).

Para substituir o CFC, a indústria primeiramente apostou no uso do hidroclorofluorcarbono ou HCFC. Esse gás é bem menos nocivo à camada de ozônio, mas também possui potencial destruidor e, por isso, já está em processo de eliminação. Uma comparação entre os efeitos causados por gases CFC e HCFC está mostrada na Tabela 3. Já o hidrofluorcarbono ou HFC é tido como o melhor substituto, uma vez que por não possuir cloro em sua composição, não ameaça a integridade da camada de ozônio (VACHON, 2005). Outro gás de expansão utilizado como substituto do CFC e HCFC é o CO<sub>2</sub> que, apesar de apresentar certos efeitos nocivos à camada de ozônio, não se compara em potencial destruidor aos antigos (GROLIER; RANDZIO, 2012).

**Tabela 3: Potencial nocivo dos gases CFC e HCFC**

Gás	Fórmula	Potencial destruidor da camada de ozônio	Potencial causador do aquecimento global (100 anos)
CFC-11	$\text{CFCl}_3$	1,0	4600
CFC-12	$\text{CF}_2\text{Cl}_2$	1,0	10600
CFC-113	$\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$	0,8	6000
CFC-114	$\text{C}_2\text{F}_4\text{Cl}_2$	1,0	9800
CFC-115	$\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$	0,6	7200
HCFC-22	$\text{CHF}_2\text{Cl}$	0,055	1700
HCFC-123	$\text{CF}_3\text{CHCl}_2$	0,02-0,06	120
HCFC-124	$\text{CF}_3\text{CHClF}$	0,02-0,04	620
HCFC-141b	$\text{CH}_3\text{CFCl}_2$	0,11	700
HCFC-142b	$\text{CH}_3\text{CF}_2\text{Cl}$	0,065	2400
HCFC-225ca	$\text{CF}_3\text{CF}_2\text{CHCl}$	0,025	180
HCFC-225cb	$\text{CClF}_2\text{CF}_2\text{CHClF}$	0,033	620

Fonte: VACHON, 2005 (adaptada).

O fim da vida útil de espumas poliméricas pode estar relacionado a diferentes situações. Espumas podem ir para lixões, aterros, podem ser incineradas ou recicladas (HOUSEL, 2004).

Em lixões e aterros, esses materiais não apresentam potencial de contaminação do solo ou água, pois, como mencionado, a degradação praticamente não ocorre. No entanto, justamente pela ausência do processo de degradação, espumas podem ficar no meio ambiente por séculos, poluindo oceanos, prejudicando a vida marinha e, principalmente em países subdesenvolvidos, causando entupimento de bueiros e alagamentos quando não descartadas corretamente (HOUSEL, 2004; JAMBECK et al, 2015).

A incineração é uma prática bastante recomendada, pois é segura e viável para recuperação de energia, mas a reciclagem, quando possível, é ambientalmente a melhor opção para lidar com esses materiais no fim de vida. Nesse caso, resíduos de espumas podem ser utilizados para fazer novos produtos (HOUSEL, 2004). Uma possibilidade é recuperar espumas por decomposição química. O poliuretano, por exemplo, pode ser decomposto via glicólise, o que permite a obtenção de matéria-prima reciclada capaz de retornar ao processo produtivo sem danos à qualidade final do produto (BENES et al, 2007). Outro método consiste em triturar a sucata de espuma em pó fino e introduzi-lo novamente ao processo de produção de novas espumas, reduzindo a necessidade da utilização de matéria-prima virgem (HOUSEL, 2004). Na indústria automotiva, setor no qual espumas são utilizadas em larga escala, os procedimentos mais adotados em relação aos materiais plásticos,

incluindo espumas de poliuretano, são a reutilização, como por exemplo, dos bancos dos veículos em carros novos ou na confecção de outros tipos de cadeiras, a incineração para recuperação energética ou encaminhamento para aterros sanitários controlados (CASTRO, 2012).

Além dos três principais tópicos ambientais citados, outra preocupação relacionada a produção de espumas é a liberação de vapores tóxicos ao ser humano. No caso da espuma de poliuretano, vapor de isocianato e outros químicos podem ser perigosos para os trabalhadores das plantas e para a população que vive ao redor dessas indústrias. A solução para os trabalhadores é o uso de máscaras de proteção respiratórias, enquanto que a qualidade do ar da vizinhança deve ser mantida pelo uso de filtros e tecnologias que coletam e tratam os gases nocivos à saúde humana (HOUSEL, 2004).

### **3.2 SELEÇÃO DE MATERIAIS**

A seleção de materiais é parte fundamental de um projeto, o qual pode ser definido como o processo de traduzir uma nova ideia ou uma necessidade do mercado, em informações detalhadas que tornam possível a fabricação de um produto. Dessa forma, a escolha do material é normalmente ditada pelo projeto, mas existem situações em que o material e suas propriedades são o que sugerem a aplicação (ASHBY, 2012; SERAFINI et al, 2015).

Devido ao avanço na área de engenharia de materiais, o projetista não deve se limitar a escolhas tradicionais, pois corre-se o risco de boas e novas alternativas serem perdidas. No entanto, a enorme quantidade de materiais disponíveis atualmente faz com que a seleção seja muito complexa e, muitas vezes, incerta. Logo, o desenvolvimento de um processo para a seleção de materiais é extremamente necessário para auxiliar a tomada de decisão, guiando-a para a melhor escolha dentro dos requisitos, objetivos e recursos definidos pelo projeto (ASHBY, 2012; FARAG, 2002).

Nesse contexto, diversas estratégias de seleção de materiais foram desenvolvidas (FARAG, 2002). A estratégia desenvolvida por Ashby (2012) é amplamente conhecida ao redor do mundo e conta com quatro etapas:



- Tradução: convertem-se os requisitos do projeto em restrições e objetivos que podem ser aplicados aos bancos de dados de materiais. Deve-se partir de todos os materiais, sem exclusões, de modo que a possibilidade de eliminar um bom candidato não exista;
- Triagem: elimina-se os materiais que não podem cumprir os requisitos estabelecidos em projeto. Nessa etapa, definem-se os limites de atributos do projeto;
- Classificação: avalia-se a capacidade de cada material aprovado na triagem, executar a função requerida. Materiais de baixo rendimento devem ser desclassificados;
- Documentação: deve-se obter uma descrição detalhada de uma pequena lista dos materiais aprovados na etapa anterior. Nesse ponto, é importante coletar dados fornecidos pelo próprio fabricante e, se a aplicação for crítica, deve-se realizar ensaios próprios.

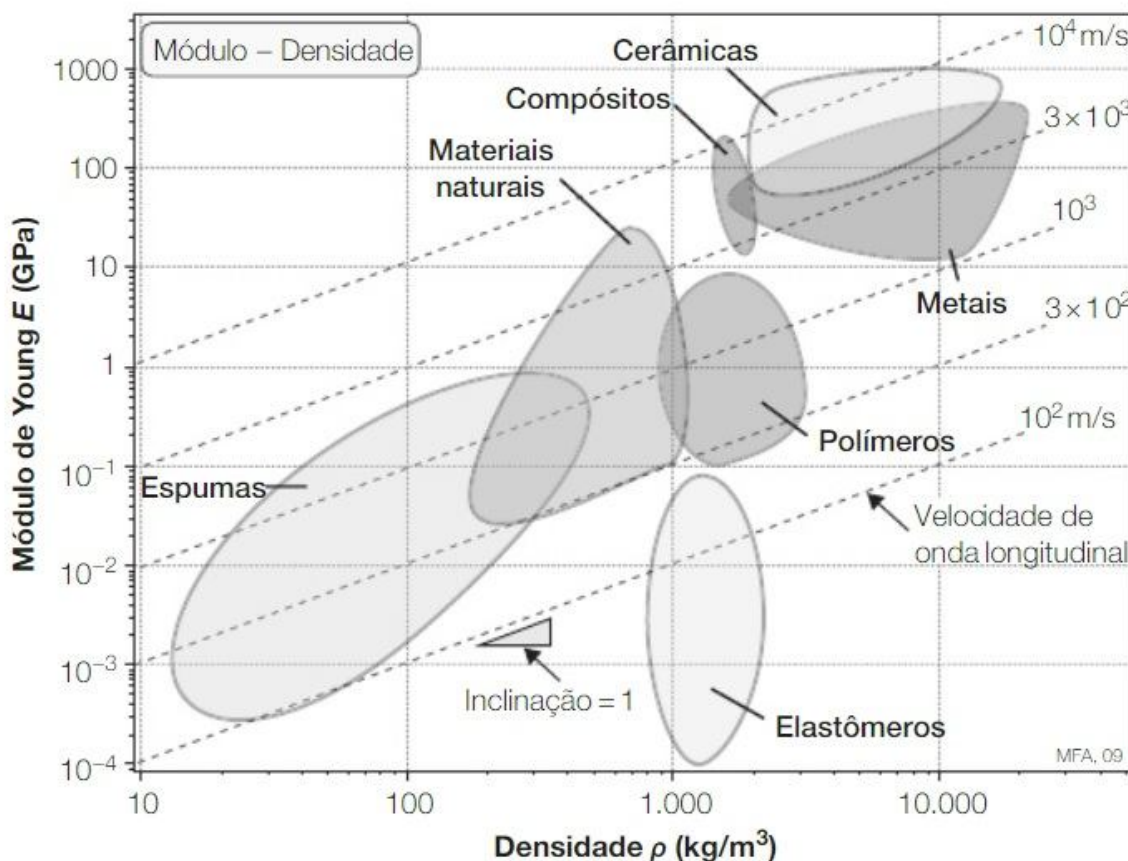
A escolha final do material geralmente baseia-se em condições locais, como na disponibilidade de fornecedores na região, de equipamentos, legislação regional, entre outros fatores (ASHBY, 2012).

Restrições do projeto definem limites de atributo. Já os objetivos definem os índices de material, para os quais normalmente procuram-se valores extremos, como a minimização da massa. Quando o objetivo não está ligado a uma restrição, o índice de material é uma simples propriedade. Por exemplo, necessita-se de um material que tenha alta resistência ao desgaste, logo, o índice do material deverá ser a dureza. No entanto, quando o objetivo está ligado a uma restrição, o índice torna-se um grupo de propriedades. Em sua forma mais simples, o índice é geralmente uma fração, tendo no numerador a propriedade que se quer maximizar e no denominador, a propriedade que se quer minimizar. A determinação dos limites de atributo e índices de material são importantes estratégias e ferramentas utilizadas na seleção de materiais (ASHBY; 2012).

Outro importante aliado no processo de seleção são os Diagramas de Propriedades de Materiais. Como visto, o início do processo de escolha não deve se basear em um grupo de materiais e, sim, em um grupo de propriedades que se deseja obter. Logo, os diagramas trazem informações importantes para a seleção, pois relacionam

de forma compacta e de fácil visualização, propriedades de interesse (ASHBY, 2012). Um diagrama de propriedades relacionando módulo de Young ( $E$ ) e densidade ( $\rho$ ) está mostrado na Figura 3.

**Figura 3: Diagrama de propriedades de materiais – Módulo de Young x Densidade**



Fonte: ASHBY, 2012.

Devido às suas propriedades diferenciadas, espumas aparecem no diagrama de propriedades de materiais como um grupo distinto do grupo dos polímeros. Como visto e agora ilustrado pelo diagrama, espumas são materiais leves, ou seja, de baixa densidade, e com módulo de Young ou módulo de elasticidade variando de baixo a médio, o que corresponde ao fato da espuma ser flexível, semi-flexível ou rígida (LEE, 2004; OKOROAFOR; FRISCH, 1995).

De forma geral, projetos apresentam múltiplas restrições, como por exemplo dureza, resistência ao escoamento e rigidez (FARAG, 2002; ASHBY, 2012). Nesse caso, quando há apenas um objetivo, como redução de peso, o Método da Restrição Ativa pode ser aplicado com sucesso. Primeiramente, deve ser feita a identificação da restrição ativa, a qual servirá de base para o projeto. Aplicam-se as demais

restrições em sequência, rejeitando em cada etapa os materiais que não as cumprem. Desse modo, de um grupo final de materiais que cumprem todas as restrições, chega-se ao material que maximiza o objetivo (ASHBY, 2012).

Outra situação ocorre quando há múltiplas restrições e objetivos conflitantes. Os objetivos mais comuns em projeto são (ASHBY, 2012):

- Minimizar massa;
- Minimizar volume;
- Minimizar custo;
- Minimizar impacto ambiental.

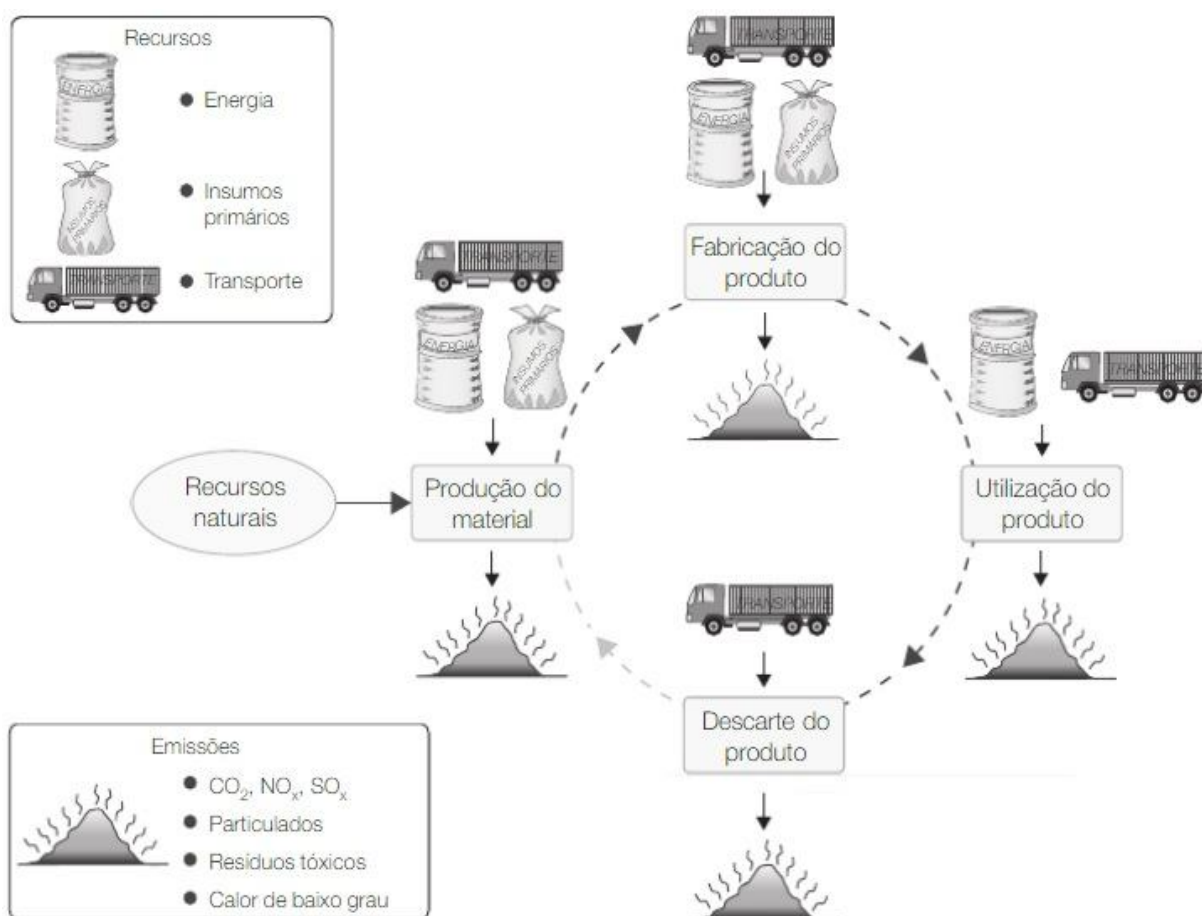
No entanto, a escolha que otimiza um objetivo normalmente não fará o mesmo pelos outros. Logo, a melhor escolha não é a que otimiza nenhum deles e, sim, a que os mantém mais próximos de seus ótimos quanto possível. Nesse caso, diferentes soluções equivalentemente satisfatórias podem ser possíveis. Isso é ilustrado pelo fato de que componentes que exercem funções similares são muitas vezes produzidos com diferentes materiais e por diferentes formas de processamento (ASHBY, 2012; FARAG, 2002).

### 3.2.1 SELEÇÃO DE MATERIAIS VISANDO REDUÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS

Nas últimas décadas, a introdução do conceito de desenvolvimento sustentável tem feito com que a seleção de um material seja baseada também em aspectos ambientais. É importante pensar no sistema de produção como um sistema integrado, no qual fatores como uso de água, energia e segurança ambiental sejam levados em consideração em todas as etapas do processo (BALETA et al, 2019; LAMBRECHTS et al, 2019). Dessa forma, o *eco-design* começa com a escolha ambientalmente consciente do material. Essa é a etapa na qual o projetista tem maior participação na redução de impactos ambientais, no entanto, um profissional bem informado também pode oferecer alternativas de baixo impacto para as demais etapas do processo, como para a produção e distribuição (VEZZOLI; MANZINI, 2008).

A seleção de materiais dentro do conceito de *eco-design* deve observar todo o ciclo de vida de um produto, o qual está ilustrado na Figura 4. Escolhas acertadas devem ser feitas em relação à tecnologia de transformação da matéria-prima, design que use menos recursos, como energia e material, e forma de distribuição e transporte durante o processo de produção. Além disso, a seleção de materiais deve ser orientada para que no fim da vida útil do produto, os riscos de contaminação do ambiente sejam minimizados e a chance de reciclagem seja aumentada (VEZZOLI; MANZINI, 2008; ASHBY, 2012).

**Figura 4: Ciclo de vida esquemático de um produto**

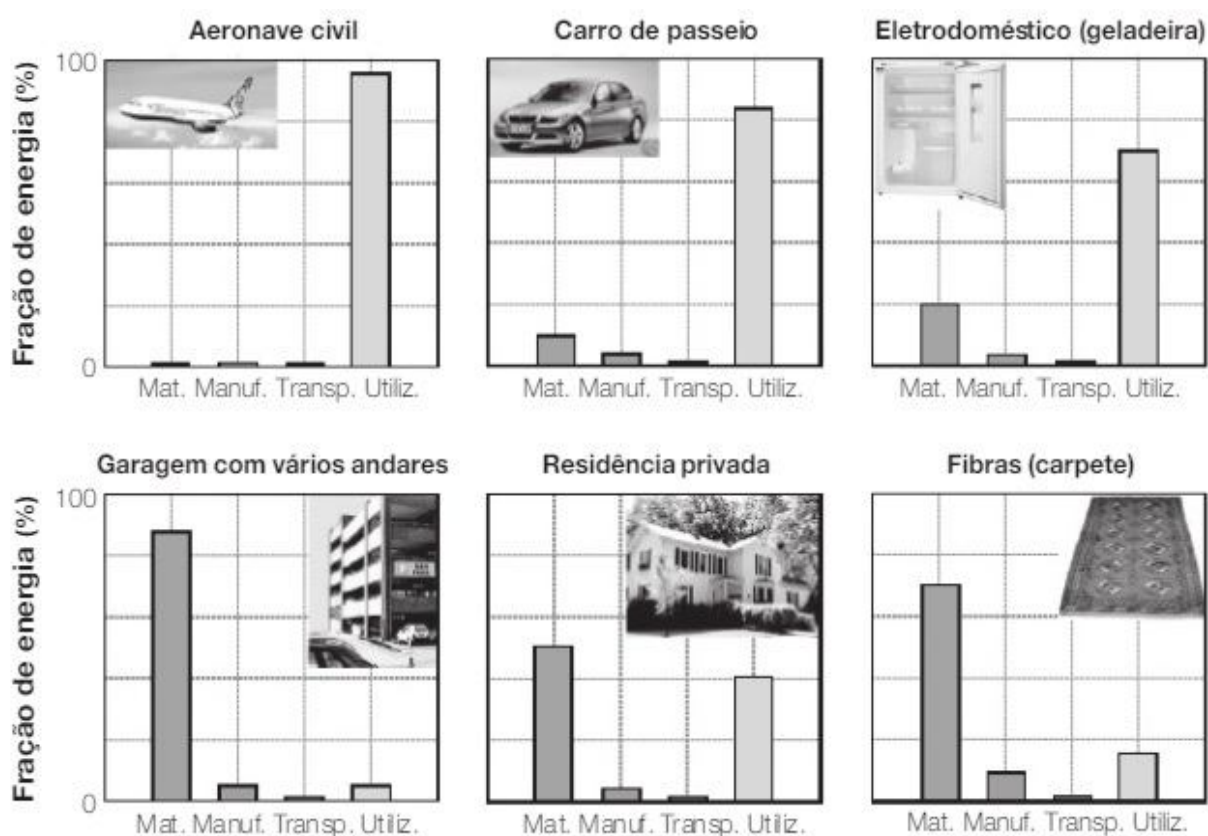


Fonte: ASHBY, 2012.

Como observado, o ciclo de vida de um produto pode ser dividido em quatro etapas: produção, fabricação, utilização e descarte. Para a seleção visando redução de impactos ambientais, é importante reunir dados e definir qual dessas etapas gera maior impacto ambiental. Baseando-se em consumo de energia ao longo do ciclo de vida, por exemplo, de modo geral, apenas uma das etapas costuma ser responsável por 80% ou mais do gasto energético total, como está mostrado na Figura 5.

Portanto, para que grandes mudanças ocorram é necessário ter essa fase como alvo para implementação de novas práticas (ASHBY, 2012). Além disso, sabe-se que todo material terá algum impacto ambiental, logo, é importante analisar os custos-benefícios de cada um. Alguns podem gerar mais emissões durante a extração da matéria-prima, mas durante o uso apresentarem vida útil prolongada em relação a outros materiais candidatos à mesma função. Essa análise cabe ao projetista e para auxiliá-lo na tomada de decisão visando o *eco-design*, atributos ecológicos ou eco-atributos dos materiais podem ser utilizados (VEZZOLI; MANZINI, 2008; ASHBY, 2012).

**Figura 5: Energia consumida em cada etapa do ciclo de vida de variados produtos**



Fonte: ASHBY, 2012.

Eco-atributos são indicadores que trazem informações e características ambientais dos materiais, desde a produção até o fim de vida útil. Dentre eles podem ser citados a energia utilizada na produção, emissão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), percentual de reciclabilidade, dentre outros. Esses eco-atributos podem ser relacionados a propriedades mecânicas, químicas, térmicas, óticas e magnéticas, em diagramas de propriedades de materiais. Dessa forma, torna-se possível

selecionar os materiais que possuem as melhores propriedades técnicas para a aplicação, produzindo, no entanto, os menores impactos ambientais. Esses diagramas podem ser construídos por meio do *software* CES EduPack (ASHBY, 2012).

O *software Cambridge Engineering Selector* (CES) EduPack é uma ferramenta de seleção de materiais que foi primeiramente utilizada na Universidade de Birmingham. Esse *software* possui uma base de dados compilada pelo Professor Michael Ashby e colaboradores e contém informações sobre todas as classes de materiais e processos, sendo utilizado atualmente em diversas universidades ao redor do mundo. Nele, é possível construir diagramas de propriedades e aplicar metodologias que levarão a melhor escolha de um material. Em relação à seleção de materiais voltada para o *eco-design*, o *software* contém informações sobre substâncias restritas e materiais críticos, uso de energia, pegadas de carbono, uso de água, dentre outras, auxiliando na escolha responsável pela geração de menores impactos ambientais (CES EDUPACK, 2019; ABDUL-REHMAN; DAVIS, 2009).

### 3.2.2 SELEÇÃO ECOLÓGICA DE ESPUMAS PARA ISOLAMENTO TÉRMICO

A principal propriedade avaliada em espumas utilizadas para isolamento térmico é a condutividade térmica. A condutividade térmica ( $\lambda$ ) é definida pelo fluxo de calor em estado estacionário que passa através de uma área unitária de um material homogêneo, com espessura também unitária, devido a variação unitária de temperatura entre as extremidades longitudinais e é dado por (ASDRUBALI et al, 2015):

$$\lambda = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \times \frac{L}{A\Delta T} \quad (1)$$

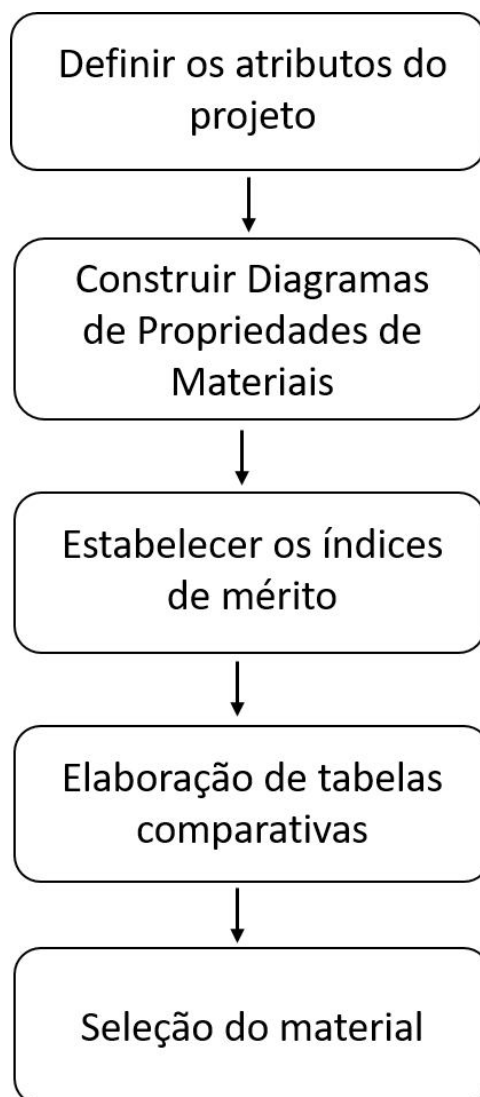
onde,  $\Delta Q$  é a quantidade de calor transmitida por intervalo de tempo  $\Delta t$  através de um material de comprimento  $L$ , na direção normal à seção reta de área  $A$ , como a diferença de temperaturas  $\Delta T$  impostas às extremidades longitudinais. A condutividade térmica é expressa em W/m.K. Um material é normalmente considerado isolante térmico se sua condutividade térmica for inferior a 0,07 W/m.K (ASDRUBALI et al, 2015).

No entanto, para a seleção baseada no *eco-design*, a condutividade térmica deverá ser analisada em conjunto a indicadores que meçam a geração de impactos ambientais causados por cada material, os já mencionados eco-atributos. Dessa forma, torna-se possível encontrar o material que seja apto a esse tipo de aplicação e ao mesmo tempo gere o menor impacto ambiental possível dentre as opções existentes.

#### 4. METODOLOGIA

A metodologia proposta buscou selecionar a espuma para isolamento térmico que apresentasse os menores impactos ambientais. O fluxograma com as principais etapas realizadas está mostrado na Figura 6.

**Figura 6: Etapas de desenvolvimento do trabalho**



Fonte: Próprio Autor.

O processo de seleção da espuma foi realizado a partir do método de seleção de materiais proposto pelo Professor Michael Ashby, utilizando o software CES EduPack 2014 (licença estudantil).

Primeiramente, admitiu-se que a espuma para isolamento térmico é utilizada para cobrir superfícies. Dessa forma, o suporte de carga não é um requisito para este tipo



de aplicação, ou seja, propriedades relacionadas à resistência mecânica, como o módulo de elasticidade, não foram analisadas. Custos também não foram utilizados como base para essa análise, embora faixas de custos tenham sido indicadas como análise adicional.

Os atributos ecológicos definidos como base para análise foram:

- Emissão de CO<sub>2</sub> na produção primária ou pegadas de CO<sub>2</sub>;
- Uso de água na produção primária;
- Emissão de CO<sub>2</sub> na combustão;
- Calor de combustão.

Para cada eco-atributo foram elaborados diagramas de propriedades dos materiais, por meio do software CES EduPack 2014, em função da condutividade térmica, definida como a propriedade de maior relevância para a aplicação proposta. Como visto, um material é considerado isolante térmico se possuir condutividade térmica inferior a 0,07 W/m.K (ou 0,07 W/m.°C), logo, foram considerados apenas os materiais que apresentaram condutividade térmica inferior a esse valor. A base de dados utilizada foi a “nível 3 – sustentabilidade”, que traz informações sobre eco-propriedades de 3905 diferentes materiais e 230 processos (CES EDUPACK, 2014). Uma vez que o objetivo deste estudo é a seleção de espumas, o universo de materiais no software foi limitado ao universo das espumas.

Índices de Mérito (IM) foram estabelecidos em cada etapa da análise, por meio de equações matemáticas, de forma a buscar uma relação proporcional entre os atributos e a performance do material dentro dos pré-requisitos do projeto.

A etapa seguinte, consistiu na classificação dos materiais encontrados. Por meio dos diagramas e dos índices de mérito calculados, foi estabelecida uma lista dos dez melhores materiais para cada combinação de atributos. Os materiais selecionados foram tratados como candidatos finais para esta seleção.

Por fim, foi realizada a soma de todos os valores de índices de mérito encontrados para todas as espumas presentes nas análises. O material que apresentou o maior valor da soma dos índices de mérito foi apontado como o mais adequado aos requisitos do projeto. Materiais com desempenho superior ao da espuma de poliuretano, mais utilizada para isolamento térmico, também foram considerados

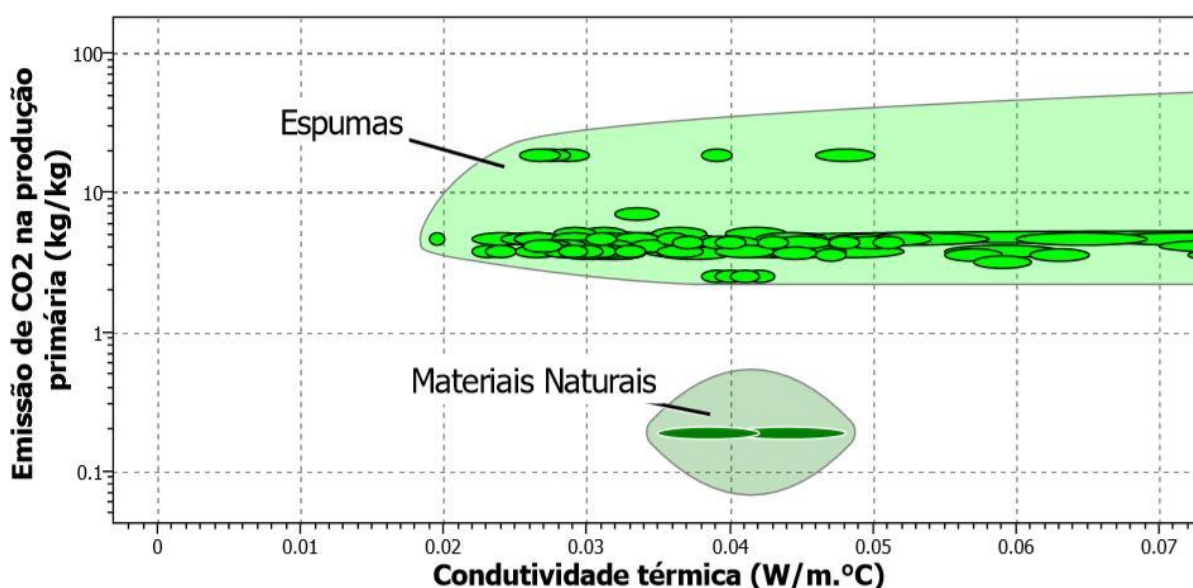
como possíveis alternativas. Todos os materiais que não fossem espumas poliméricas foram descartados, pois o projeto estudou a aplicação de espumas poliméricas para isolamento térmico, de modo que espumas metálicas ou cerâmicas, por exemplo, alterariam por completo a forma de instalação técnica desses materiais.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> NA PRODUÇÃO PRIMÁRIA

Emissão ou pegadas de CO<sub>2</sub> na produção primária foi o primeiro eco-atributo analisado, uma vez que o CO<sub>2</sub> emitido no processo de fabricação está fortemente relacionado ao efeito de aquecimento global (ZHANG; LUO, 2015). O diagrama de propriedades de materiais foi construído em função da emissão de CO<sub>2</sub> na produção primária (kg/kg) pela condutividade térmica (W/m.°C) e está mostrado na Figura 7. Como mencionado, o universo de materiais foi limitado ao universo das espumas e apenas foram considerados os materiais que apresentaram condutividade térmica inferior a 0,07 W/m.°C.

**Figura 7: Diagrama da emissão de CO<sub>2</sub> na produção primária em função da condutividade térmica para o universo das espumas**



Fonte: Dados obtidos no CES EduPack, 2014; Próprio Autor, 2019.

O objetivo com a construção desse diagrama foi identificar as dez espumas que apresentavam de forma simultânea as menores emissões de CO<sub>2</sub> e as menores condutividades térmicas. Para isso, o primeiro Índice de Mérito (IM1) foi determinado. Para que a relação entre IM1 e o desempenho do material fosse proporcional, obteve-se:

$$\mathfrak{S}1 = \frac{1}{\text{condutividade térmica} \times \text{emissão de CO}_2 \text{ na produção}} \quad (2)$$

Logo, as dez espumas poliméricas que apresentaram os maiores valores para IM1 foram classificadas, conforme está mostrado na Tabela 4. Os valores da condutividade térmica e emissão de CO<sub>2</sub> são as médias aritméticas dos valores fornecidos pelo software.

**Tabela 4: Classificação das espumas de acordo com o índice de Mérito 1 (IM1)**

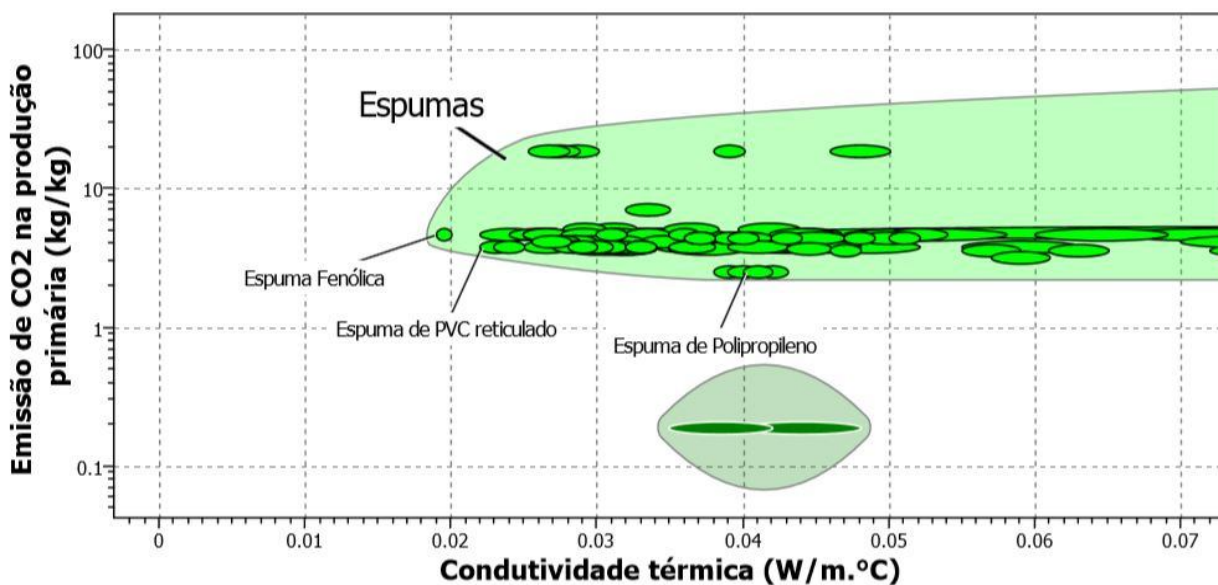
Classificação	Material	Condutividade térmica (W/m.°C)	Emissão de CO <sub>2</sub> na produção (kg/kg)	IM1
1º	Espuma de PVC reticulado	0,0230	3,88	11,2057
2º	Espuma Fenólica	0,0195	4,72	10,8648
3º	Espuma de Polipropileno	0,0390	2,58	9,9384
4º	Espuma de Estireno Acrilonitrila	0,0269	4,16	8,9529
5º	Espuma de Polimetacrilamida	0,0300	3,74	8,9127
6º	Espuma de Poliuretano	0,0240	4,81	8,6625
7º	Espuma de Poliestireno	0,0330	4,25	7,1301
8º	Espuma de Tereftalato de Polietileno	0,0292	5,15	6,6612
9º	Espuma de Polietileno de baixa densidade	0,0370	4,51	5,9927
10º	Espuma de Polietileno de alta densidade	0,0470	3,61	5,8938

Fonte: Dados obtidos no CES EduPack, 2014; Próprio Autor, 2019.

No diagrama da Figura 8, estão mostradas as três espumas melhores classificadas de acordo com a análise feita. Nota-se que essas espumas estão em posições limite à esquerda e abaixo. Isso ocorre justamente pelo fato desses materiais apresentarem tanto baixa condutividade térmica, como baixa emissão de CO<sub>2</sub> na produção primária. Outro fato a ser considerado é a classificação da espuma de poliuretano, material mais utilizado para a aplicação de isolamento térmico. Como observa-se na tabela anterior, esse material ficou classificado em 6º lugar. A análise ainda permite destacar que tanto a espuma de PVC reticulado, quanto a espuma

fenólica apresentaram melhores performances do que a espuma de poliuretano nos dois atributos analisados.

**Figura 8: Diagrama da emissão de CO<sub>2</sub> na produção primária em função da condutividade térmica com foco no IM1**

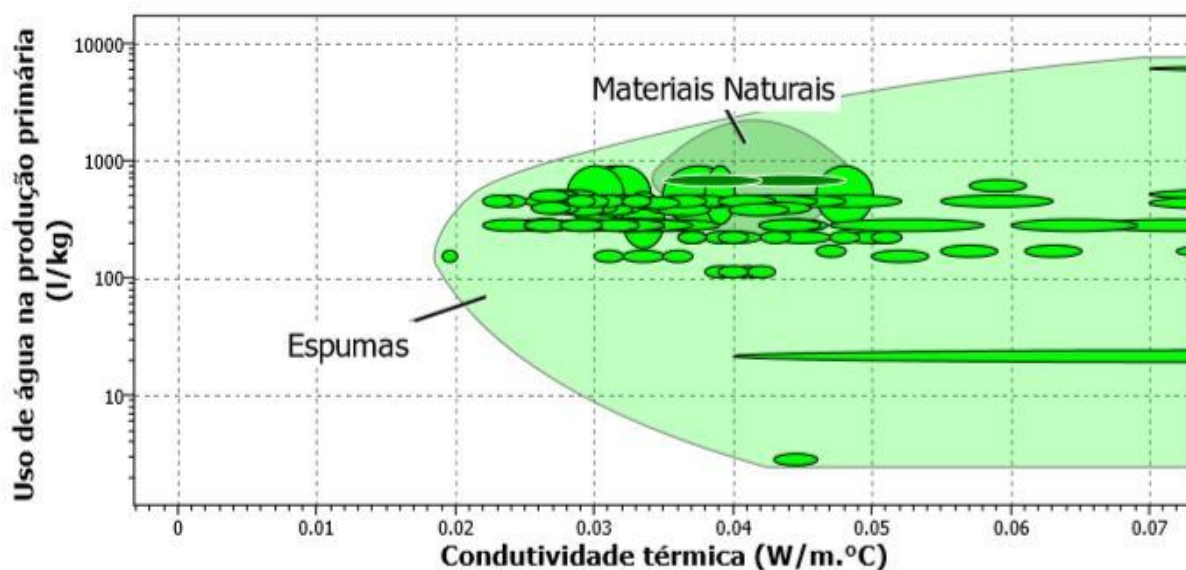


Fonte: Dados obtidos no CES EduPack, 2014; Próprio Autor, 2019.

## 5.2 USO DE ÁGUA NA PRODUÇÃO PRIMÁRIA

O segundo eco-atributo estudado em função da condutividade térmica foi o uso de água na produção primária. Dessa forma, o diagrama de propriedades de materiais foi construído com base nesses dois parâmetros e está mostrado na Figura 9.

**Figura 9: Diagrama do uso de água na produção primária em função da condutividade térmica para o universo das espumas**



Fonte: Diagrama construído no software CES EduPack, 2019.

Os critérios utilizados para a construção do diagrama anterior foram os estabelecidos na metodologia. Para identificar as dez espumas que apresentavam tanto as menores condutividades térmicas, como os menores valores de uso de água na produção primária, estabeleceu-se o Índice de Mérito 2 (IM2). Como desejava-se que IM2 fosse proporcional ao desempenho do material, obteve-se:

$$\Im 2 = \frac{1}{\text{condutividade térmica} \times \text{uso de água}} \quad (3)$$

Com base em IM2, a classificação das espumas foi feita de forma decrescente e está mostrada na Tabela 5. Os valores da condutividade térmica e uso de água são as médias aritméticas dos valores fornecidos pelo software.

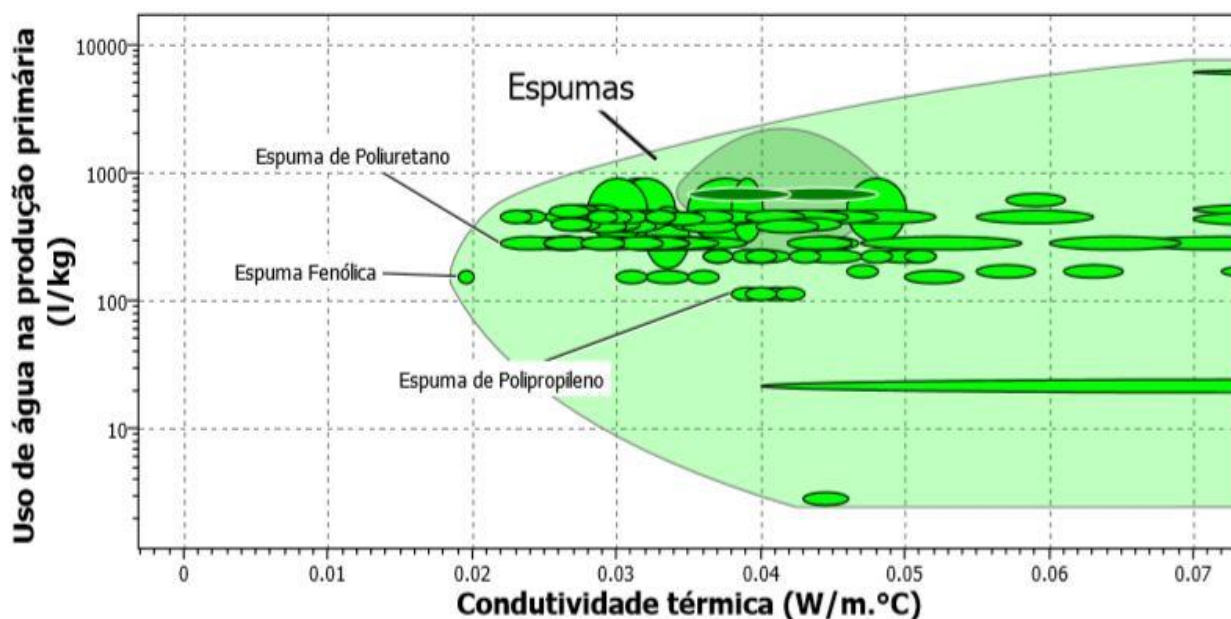
**Tabela 5: Classificação das espumas de acordo com o índice de Mérito 2 (IM2)**

Classificação	Material	Condutividade térmica (W/m.°C)	Uso de água na produção (L/kg)	IM2
1º	Espuma Fenólica	0,0195	156	0,3287
2º	Espuma de Polipropileno	0,0390	118	0,2173
3º	Espuma de Poliuretano	0,0240	295	0,1412
4º	Espuma de Polietileno de alta densidade	0,0470	175	0,1216
5º	Espuma de Polietileno de baixa densidade	0,0370	228	0,1185
6º	Espuma de PVC reticulado	0,0230	459	0,0947
7º	Espuma de Estireno Acrilonitrila	0,0269	406	0,0917
8º	Espuma de Tereftalato de Polietileno	0,0292	399	0,0860
9º	Espuma de Melamina	0,0335	363	0,0822
10º	Espuma de Poliéteramida	0,0267	516	0,0727

Fonte: Dados obtidos no CES EduPack, 2014; Próprio Autor, 2019.

Com base na tabela anterior, observa-se que as espumas fenólica e de polipropileno aparecem novamente bem classificadas. Dessa forma, de acordo com as duas primeiras análises, essas espumas são candidatas promissoras ao objetivo proposto. A espuma de PVC reticulado, que na primeira análise aparece em primeiro lugar, agora aparece em sexto, uma vez que apresentou elevado consumo de água na produção primária do material. Já a espuma de poliuretano possui o quinto menor consumo de água, porém, por possuir baixa condutividade térmica, este material apresentou o terceiro maior índice de mérito. As três espumas melhores classificadas nessa análise estão mostradas na Figura 10.

Figura 10: Diagrama do uso de água na produção primária em função da condutividade térmica com foco no IM2



Fonte: Dados obtidos no CES EduPack, 2014; Próprio Autor, 2019.

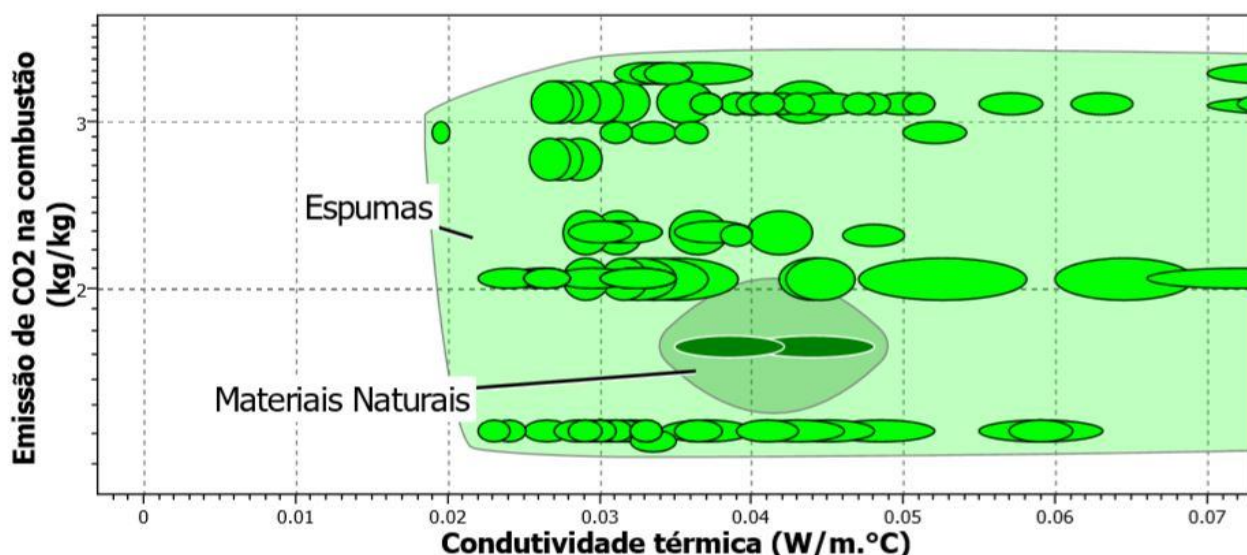
### 5.3 EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> NA COMBUSTÃO

Visto que dados sobre reciclabilidade não estavam disponíveis para grande parte das espumas estudadas, este projeto concentrou-se na avaliação da combustão para analisar estes materiais em fim de vida útil. A combustão ou queima de espumas plásticas pode ser utilizada com sucesso para recuperação energética e diminuição do volume de material direcionado a aterros sanitários e lixões, no entanto, é preferível que esta queima gere a menor quantidade de gases poluentes possível, como o CO<sub>2</sub>, minimizando, assim, os efeitos da destruição da camada de ozônio e do aquecimento global (GONÇALVES, 2007). Logo, o terceiro eco-atributo estabelecido foi a emissão de CO<sub>2</sub> na combustão. Dessa forma, assim como para os dois eco-atributos anteriormente estudados, este parâmetro foi analisado em conjunto com a condutividade térmica, por meio do diagrama de propriedades de materiais apresentado na Figura 11. Com base nessa análise, as melhores espumas foram aquelas que apresentaram de forma conjunta os menores valores de emissão de CO<sub>2</sub> na combustão e de condutividade térmica, pois, como destacado, quanto menor a condutividade térmica do material, melhor é sua performance como isolante



térmico. Novamente, a condutividade térmica foi limitada a 0,07 W/m.°C e o universo de materiais foi limitado ao universo das espumas.

**Figura 11: Diagrama da emissão de CO<sub>2</sub> na combustão em função da condutividade térmica para o universo das espumas**



Fonte: Dados obtidos no CES EduPack, 2014; Próprio Autor, 2019.

Para realizar a classificação das dez melhores espumas, o índice de Mérito 3 (IM3) foi estabelecido. Como dito, desejava-se que os valores de condutividade térmica e emissão de CO<sub>2</sub> na combustão fossem os menores possíveis e para que o IM3 fosse proporcional à performance do material, a equação definida assumiu o formato mostrado a seguir:

$$\Im 3 = \frac{1}{\text{condutividade térmica} \times \text{emissão de CO}_2 \text{ na combustão}} \quad (4)$$

A classificação com base no IM3 está mostrada na Tabela 6. Os valores de condutividade térmica (W/m.°C) e emissão de CO<sub>2</sub> na combustão (kg/kg) são as médias aritméticas dos valores fornecidos pelo software. Observa-se que a espuma de PVC reticulado, assim como na primeira análise, aparece na primeira colocação, ou seja, apresentou tanto no primeiro estudo, como nesse, a melhor combinação das propriedades analisadas. Já a espuma de melamina, apesar de não possuir condutividade térmica tão baixa quanto outras espumas, nesse caso apresentou a menor emissão de CO<sub>2</sub> na combustão dentre as espumas estudadas e, por isso, está classificada na segunda colocação. A espuma de poliuretano aparece na

terceira colocação tanto nessa, como na análise anterior. A espuma fenólica que nas análises anteriores ficou classificada em segundo e em primeiro lugar, dessa vez aparece em quarto, não deixando de ser importante candidata à aplicação proposta. Já a espuma de polipropileno, que apareceu bem classificada nas análises anteriores, não está entre as dez melhores espumas de acordo com este índice de mérito, uma vez que apresentou IM3 igual a 8,1659.

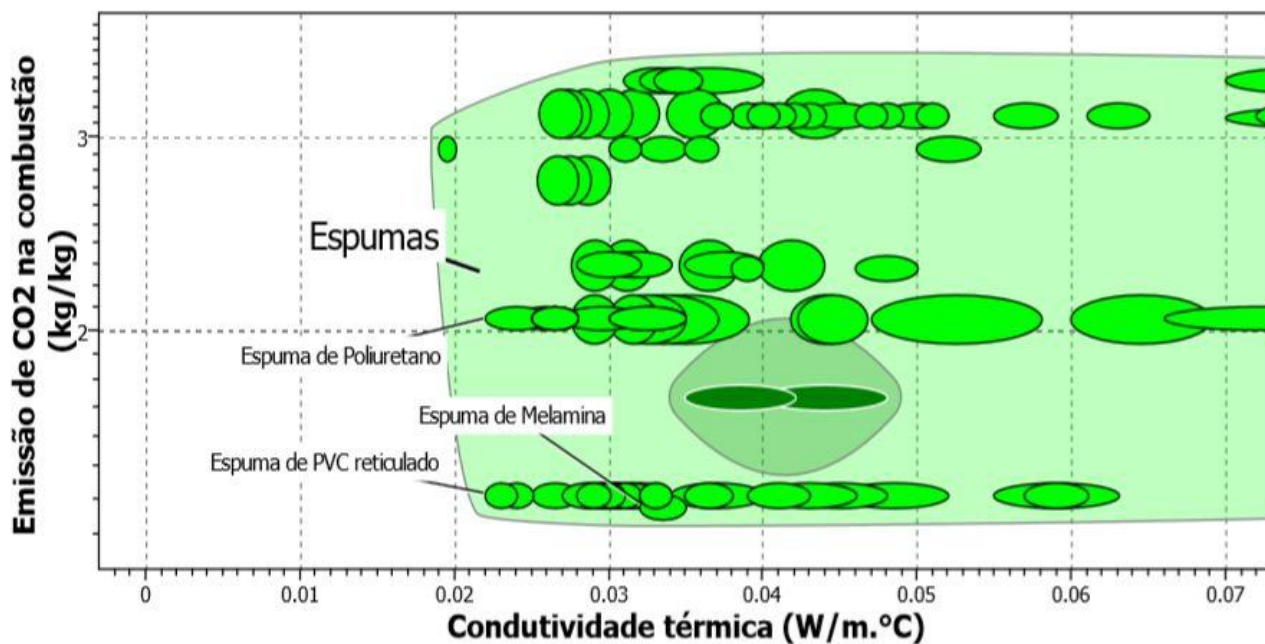
**Tabela 6: Classificação das espumas de acordo com o índice de Mérito 3 (IM3)**

Classificação	Material	Condutividade térmica (W/m.°C)	Emissão de CO2 na combustão (kg/kg)	IM3
1º	Espuma de PVC reticulado	0,0230	1,41	30,8356
2º	Espuma de Melamina	0,0335	1,38	21,6310
3º	Espuma de Poliuretano	0,0240	2,05	20,3252
4º	Espuma Fenólica	0,0195	2,94	17,4429
5º	Espuma de Tereftalato de Polietileno	0,0292	2,3	14,9154
6º	Espuma de Polimetacrilamida	0,0300	2,3	14,4928
7º	Espuma de Poliéteramida	0,0267	2,75	13,6449
8º	Espuma de PVC	0,0590	1,41	12,0207
9º	Espuma de Estireno Acrilonitrila	0,0269	3,16	11,7861
10º	Espuma de Polietersulfona	0,0390	2,28	11,2461

Fonte: Dados obtidos no CES EduPack, 2014; Próprio Autor, 2019.

As três melhores espumas poliméricas, de acordo com o Índice de Mérito 3, estão mostradas no diagrama de propriedades da Figura 12. Observa-se, novamente, que essas espumas estão localizadas em posições limite à esquerda e abaixo no diagrama.

Figura 12: Diagrama da emissão de CO<sub>2</sub> na combustão em função da condutividade térmica com foco no IM3

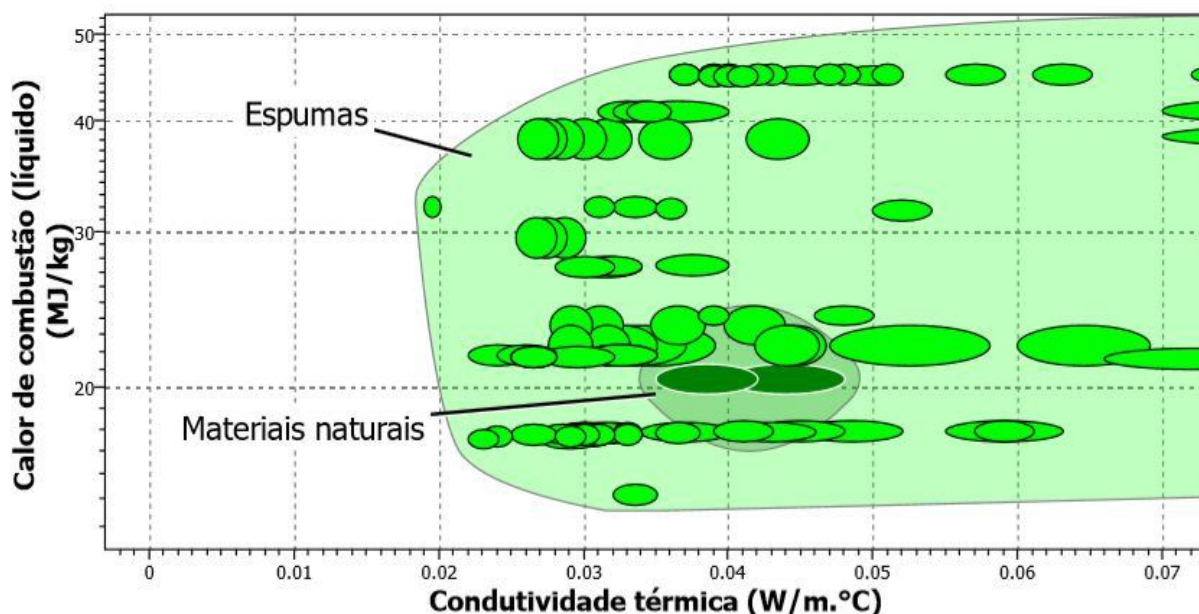


Fonte: Dados obtidos no CES EduPack, 2014; Próprio Autor, 2019.

#### 5.4 CALOR DE COMBUSTÃO

Por fim, o calor de combustão foi o quarto e último eco-atributo a ser analisado. Calor de combustão é a quantidade de energia liberada quando o material passa por combustão completa. Como mencionado anteriormente, a combustão é uma alternativa viável e bastante utilizada para recuperação de energia. Quanto mais energia é liberada na queima do material, maior é a contribuição deste para recuperação energética (CES EDUPACK, 2014; GONÇALVES, 2007). Emissão de CO<sub>2</sub> na combustão e calor de combustão são parâmetros que, do ponto de vista da seleção de materiais, devem ser considerados em conjunto (CES EDUPACK, 2014). No entanto, enquanto deseja-se minimizar as emissões de CO<sub>2</sub>, é interessante maximizar o calor de combustão. Para realizar este estudo, calor de combustão (MJ/kg) foi avaliado de forma simultânea à condutividade térmica (W/m.°C), por meio do diagrama de propriedades de materiais, apresentado na Figura 13. Assim como nas outras análises, a condutividade térmica foi limitada a 0,07 W/m.°C para o universo das espumas.

Figura 13: Diagrama do calor de combustão em função da condutividade térmica para o universo das espumas



Fonte: Dados obtidos no CES EduPack, 2014; Próprio Autor, 2019.

Diferentemente das análises anteriores, nas quais os melhores materiais foram aqueles que apresentaram de forma conjunta os menores valores dos eco-atributos selecionados e condutividade térmica, nesse caso, buscou-se pelo material que apresentasse o maior calor de combustão ao mesmo tempo em que apresentasse a menor condutividade térmica. Ou seja, o objetivo foi maximizar o calor de combustão e minimizar a condutividade térmica, fazendo com que o índice de Mérito 4 (IM4) fosse proporcional ao desempenho do material. Logo, a equação estabelecida está mostrada a seguir:

$$\mathfrak{I}4 = \frac{\text{calor de combustão}}{\text{condutividade térmica}} \quad (5)$$

O IM4 foi utilizado para classificar as espumas e aquelas com os dez maiores índices de mérito, com base nos parâmetros analisados, estão apresentadas na Tabela 7. Os valores de calor de combustão (MJ/kg) e condutividade térmica (W/m.°C) são as médias aritméticas dos valores fornecidos pelo software e também estão apresentados na tabela.

**Tabela 7: Classificação das espumas de acordo com o índice de Mérito 4 (IM4)**

Classificação	Material	Condutividade térmica (W/m.°C)	Calor de combustão líquido (MJ/kg)	IM4
1º	Espuma Fenólica	0,0195	31,75	1628,2051
2º	Espuma de Estireno	0,02685	38,15	1420,8566
3º	Acrilonitrila Espuma de	0,033	41,1	1245,4545
4º	Poliestireno Espuma de Polietileno	0,037	45,1	1218,9189
5º	de baixa densidade Espuma de	0,039	45,1	1156,4103
6º	Polipropileno Espuma de	0,02665	29,55	1108,8180
7º	Poliéteramida Espuma de Polietileno	0,047	45,05	958,5106
8º	de alta densidade Espuma de	0,024	22,35	931,2500
9º	Poliuretano Espuma de	0,03	27,5	916,6667
10º	Polimetacrilamida Espuma de	0,02915	23,6	809,6055
	Tereftalato de Polietileno			

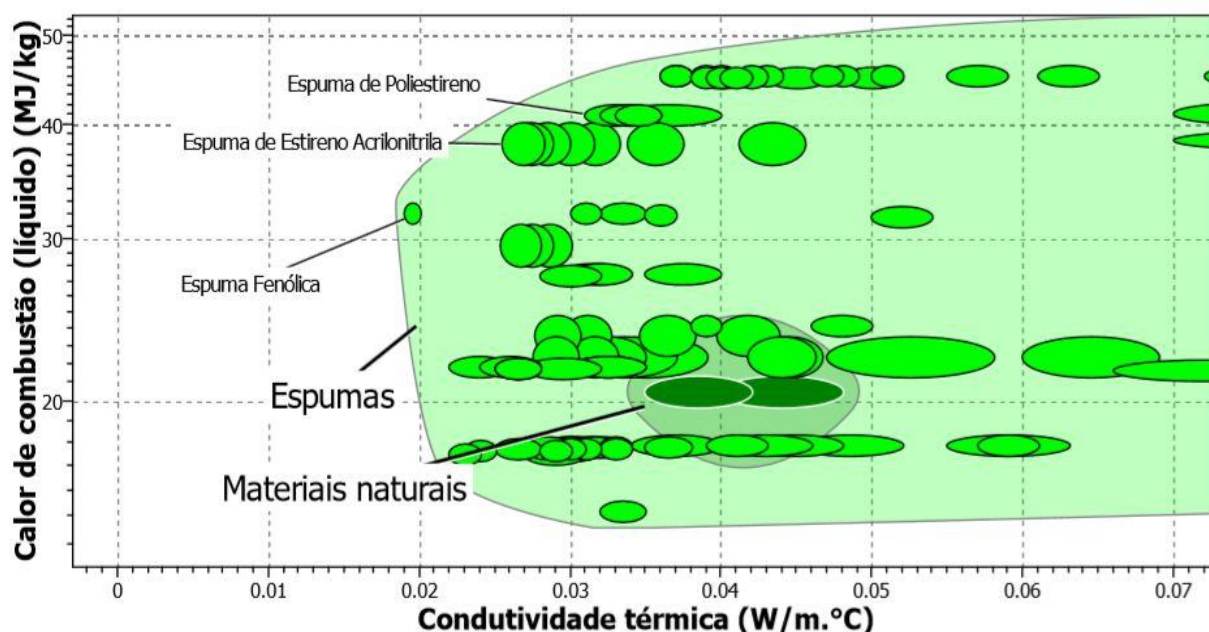
Fonte: Dados obtidos no CES EduPack, 2014; Próprio Autor, 2019.

Com base nessa análise, observa-se que a espuma fenólica apresentou a melhor combinação de propriedades estudada nesse tópico, assumindo, assim como na segunda análise, a primeira colocação. Visto isso, essa espuma é forte candidata à aplicação proposta. Já a espuma de PVC reticulado, que nas análises anteriores esteve bem colocada, não aparece entre as dez espumas classificadas, pois apresentou IM4 igual a 780,4348. A espuma de estireno acrilonitrila é a segunda colocada nesta análise e aparece entre as dez melhores espumas em todas as análises anteriores, sendo também candidata à aplicação. Já a espuma de poliuretano, material mais utilizado para isolamento térmico, ficou em oitavo lugar neste quesito, pois possui calor de combustão relativamente baixo.

No Diagrama de Propriedades da Figura 14 estão apresentadas as três melhores espumas classificadas com base no IM4. Novamente observa-se que as espumas melhores classificadas encontram-se em posições limites do diagrama, no entanto, nessa análise, as espumas com os maiores índices de mérito estão situadas a

esquerda e acima, uma vez que maximizar o eco-atributo calor de combustão foi o objetivo.

**Figura 14: Diagrama do calor de combustão em função da condutividade térmica com foco no IM4**



Fonte: Dados obtidos no CES EduPack, 2014; Próprio Autor, 2019.

## 5.5 SELEÇÃO FINAL

Após classificar as espumas poliméricas de acordo com índices de mérito estabelecidos para correlacionar a condutividade térmica em função de quatro diferentes eco-atributos – emissão de CO<sub>2</sub> na produção primária, uso de água na produção primária, emissão de CO<sub>2</sub> na combustão e calor de combustão – esses índices foram somados e uma classificação final foi realizada para determinar qual espuma era a mais adequada à aplicação proposta. A classificação, mostrada na Tabela 8, conta com mais de dez espumas, pois nela estão mostradas as somas dos índices de mérito de todas as espumas que apareceram nas análises, mesmo que em apenas um item, como é o caso da espuma de PVC, por exemplo.

**Tabela 8: Classificação das espumas de acordo com o somatório dos índices de Mérito IM1, IM2, IM3 e IM4**

Classificação	Material	Soma
1º	Espuma Fenólica	1656,842
2º	Espuma de Estireno Acrilonitrila	1441,687
3º	Espuma de Poliestireno	1261,59
4º	Espuma de Polietileno de baixa densidade	1233,637
5º	Espuma de Polipropileno	1174,732
6º	Espuma de Poliéteramida	1124,511
7º	Espuma de Polietileno de alta densidade	971,302
8º	Espuma de Poliuretano	960,379
9º	Espuma de Polimetacrilamida	940,1278
10º	Espuma de Tereftalato de Polietileno	831,268
11º	Espuma de PVC reticulado	822,5709
12º	Espuma de Polietersulfona	633,1693
13º	Espuma de Melamina	479,6253
14º	Espuma de PVC	320,6529

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Logo, de acordo com o somatório de IM1, IM2, IM3 e IM4, a espuma com o melhor desempenho visando a condutividade térmica e os eco-atributos estabelecidos, ou seja, a melhor espuma para isolamento térmico visando o *eco-design* foi a espuma fenólica.

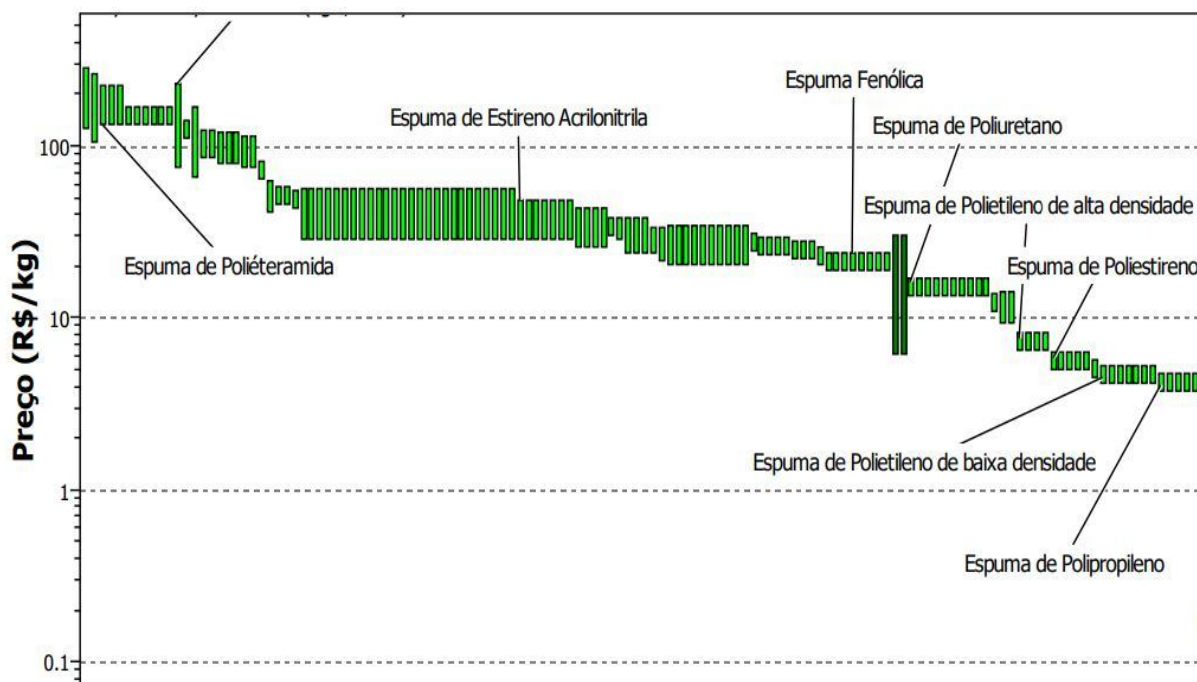
A espuma fenólica é um polímero termofixo com densidade variando entre 32 e 38 kg/m<sup>3</sup> (CES EDUPACK, 2014). Devido às excelentes propriedades térmicas, essa espuma é um excelente material de isolamento e, de acordo com a literatura, têm sido utilizada com sucesso nesse tipo de aplicação (CORNICK, 2010). Outras aplicações incluem absorção de energia, uso em embalagens, núcleo de estruturas sanduíche e flutuação (CARVALHO et al., 2007; CES EDUPACK, 2014).

A espuma de poliuretano ficou classificada na oitava colocação. Esta espuma é composta por um polímero termofixo, com densidade variando entre 150 a 170 kg/m<sup>3</sup> (CES EDUPACK, 2014). Observa-se, portanto, que além dos fatores ecológicos, a espuma fenólica possui densidade bem inferior a espuma de poliuretano e, como visto, menor condutividade térmica, o que indica que esta espuma é de fato uma interessante substituta à espuma mais utilizada para aplicações de isolamento térmico.

As espumas classificadas entre a segunda e sétima colocações, ou seja, espuma de estireno acrilonitrila, espuma de poliestireno, espuma de polietileno de baixa densidade, espuma de polipropileno, espuma de poliéteramida e espuma de polietileno de alta densidade, também podem ser opções interessantes para aplicações em isolamento térmico, de acordo com os atributos analisados neste estudo.

Uma análise adicional, apresentada na Figura 15, foi realizada em relação ao custo das oito melhores espumas mostradas na Tabela 8. Valores retirados do programa CES EDUPACK 2014;

**Figura 15: Diagrama da análise de custo das melhores espumas poliméricas analisadas nesse estudo**



Fonte: Dados obtidos no CES EduPack, 2014; Próprio Autor, 2019.

É possível notar que a espuma fenólica possui custo superior à espuma de poliuretano e talvez por isso não seja tão utilizada para isolamento térmico, apesar do melhor desempenho no que se refere à condutividade térmica. Enquanto a espuma de poliuretano apresenta custo cotado entre R\$14,70 e 16,20 por quilograma de material, a espuma fenólica possui custo variando entre R\$18,90 e R\$23,60 (CES EDUPACK, 2014). No entanto, essa diferença de valores poderia possivelmente ser compensada em outras etapas de um projeto e torna-se de menor



importância quando os benefícios em relação ao desempenho e aspectos ambientais da espuma fenólica superam os da espuma de poliuretano.

Em relação às espumas classificadas entre o segundo e sétimo lugar, nota-se que a espuma de poliéteramida e estireno acrilonitrila possuem os maiores custos, enquanto todas as outras espumas, ou seja, espuma de polietileno de alta densidade, espuma de poliestireno, espuma de polietileno de baixa densidade e de polipropileno possuem custos menores do que as espumas fenólica e de poliuretano. Logo, análises específicas para cada projeto devem ser feitas de modo a definir a condutividade térmica mais adequada para a aplicação e, se possível, substituir a espuma de poliuretano por uma das quatro de menor preço listadas acima, obtendo ganhos não só em relação aos aspectos ambientais, como também em relação ao custo.

## 6. CONCLUSÃO

A seleção de espuma para isolamento térmico com foco no eco-design foi realizada pelo método de seleção de materiais desenvolvida pelo Professor Michael Ashby. Esse método apontou algumas possíveis opções, que apresentavam de forma simultânea baixa condutividade térmica e bom desempenho em relação ao eco-atributo estabelecido. A espuma de poliuretano, espuma atualmente mais utilizada para esta aplicação, também foi considerada nesta análise e serviu como base de comparação para as outras espumas estudadas.

Apesar do maior preço da Espuma Fenólica, primeira na análise feita nesse trabalho, em relação a Espuma de Poliuretano, mais utilizada atualmente, a diferença não é muito grande. A média de preço da primeira é de 21 reais por quilograma e da segunda é de 17 reais por quilograma. A Fenólica possui uma menor utilização de água na sua produção e libera maior calor de combustão em sua queima, como vistos nas tabelas obtidas. Esses dois aspectos poderiam compensar o maior preço do quilograma deste em relação ao poliuretano.

Para cada atributo ecológico foi estabelecido um índice de mérito, que auxiliou na classificação parcial das espumas. A soma dos índices de mérito obtidos em cada análise foi realizada para que a classificação final das espumas pudesse ser feita. Dessa forma, foi possível verificar que o material que apresentou o maior somatório dos índices de mérito foi a espuma fenólica. Essa espuma foi apontada por este estudo, portanto, como a espuma com maior potencial para substituição da espuma de poliuretano, tendo como foco a seleção de materiais voltada para o eco-design, ou seja, seleção voltada para diminuição dos impactos ambientais. No entanto, outras seis espumas apresentaram índices de mérito superiores ao da espuma de poliuretano, sendo, também, possíveis candidatas à substituição deste material.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em função das limitações relacionadas à realização deste trabalho, algumas sugestões são propostas para que outras questões possam ser melhor estudadas e exploradas. Dentre as sugestões, destacam-se:

- Análise da reciclabilidade das espumas estudadas;
- Realização de estimativas de custo da produção e aplicação das espumas mais bem colocadas neste projeto;
- Estudo experimental do comportamento das espumas bem classificadas, em especial da espuma fenólica, em comparação com a espuma de poliuretano.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDUL-REHMAN, S.; DAVIS, C. Independent learning using the Cambridge Engineering Selector (CES) EduPack software with large class sizes. **Engineering Education**, v. 4, p. 2-7, 2009

ASDRUBALI, F; D'ALESSANDRO, F.; SCHIAVONI, S. A review of unconventional sustainable building insulation materials. **Sustainable Materials and Technologies**, Perugia, v. 4, p. 1-17, 2015.

ASSÉKO, A. C. A.; COSSON, B.; DUBORPER, C.; LACRAMPE, M. F.; KRAWCZAK, P. Numerical analysis of effective thermal conductivity of plastic foams. **J Mater Sci**, Nova York, v. 51, p. 9217-9228, 2016.

ASHBY, M. F. **Materials selection in mechanical design**. 3. ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. 603p.

ASHBY, M. F. **Seleção de Materiais no Projeto Mecânico**. 4. ed. Tradução de Arlete Similler. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

BALETA, J.; MIKULCIC, H.; KLEMES, J. J.; URBANIEC, K.; DUIC, N. Integration of energy, water and environmental systems for a sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, Sisak, v. 215, p. 1424-1436, 2019.

BARRIOS, M.; SCIVER, S. W. V. Thermal conductivity of rigid foam insulations for aerospace vehicles. **Cryogenics**, Tallahassee, v. 55, p. 12-19, 2013.

BENES, H.; ROSNER, J.; HOLLER, P.; SYNKOVA, H.; KOTEC, J.; HORAK, Z. Glycolysis of flexible polyurethane foam in recycling of car seats. **Polymers for Advanced Technologies**, Praga, v. 18, p. 149-156, 2007.

BENKREIRA, H.; KHAN, A.; HOROSHENKOV, K. V. Sustainable acoustic and thermal insulation materials from elastomeric waste residues. **Chemical Engineering Science**, Bradford, v. 66, p. 4157-4171, 2011.

BIRD, E. T; BOWDEN, A. E.; SEELEY, M. K.; FULLWOOD, D. T. Materials selection of flexible open-cell foams in energy absorption applications. **Materials and Design**, Provo, v. 137, p. 414-421, 2018.

BOSELTMANN, K. **The principle of sustainability**: transforming law and governance. Auckland: Ashgate, 2008. 253 p.

CARVALHO, G.; PIMENTA, J. A.; SANTOS, W. N.; FROLLINI, E. Phenolic and lignophenolic closed cells foams: thermal conductivity and other properties. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, São Carlos, v. 42, p. 1202-1211, 2003.

CASTRO, D. E. **Reciclagem e Sustentabilidade na Indústria Automobilística**. Belo Horizonte, 2012. 215 p.

CES EDUPACK. Versão 14.3.5. [S. l.]: Granta Design Limited, 2014.

CES EDUPACK. Granta Design 2019. Disponível em: <<https://grantadesign.com/education/ces-edupack/>>. Acesso em: 09 abril, 2019.

CORNICK, M. Foam. In: \_\_\_\_\_. **Phenolic resins: a century of progress**. Berlim: Springer, 2010. cap. 9, p. 189-208.

EAVES, D. **Handbook of Polymer Foams**. Shropshire: Rapra Technology Limited, 2004. 290 p.

FARAG, M. M. Quantitative methods of materials selection. In: \_\_\_\_\_. **Handbook of Materials Selection**. Nova York: John Wiley & Sons, 2002. cap. 1, p. 3-27.

GIBSON, L. J.; ASHBY, M. F. **Cellular solids: structure and properties**. 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 502 p.

GOMES, C. V. S. **Comportamento acústico de materiais absorvedores em multicamadas**. 2015. 183 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

GONÇALVES, C. K. **Pirólise e combustão de resíduos plásticos**. 2007. 60 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GROLIER, J. P. E.; RANDZIO, S. L. Simple gases to replace non-environmentally friendly polymer foaming agents. **J. Chem. Thermodynamics**, Aubière, v. 46, p. 42-56, 2012.

HOPKINS, C. **Sound Insulation**. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2007. 622 p.

HOUSEL, T. Flexible polyurethane foam. In: \_\_\_\_\_. **Handbook of Polymer Foams**. Shropshire: Rapra Technology Limited, 2004. cap. 5, p. 85-122.

HU, R.; MA, A.; LI, Y. Transient hot strip measures thermal conductivity of organic foam thermal insulation materials. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Changsha, v. 91, p. 443-450, 2018.

HUNG, T. C.; HUANG, J. S.; WANG, Y. W.; LIN, K. Y. Inorganic polymeric foam as a sound absorbing and insulation material. **Construction and Building Materials**, Tainan, v. 50, p. 328-334, 2014.

JAMBECK, J.; GEYER, R.; WILCOX, C.; SIEGLER, T. R.; PERRYMAN, M.; ANDRADY, A.; NARAYAN, R.; LAW, K. L. Plastic waste inputs from land into the ocean. **Science**, Atenas, v. 347, p. 768-771, 2015.

LAMBRECHTS, W.; GELDERMAN, C. J.; SEMEIJN, J.; VERHOEVEN, E. The role of individual sustainability competences in eco-design building projects. **Journal of Cleaner Production**, Heerlen, v. 208, p. 1631-1641, 2019.

LEE, S. T. Introduction: polymeric foams, mechanisms and materials. In: \_\_\_\_\_. **Polymeric Foams: mechanisms and materials**. Boca Raton: CRC Press LLC, 2004. cap. 1, p. 11-27.

LEE, S. T.; RAMESH, N. S. **Polymeric Foams: mechanisms and materials**. Boca Raton: CRC Press LLC, 2004. 318 p.

LUO, X.; MOHANTY, A.; MISRA, M. Lignin as a reactive reinforcing filler for water-blown rigid biofoam composites from soy oil-based polyurethane. **Industrial Crops and Products**, Guelph, v. 47, p. 13-19, 2013.

MONTEIRO, S. N.; RODRIGUEZ, R. J. S.; COSTA, L. L.; PORTELA, T. G. R.; SANTOS, N. S. S. Thermal behavior of buriti biofoam. **Revista Matéria**, Campo dos Goytacazes, v. 15, n. 2, p. 104-109, 2010.

NAWABI, A. V.; ZHANG, Z. Solubility and diffusivity. In: \_\_\_\_\_. **Thermoplastic Foam Processing: principles and development**. Boca Raton: CRC Press, 2005. cap. 1, p. 12-53.

OKOROAFOR, M. O.; FRISCH, K. C. Introduction to foams and foam formation. In: \_\_\_\_\_. **Handbook of Plastic Foams: types, properties, manufacture and applications**. Nova Jersey: Noyes Publications, 1995. cap. 1, p. 1-10.

PAPADOPOULOS, A. M. State of the art in thermal insulation and aims for future developments. **Energy and Buildings**, Thessaloniki, v. 37, p. 77-86, 2005.

SERAFINI, M.; RUSSO, D.; RIZZI, C. Multi criteria material selection for eco-design. **Computer-Aided Design and Applications**, Bergamo, v. 12, p. 526-536, 2015.

SHEALY, T. Do sustainable buildings inspire more sustainable buildings. **Procedia Engineering**, Blacksburg, v. 145, p. 412-419, 2016.

SPIRK, S.; KRIZEK, M.; JENICEK, S. Polyurethane foam behaviour during impact. **MATEC Web of Conferences**, v. 157, 02050, 2018.

SUH, K. W.; PARK, C. P.; MAURER, M. J.; TUSIM, M. H.; DE GENOVA, R.; BROOS, R.; SOPHIEA, D. P. Lightweight cellular plastics. **Advanced Materials**, Midland, v. 12, n. 23, p. 1779-1789, 2000.

VACHON, C. Research on alternative blowing agents. In: \_\_\_\_\_. **Thermoplastic Foam Processing: principles and development**. Boca Raton: CRC Press, 2005. Cap. 4, p. 151-202.

VEZZOLI, C.; MANZINI, E. **Design for environmental sustainability**. Milão: Springer, 2008. 303 p.

WU, L. W.; BAN, J. Y.; JIANG, Q.; LI, T. T.; SHIU, B. C.; PENG, H. K.; HUANG, S. Y.; LOU, C. W.; LIN, J. H. Flexible polyurethane foam-based sandwich composites: preparation and evaluation of thermal, acoustic, and electromagnetic properties. **Journal of Applied Polymer Science**, Tianjin, v. 46871, p. 1-8, 2018.

ZHANG, F.; LUO, X. Systematic study on substituting petroleum-based polyols with soy-based polyol for developing hybrid biofoam by self-catalyzing/rising process. **Industrial Crops and Products**, Hubei, v. 77, p. 175-179, 2015.