

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI

FELIPE MESQUITA RAMOS

Estudo de Caso envolvendo a Ferramenta ECO Design na
Metodologia de Seleção de Materiais

São Bernardo do Campo
2015

FELIPE MESQUITA RAMOS

Estudo de Caso envolvendo a Ferramenta ECO Design na
Metodologia de Seleção de Materiais

Projeto de Iniciação Didático-Científica
submetido ao Centro Universitário FEI, como
parte dos requisitos necessários para obtenção
de bolsa de iniciação didático-científica e
condução do projeto. Orientado pelo professor
Júlio César Dutra.

Coordenador do projeto: Prof. Dr. Júlio César Dutra

Centro: Departamento de Materiais

Equipe Executora: Felipe Mesquita Ramos

Júlio César Dutra

Financiador do projeto: Centro Universitário da FEI

Data de início: 1 de fevereiro de 2016

Data de provável conclusão: 31 de janeiro de 2017

São Bernardo do Campo
2015

RESUMO

A metodologia de seleção de materiais, ou simplesmente metodologia de Ashby, é uma maneira sistemática de conduzir a escolha de um material para uma dada aplicação. Ela permite ir além de uma mera escolha do material já que aponta para materiais substitutos com mesmo desempenho no que tange ao índice de mérito e ainda indica de tacitamente áreas de pesquisas em novos materiais. Essa metodologia tem sido estudada pelos alunos dos cursos de engenharia da FEI, mais especificamente as engenharias mecânica e de materiais, há mais de 15 anos e atingiu um estágio considerável de maturidade. Contudo, nos dias atuais é cada vez mais premente a necessidade de que os engenheiros saibam quantificar a medida de impacto ambiental provocada pela escolha dos materiais já que inexoravelmente tal escolha envolve um conjunto de recursos e processos que certamente afetarão o meio ambiente. Essa abordagem tem como objetivo o desenvolvimento da compreensão do ciclo de vida de um material e de que modo objetivos de natureza projetual ambiental afetam a seleção de um material. O desenvolvimento dessa consciência deve-se dar, por hora no nosso país, de modo a criar um diferencial aos nossos alunos dos cursos de engenharia, mas também deve-se ter a ciência muito clara de que no futuro novas restrições de caráter devem ser impostas no nosso país posto que ele se encontra em um mundo cada vez mais preocupado com os gases de efeito estufa e o aquecimento global. O estudo da ferramenta EcoDesign do software CESEdupack será feito por intermédio de um produto, uma cadeira, de três diferentes materiais, e as características presentes nesse software, quais sejam: a energia necessária para o ciclo do material (produção, manufatura, uso e descarte) e/ou sua pegada de carbono. Como resultado tem-se uma estratégia eficiente para o aprendizado da ferramenta mencionada e seus possíveis desdobramentos para exemplos mais complexos, ou seja, com um conjunto maior de materiais que compõem determinado produto.

Palavras-chave: Seleção de Materiais. Metodologia de Ashby. Sustentabilidade em Materiais.

ABSTRACT

Materials Selection or Ashby's materials selection, is a systematic way to choose the best material for a given application. It allows not only the best choice of material for a certain application but also to show possible alternatives with the same performance and even showing gap areas which new materials can be developed. This methodology has been studied by undergraduate students from FEI, particularly mechanical and materials undergraduate engineers, for more than 15 years so it has achieved a reasonable degree of maturity. However, it has become increasingly more important for students to be aware of environmental issues and therefore knowing how to quantify them since their choice will affect the environment. Such approach aims at developing the understanding of a material life-cycle and to such an extent the awareness that environmental design objectives influences materials selection. In Brazil, such development is for now a step ahead of other engineering courses but it is certainly in a foreseeable future that environmental regulations will become clearer causing the engineering students to be more aware of greenhouse gases and global warming on a daily basis. EcoDesign from CES Edupack will be studied by three different material choices for a single product, a *chair* and the necessary amount of energy for the material life-cycle (production, manufacture, use and disposal) and/or carbon footprint. It is expected to have eventually an efficient strategy for students to grasp these concepts as well as the development of more complex problems, i.e., products consisted of a myriad of parts with different materials.

Keywords: Materials Selection. Ashby's Methodology. Sustainable Development in Materials.

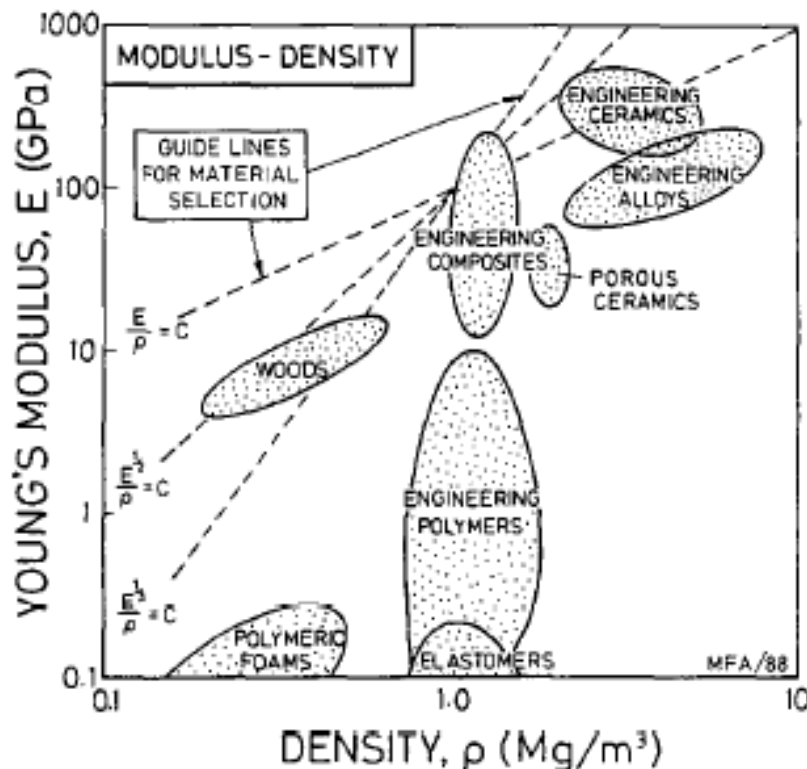
Sumário

RESUMO	3
ABSTRACT	4
1 INTRODUÇÃO.....	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
1.1 ÍNDICE DE MÉRITO.....	12
1.2 MAPA DE ASHBY	14
1.3 A OPÇÃO ECO DESIGN	18
3. MATERIAIS E MÉTODOS	22
3. OBJETIVOS.....	23
3.1. OBJETIVO GERAL.....	23
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
4. RESULTADOS ESPERADOS.....	25
5. PLANO DE TRABALHO DO BOLSISTA	26
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28

1 INTRODUÇÃO

Ashby (1989), em um artigo seminal, mostrou a possibilidade da relação entre as propriedades dos materiais utilizados em engenharia com vistas à seleção de materiais. Naquele momento, Ashby (1989) estava preocupado em mostrar os resultados de seu levantamento junto a mais de dezenas de milhares de materiais e a notória correlação existente as propriedades físicas dos materiais - tais como a densidade, e as propriedades mecânicas, como o módulo de elasticidade e a resistência. Tal levantamento exaustivo conduziu ao que ele denominou à época de mapas de seleção de materiais, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Mapa de seleção de materiais de Ashby, com sua proposta original: a correlação entre a propriedade *módulo de elasticidade (ou módulo de Young)* e a *densidade (density)*. As linhas tracejadas mostram um *índice de mérito C* de mesmo valor; no caso, o módulo de elasticidade para uma dada densidade $\frac{E}{\rho^n} = C$. O valor de n depende da solicitação do componente.



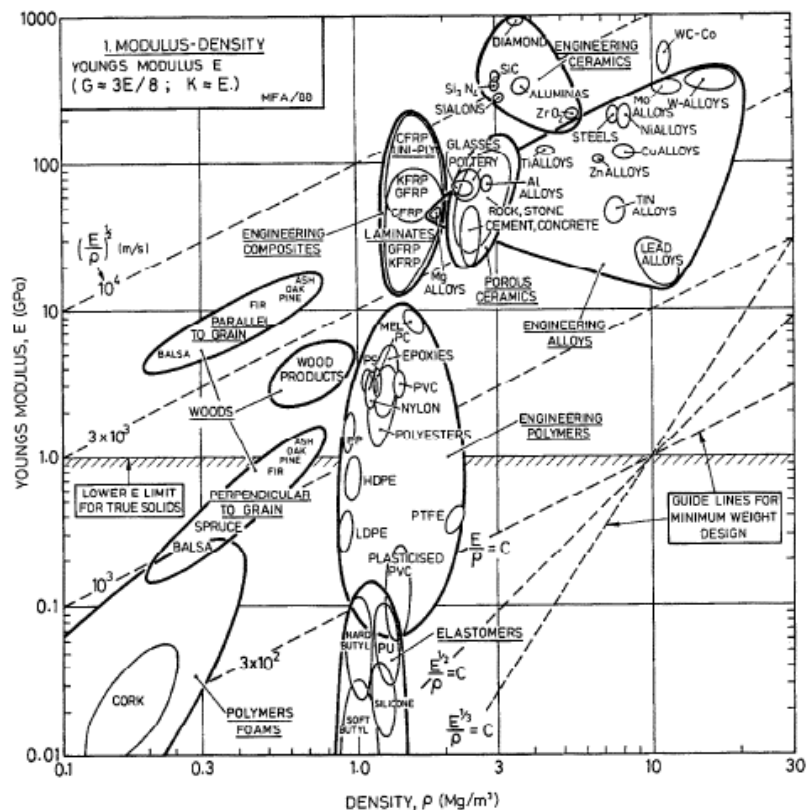
Fonte: Ashby (1989).

De acordo com a Figura 1, os materiais que possuem o maior módulo de elasticidade são geralmente os mais densos. Também é possível observar que os materiais mais flexíveis

são igualmente os mais leves, ou seja, os que possuem os menores valores de densidade. Mais do que isso, Ashby (1989) foi capaz de mostrar que as solicitações típicas de engenharia podem ser racionalizadas por um índice de mérito. Para o caso dos componentes que necessitam de máxima rigidez e o mínimo de densidade, ter-se-ia um índice de mérito proporcional a E/ρ , razão pela qual ele denominou as linhas da Figura 1 como linhas-guia para a seleção de materiais. De acordo com essa linha, qualquer material que estivesse nessa linha teria o mesmo valor dessa razão e, portanto, poderia ser escolhido para uma dada aplicação.

O exame da Figura 1 também mostra de maneira tácita que não há materiais que sejam rígidos e ao mesmo tempo leves, ou seja, com baixa densidade. Esse tipo de gráfico, portanto, é extremamente interessante posto que demonstra claramente campos para novas pesquisas em materiais de engenharia. Uma figura que detalha cada um dos balões visto na Figura 1 é apresentada na Figura 2, a seguir.

Figura 2 - Mapa de seleção de materiais de Ashby, com o detalhamento das propriedades de diversos materiais de engenharia, no caso o módulo de elasticidade ou módulo de Young e sua correlação com a densidade. Diversas linhas-guia estão presentes.



Fonte: Ashby (1989).

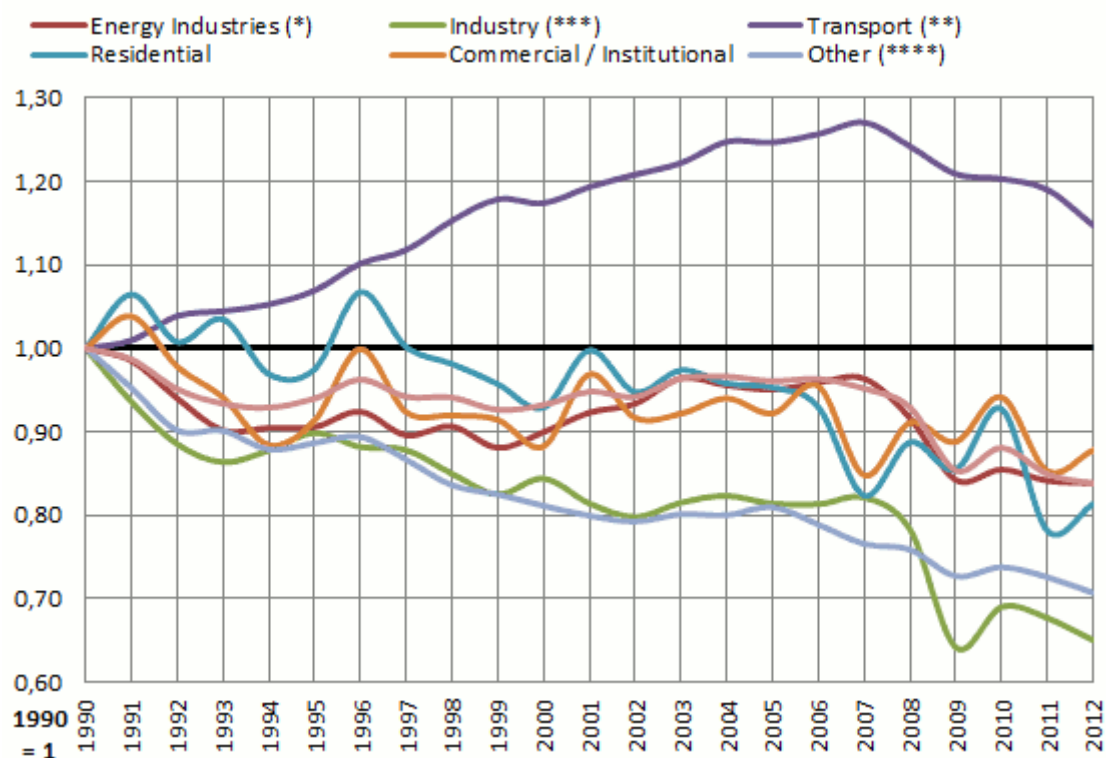
É possível observar pelo exame da Figura 2 que em cada um dos balões presentes na Figura 1 há um conjunto razoável de materiais que atenderiam pelas classes definidas como metais e ligas metálicas, polímeros, compósitos (híbridos) e cerâmicas de engenharia, para citar alguns.

Outro aspecto interessante nesse tipo de diagrama é o fato da escala utilizada ser logarítmica em ambas as variáveis. Isso decorre de o fato das propriedades exploradas terem uma variação considerável, o que facilita sobremaneira a sua visualização quando elas são plotadas nesse tipo de escala.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar essa metodologia com vistas à exploração de um índice de mérito que seria acrescido aos demais, qual seja, o índice ou indicador ecológico (ASHBY, 2011). Esse indicador, figura comum nos projetos de engenharia cada vez mais frequentes nos países pertencentes à União Europeia (ASHBY, 2015) ainda não se faz presente no nosso país por conta da ausência de uma legislação ambiental que imponha restrições no mesmo nível de detalhe desses países. Para se ter uma ideia, a lei número 6.938, de 31 de agosto de 1981, que “dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências” apresenta, no seu Anexo VIII, as atividades potencialmente poluidoras e utilizadoras de recursos ambientais, por exemplo a extração e tratamento de minérios, a indústria de produtos não metálicos, a indústria metalúrgica e a indústria mecânica, todas com PP/GU¹ alto ou médio. Tais atividades foram regulamentadas pela lei ordinária de 27 de dezembro de 2000 (Brasil, 2000), a qual altera a lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, (Brasil, 1981) no que tange à Política Nacional do Meio Ambiente, mais especificamente com relação aos seus fins e mecanismos de formulação e aplicação além de dar outras providências com relação ao Anexo VIII outrora mencionado. De modo geral, o que essa norma disciplina são os valores a serem pagos a título de Taxa de Controle e Fiscalização Ambiental (TCFA) de acordo com o potencial de poluição e grau de utilização de recursos naturais e o tipo de estabelecimento (pessoa física, empresa de pequeno porte etc.) (Brasil, 2000). Não há, por hora, uma legislação específica sobre os produtos comercializados e algo parecido com o carbono equivalente ou o consumo de energia por quilograma de material utilizado na fabricação do produto. Independente disso, a noção muito clara de que a emissão de CO₂ por conta dos combustíveis fósseis tem de diminuir é evidente nos países da União Europeia, como pode ser visto na Figura 3.

¹ Sigla que significa **P**otencial de **P**oluição e **G**rau de **U**tilização de recursos naturais (BRASIL, 1981).

Figura 3 – Emissões de gases de efeito estufa oriundos do transporte e outros setores.



Fonte: http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/index_en.htm em 7 de dezembro de 2015.

Nota-se pela Figura 3 que a emissão de gases diminuiu em todos os setores desde 1990, exceto o setor de transportes, que só veio a apresentar alguma diminuição a partir de 2008. Mais do que chamar a atenção que o setor de transportes na União Europeia necessita adequar-se às metas de modo que não haja um aumento na quantidade de gases de efeito estufa, é importante que esse tipo de consciência também seja despertada no cidadão brasileiro, principalmente os alunos de engenharia que devem procurar os meios racionais para que tais quantidades sejam claramente diminuídas.

É justamente pela procura de soluções originais que esse trabalho tem como objetivo mais específico desenvolver instrumentos para que as competências e habilidades na área de projetos e a seleção de materiais aconteça levando em conta os aspectos ambientais e, principalmente, quantificando-os. Acredita-se que isso será cada vez mais comum nos próximos anos tendo em vista notícias recentes de que a relação custo-benefício das energias alternativas tornaram-se viáveis do ponto de vista econômico (Independent, 2015; BBC News, 2015). Por conta disso, é de importância premente que o ensino de graduação lide com essas questões na mais tenra idade, o que ocorre geralmente no terceiro ano dos cursos de engenharia.

Outro ponto importante na área de formação do engenheiro é a procura por alternativas sustentáveis que sejam viáveis do ponto de vista econômico. Recentemente, em uma conferência sobre economia em Santa Bárbara (ECO:NOMICS:... 2014) Estados Unidos, o Wall Street Journal, por intermédio do editor John Bussey, questionou Michael Duke, chairman do Walmart, se essa empresa sabia o que o seu consumidor realmente desejava em relação aos produtos sustentáveis e se eles se importariam em pagar mais por produtos sustentáveis, como por exemplo algo para a cozinha ou sacolas plásticas biodegradáveis. Duke respondeu que ele não achava que a maioria dos americanos teriam de pagar mais por produtos sustentáveis e por essa razão a empresa tomou a decisão de que eles não deveriam pagar mais por isso. Por essa razão, a empresa estaria trabalhando junto aos seus fornecedores para que os consumidores não tivessem de pagar mais por produtos sustentáveis; ao contrário, a escolha teria de ser optar por um produto sustentável que tenha um preço com o mesmo valor daquele que não seja sustentável ou no máximo com um pequeno incremento no preço. As palavras escala, eficiência e inovação são utilizadas por Duke (ECO:NOMICS:...2014) para que pelo menos se possa mitigar ou eventualmente eliminar o vão existente entre os preços de produtos sustentáveis e não sustentáveis.

A disciplina de Materiais Metálicos há tempos trabalha com a metodologia de Ashby de seleção de materiais. Não por acaso, é ela que possibilitará o uso dessa metodologia com a vertente para a área ambiental, o que melhorará o perfil do nosso graduando e, por conseguinte, colocando-o preparado para um mercado de trabalho que ainda virá no nosso país. Como se sabe, é o objetivo da graduação estar à frente do que o mercado necessita, mostrando que o perfil que possuímos na graduação atende de sobra as necessidades industriais. O fato de que a inovação, eficiência e escala sejam fatores prementes para que o mercado de produtos sustentáveis substitua os demais reforça o mérito desse projeto.

Por fim, notícia recente (BBC News, 2015) mostra que é possível a diminuição ou mesmo a redução nas emissões de gases de efeito estufa mesmo com crescimento econômico, o que reforça a tese de que os fatores levantados por Duke (ECO:NOMICS:...2014) sejam capitais para o desenvolvimento sustentável do planeta. A única notícia ruim nesse COP21 (BBC News, 2015) é que o objetivo não deveria ser apenas a redução nas emissões dos gases do efeito estufa, mas sim zerar essas emissões, o que permanece ainda um grande desafio.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A metodologia de seleção de materiais foi proposta por Ashby (1989) preliminarmente como uma maneira de se ter a identificação da relação fundamental entre as propriedades dos materiais com vistas à seleção de materiais para projetos em engenharia. A disposição dessas propriedades em mapas permitiu a contemplação de pelo menos três aspectos distintos: o primeiro seria a adoção de um critério sistemático para a seleção dos materiais e que não dependesse de critérios subjetivos como outrora era realizado, tais como contratar um consultor, usar um material por tradição ou ainda consultar o fornecedor de determinado material. Tais critérios subjetivos não permitiriam um avanço na otimização da seleção dos materiais, mas sim fortemente dependentes do mercado do fornecedor e suas estratégias assim como da razoável estagnação oriunda da tradição ou ainda da dependência da experiência do consultor contratado.

O segundo ponto importante é a observação tácita dos limites que cada material pode oferecer seja nas propriedades, físicas ou químicas, o que facilita sobremaneira a seleção de materiais que exijam propriedades as mais variadas para uma dada aplicação. A facilidade em se ter diagramas (ou mapas) com a combinação ou correlação de propriedades tão diversas como a resistência mecânica, tenacidade à fratura e a condutividade elétrica, para citar algumas, permitiu uma certeza maior na própria seleção dos materiais.

O terceiro aspecto igualmente interessante é a descoberta da necessidade de desenvolvimento de novos materiais. Isso porque, dependendo do projeto, ao se contemplar tais mapas, seria possível a descoberta de que não havia algum material de engenharia que atendesse às necessidades, posto que sua base de dados era relativamente extensa (ASHBY, 1989).

Com o avanço na capacidade computacional e a rede mundial de computadores, a empresa Granta Design foi fundada em 1994 (GRANTA DESIGN, 2015a) e tem sido líder mundial no campo da tecnologia da informação em materiais. Os desdobramentos do trabalho original de Ashby e a sua parceria com David Cebon (GRANTA DESIGN, 2015) frutificaram no desenvolvimento do software CES Selector, CES Edupack, entre outros (GRANTA DESIGN, 2015) que têm como objetivo permitir que os especialistas na área de materiais e equipes de desenvolvimento de produtos encontrem, explorem e apliquem os dados das propriedades dos materiais (GRANTA DESIGN, 2015b). Nos dias atuais, essa empresa oferece seminários na rede mundial de computadores (webinars) a todos os interessados na área de educação em materiais, particularmente as mais de mil universidades no mundo inteiro (GRANTA DESIGN, 2015c)

1.1 ÍNDICE DE MÉRITO

A seleção de materiais é feita no contexto de projetos de engenharia a partir das solicitações a que um determinado componente seja submetido. O exame dessas solicitações pode levar, em alguns casos, a propriedades conflitantes (ASHBY, 2011). De todo modo, essa primeira etapa deve ser executada de modo a se ter o que Ashby denominou de índice de mérito. Tal índice de mérito (ASHBY, 2011) é a representação algébrica das variáveis de interesse que devem ser maximizadas ou minimizadas além dos parâmetros de projeto negociáveis e inegociáveis. É por intermédio desse índice que a seleção de materiais toma lugar.

O exemplo a seguir tem como objetivo apresentar esse índice de mérito: determinado eixo de secção transversal circular de 2,4 cm de diâmetro e 80 cm de comprimento será submetido a um esforço de tração de 90 kN cuja deformação elástica deva ser de no máximo 2%. Deve-se selecionar um material que atenda a essa solicitação e apresente as características de deformação elástica além de possuir a menor massa possível.

Nota-se que esse caso é típico de um componente que deva exibir razoável resistência e rigidez além de possuir a menor massa possível. Os passos para a seleção de materiais são basicamente quatro (ASHBY, 2011), quais sejam: (a) determinar a função do componente; (b) quais aspectos ou condições são negociáveis e inegociáveis; (c) o que deve ser maximizado ou minimizado e (d) quais parâmetros do projeto o projetista tem liberdade para modificar.

No caso em tela, não é possível a determinação da função do componente, mas ao que parece, ele será utilizado para esforços de natureza tratativa. Como aspecto negociável, partir-se-á do pressuposto de que o diâmetro da secção transversal seja negociável e que o item inegociável seja o comprimento do componente. Desse modo, a tensão atuante no componente, σ , em MPa, pode ser descrita por:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

na qual F é a força aplicada, em N e A é a área da secção transversal, em m². Como a área da secção transversal circular é dada por

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2)$$

onde D é o diâmetro da secção transversal, em m, ao combinar (2) com (1), vem:

$$\sigma = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (3)$$

O módulo de elasticidade, E, em GPa, por sua vez, é dado por:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

no qual ε é a deformação elástica do componente, dada por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell_0} \quad (5)$$

onde $\Delta \ell = \ell_f - \ell_0$ com ℓ_f e ℓ_0 sendo os comprimentos final e inicial, respectivamente, em m. Ao combinar as Equações (4) e (3), tem-se que:

$$E = \frac{4F}{\varepsilon \pi D^2} \quad (6)$$

A densidade, por sua vez, pode ser expressa por:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{A\ell} \quad (7)$$

onde m é a massa, em kg, e V , o volume do componente, em m^3 que por sua vez pode ser expresso na multiplicação da área da secção transversal A , em m^2 , pelo comprimento ℓ , em m. Para se ter a máxima resistência e máxima rigidez com a mínima massa, deve-se combinar a Equação (7) com a (6). Desse modo, vem:

$$\frac{E}{\rho} = \frac{4F}{\varepsilon \pi D^2} \cdot \frac{A\ell}{m}, \text{ mas da Equação (2), vem: } \frac{E}{\rho} = \frac{4F}{\varepsilon \pi D^2} \cdot \frac{\pi D^2 \ell}{4m}. \text{ Então simplificando e}$$

isolando a massa, tem-se o primeiro índice de mérito $\frac{\rho}{E}$ que deve ser minimizado ou $\frac{E}{\rho}$, que deve ser maximizado:

$$m = \frac{F\ell}{\varepsilon} \cdot \frac{\rho}{E} \quad (8)$$

É possível também a determinação de um segundo índice de mérito $\frac{\sigma}{\rho}$ que maximize a resistência e minimize a massa por intermédio da combinação das Equações (3) e (7):

$$m = F\ell \cdot \frac{\rho}{\sigma} \quad (9)$$

Os índices de mérito mostrados em (8) e (9) podem então ser utilizados nos mapas de Ashby (2011) na seleção de materiais. Em ambos os casos, os expoentes desses índices é 1 na linha-guia de $\left(\frac{E}{\rho}\right)^n$ ou ainda $\left(\frac{\sigma}{\rho}\right)^n$ como será visto a seguir.

mapa é, na realidade, constituído de inúmeros balões menores que correspondem a diversas famílias de materiais. Por exemplo, na região intermediária é possível notar a presença dos materiais poliméricos (PP, PE etc.). O balão maior não é, portanto, o conjunto união desses balões menores, mas sim o espectro de variação das propriedades dos materiais de uma mesma classe, no caso os materiais poliméricos.

Outro ponto importante observado nessa Figura 4 é a presença de diversas linhas-guias para projetos com mínima massa. Dependendo da solicitação, pode-se usar diferentes linhas-guias para se ter um projeto com mínima massa; qualquer material que for interceptado por essa linha-guia possui a mesma relação de índice de mérito, o que significa que pode ser utilizado para uma mesma aplicação. Entretanto, ela tem de ser transladada para a extremidade esquerda do mapa com vistas a se ter o menor valor de densidade. Para o caso investigado como esclarecimento dessa metodologia, sabe-se da Equação (8) que:

$$m = \frac{F\ell}{\varepsilon} \cdot \frac{\rho}{E}$$

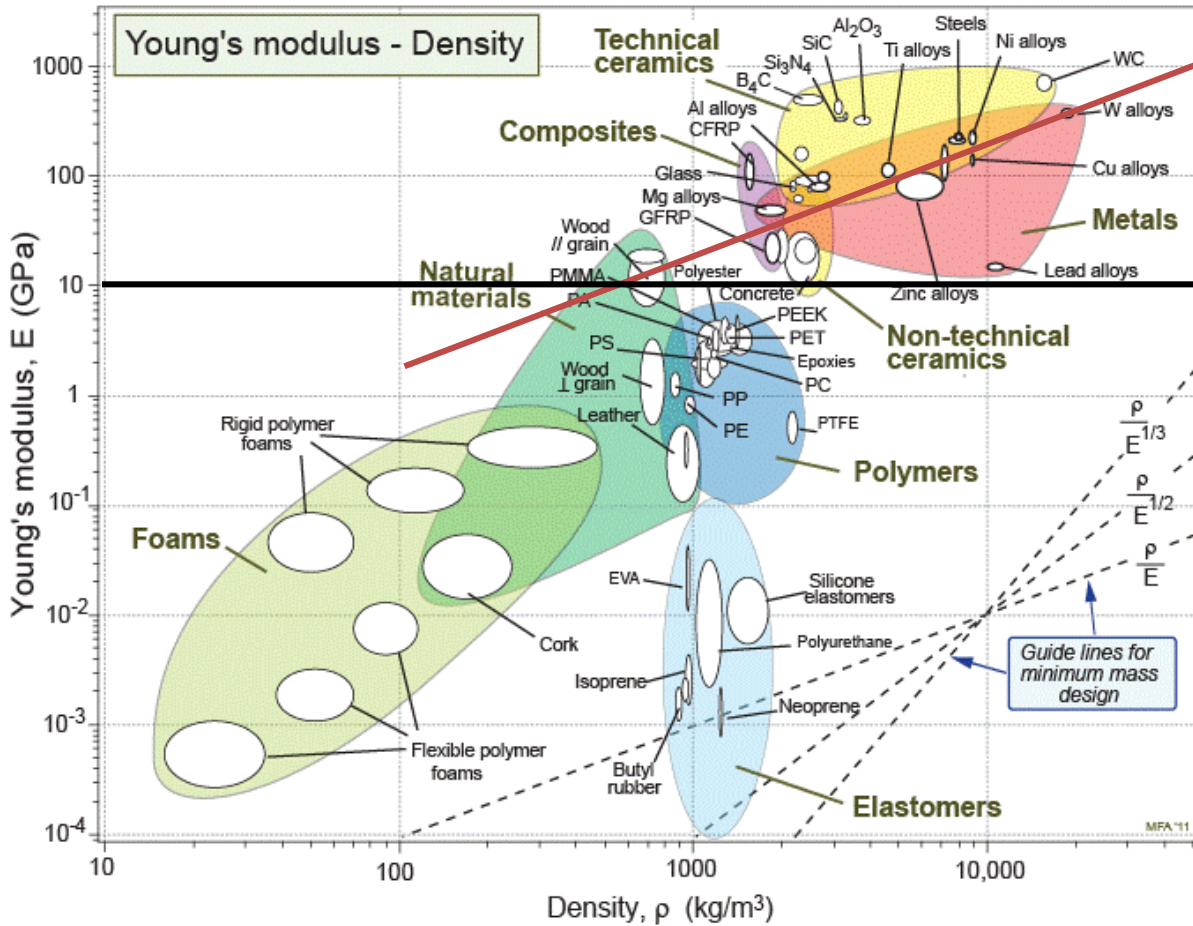
e que, portanto, o índice que se deseja investigar é aquele cujo expoente é igual a 1. Substituindo os valores de F, 90 kN; ℓ , 80 cm, D, 2,4 cm e ε , 0,02 e uniformizando as unidades para o sistema internacional, segue-se que:

$$E = \frac{4F}{\varepsilon\pi D^2} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{4 \cdot 90 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^{-2} (24 \cdot 10^{-2})^2} = 9,9 \cdot 10^9 \text{ Pa} \cong 10 \text{ GPa}$$

Ao traçar uma reta horizontal na Figura 4 que corresponda ao valor mínimo de 10 GPa, nota-se que todos os materiais abaixo dessa reta não atendem à solicitação do eixo e, portanto, são descartados. No programa propriamente dito, os balões ficam na cor cinza e deixam de ser considerados na análise. Manualmente, nota-se que somente os materiais acima dessa reta, tais como a madeira (sentido paralelo às fibras), o polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP), ligas de alumínio (Al alloys), por exemplo, atendem às exigências. Contudo, os materiais com menor densidade devem ser escolhidos já que se deseja a mínima massa possível; isso pode ser conseguido com o uso da linha-guia, o que é mostrado na Figura 5.

Nota-se pela Figura 5 que a linha-guia demonstra que os materiais interceptados por essa reta possuem o mesmo índice de mérito, ou seja, todos esses materiais possuem o mesmo valor da razão do módulo de elasticidade pela densidade e, portanto, podem ser escolhidos para a aplicação. Contudo, para se maximizá-lo, há de se escolher o material mais à esquerda, o que significa escolher a madeira (sentido paralelo às suas fibras).

Figura 5 – Mapa de Ashby (2011) que mostra a relação entre o módulo de elasticidade (*Young's modulus*), em GPa, e a densidade, em $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, a linha-guia em vermelho para o caso em tela – Equação (8) – e a linha preta que mostra o mínimo módulo de elasticidade solicitado.



Fonte: Ashby (2011).

A análise, entretanto, não está finalizada porque o índice de mérito faltante, Equação (9), também deve ser atendido. Desse modo, outro mapa, dessa vez a relação entre a resistência e a densidade deve ser plotado. Isso é feito na Figura 6, a seguir. Ela mostra uma linha vermelha que corresponde ao índice de mérito a ser utilizado na seleção do material para a aplicação já mencionada. À semelhança do que foi feito para a Figura 5, essa linha indica que qualquer material que for interceptado por essa reta terá a mesma relação de resistência pela massa ou densidade.

Lembrando os valores de F, 90 kN; ℓ , 80 cm, D, 2,4 cm e ϵ , 0,02 e uniformizando as unidades para o sistema internacional, é possível obter a resistência mínima que o material deve possuir para atender à solicitação, como visto abaixo:

$$\sigma = \frac{4F}{\pi D^2} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{4.90.10^3}{(24.10^{-2})^2} = 199,9.10^6 \text{ Pa} \cong 200 \text{ MPa}$$

Uma linha reta preta foi traçada na Figura 6. Qualquer material abaixo dessa reta não atenderá às exigências. Nota-se nesse momento que o material outrora escolhido, ainda que preliminarmente, a madeira (sentido paralelo às suas fibras), não atende à nova solicitação e, portanto, deixa de ser avaliada. O próximo material que poderia ser escolhido e possui baixa densidade seriam as ligas de magnésio (Mg alloys); porém, há outro material ainda mais leve que esse e que atende à solicitação, o polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP).

O polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP) possui uma resistência de 1000 MPa e densidade de apenas cerca de 1700 kg.m^{-3} , como pode ser visto na Figura 6. Ao examinar seu módulo de elasticidade, Figura 5, nota-se que ele vale cerca de 100 GPa e, portanto, também atende ao valor mínimo de elasticidade. Desse modo, o valor da massa pode ser calculado pela Equação (8):

$$m = \frac{F\ell}{\varepsilon} \cdot \frac{\rho}{E} = \frac{90.10^3.80.10^{-2}}{2.10^{-2}} \cdot \frac{1500}{10.10^9} = 0,540 \text{ kg}$$

Ou ainda, de acordo com a Equação (9), vem:

$$m = F\ell \cdot \frac{\rho}{\sigma} = 90.10^3.80.10^{-2} \cdot \frac{1500}{200.10^6} = 0,540 \text{ kg}$$

Esse valor pode, no entanto, ser diminuído caso se utilize nas Equações (8) e (9) as propriedades desses materiais e não o módulo de elasticidade mínimo exigido assim como a resistência solicitada. Nesse caso, o valor das massas pode ser recalculado como:

$$m = \frac{F\ell}{\varepsilon} \cdot \frac{\rho}{E} = \frac{90.10^3.80.10^{-2}}{2.10^{-2}} \cdot \frac{1500}{100.10^9} = 0,0540 \text{ kg}$$

$$m = F\ell \cdot \frac{\rho}{\sigma} = 90.10^3.80.10^{-2} \cdot \frac{1500}{1000.10^6} = 0,108 \text{ kg}$$

Desses dois valores, a massa escolhida será a segunda já que a secção transversal será modificada para

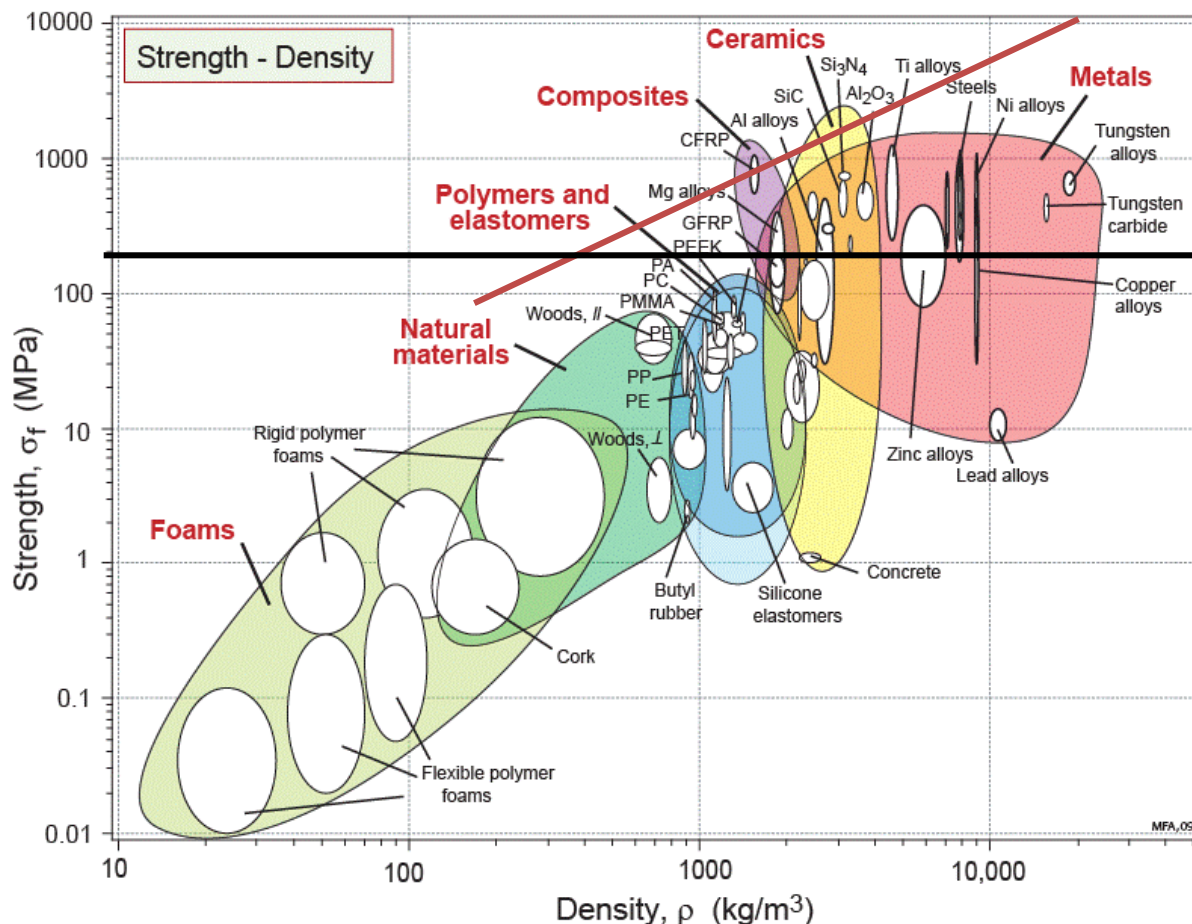
$$\sigma = \frac{F}{A} \therefore A = \frac{F}{\sigma} = \frac{90.10^3}{1000.10^6} = 0,00009 \text{ m}^2 = 90 \text{ mm}^2 \text{ e ainda } A = \frac{\pi D^2}{4}, \text{ então:}$$

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4.90}{\pi}} = 10,7 \text{ mm}$$

Ou seja, o diâmetro preliminar, de 2,4 cm, foi reduzido para cerca de 1 cm, atendendo às solicitações e reduzindo e tendo a menor massa possível, cerca de 100 g.

A presente análise pode ser incrementada com a adoção de outras variáveis, como o preço do material por quilograma ou ainda a variável ECO Design, explorada no próximo item.

Figura 6 – Mapa de Ashby (2011) que mostra a relação entre a resistência (*strength*), em MPa, e a densidade, em $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, a linha-guia em vermelho para o caso em tela – Equação (9) – e a linha preta que mostra a mínima resistência para esse caso.



Fonte: Ashby (2011).

1.3 A OPÇÃO ECO DESIGN

Um projeto envolvendo a opção ECO Design (ASHBY, 2011, 2015) pode ser definido como aquele cuja seleção de materiais leva em conta os impactos ambientais e analisa cenários hipotéticos (conhecidos como what-if scenarios), tipicamente nos seus estágios iniciais. Sabe-se que cerca de 80% do impacto ambiental de determinado produto se dá no estágio de projeto e, portanto, é possível nessa etapa levar em conta o material propriamente dito e o desenho (ou projeto ou design) de modo a permitir a minimização dos impactos ambientais assim como seu custo.

O propósito, portanto, é semelhante ao que foi descrito anteriormente, com a diferença nesse caso que deve-se levar em conta a substituição por outros materiais (alternativos), menos impactantes para o meio ambiente, porém que atendam às exigências tanto técnicas como econômicas.

A variável ECO Design é composta de diversos itens, entre eles: RoHS Compliance,² energia de produção primária (carbono e água), energia consumida no processamento (pegada de carbono CO₂) e a reciclagem ou ciclo de vida (recuperação) (ASHBY, 2011). De posse dos materiais previamente escolhidos, é possível, por intermédio do programa CES Selector for ECO Design (GRANTA DESIGN, 2015b), o detalhamento de cada um desses itens como por exemplo a porcentagem reciclada, quais são os processos primários e os secundários para se chegar ao produto propriamente dito (CES... 2014).

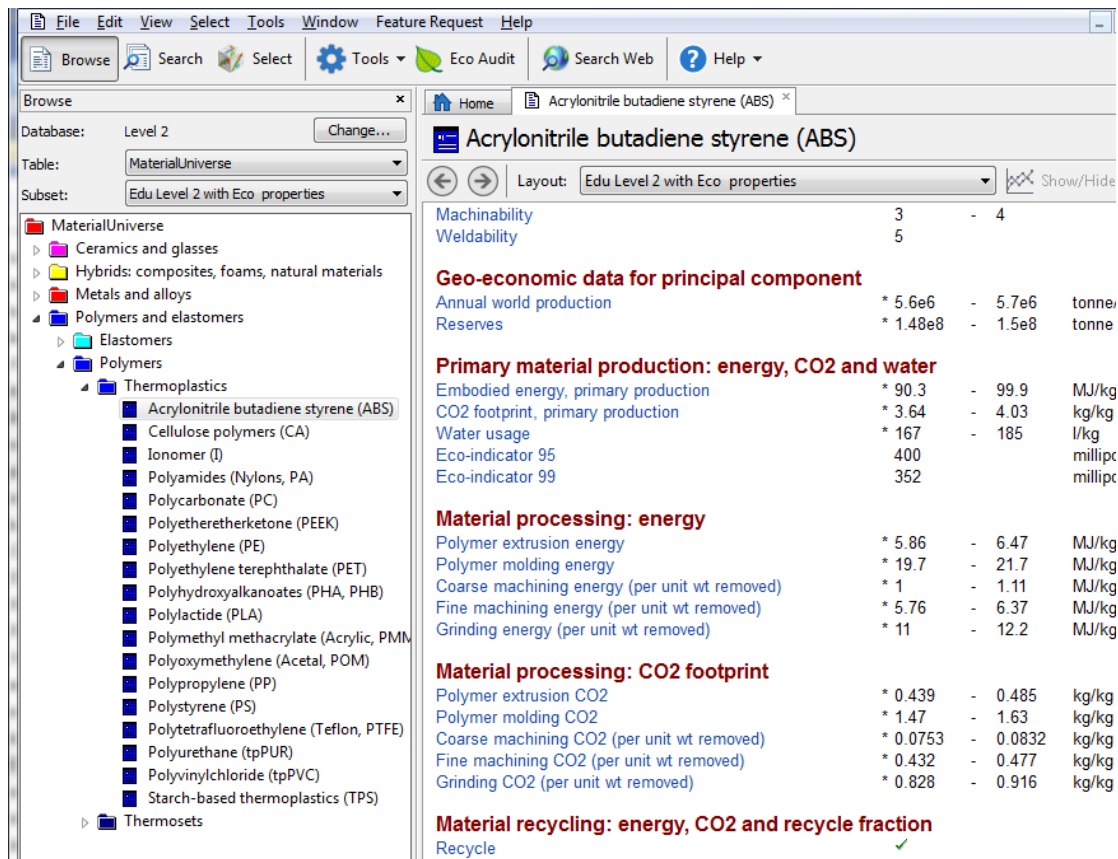
É possível ainda a inclusão da variável de transporte, ou seja, qual o tipo de transporte utilizado para o envio do material, a vida do produto, se ele será utilizado em algum veículo automotivo que consome combustível ou a quantidade de energia necessária para seu uso. Isso pode ser visto, de maneira esquemática na Figura 7.

Todas essas variáveis são então plotadas na forma de gráficos como a energia, em MJ, em função dos itens material, manufatura, transporte, uso, descarte e potencial ecológico (CES... 2014). De posse dessas características, o programa é capaz de identificar possíveis materiais alternativos que pode mostrar, por exemplo a massa relativa por unidade de resistência em um dos eixos do mapa e o custo relativo por unidade de resistência em outro.

A opção ECO Design trabalha, portanto, com uma ferramenta denominada ECO Audit Tool (CES... 2014) a qual consiste em três etapas: verificação da quantidade de CO₂ e de energia consumidas nas diversas etapas de produção, quais sejam: a matéria prima, o processo, a massa e fim da vida (reciclagem etc.); o transporte nos diversos estágios de produção e a fase de uso propriamente dita.

² RoHS Compliance (restriction of the use of certain hazardous substances) é uma diretiva presente nos países da União Europeia que tem como objetivo a restrição de certas substâncias perigosas e comumente usadas em equipamentos eletrônicos (UNITED KINGDOM, 2014). Um componente que atende a RoHS é testado quanto a presença de chumbo (Pb), cádmio (Cd), mercúrio (Hg), cromo hexavalente (Hex-Cr), polibrominado bifeno (PBB) e polibrominado difenol éter (PBDE). As porcentagens variam dependendo da substância tratada.

Figura 7 – Tela do CES Selector para o material ABS (acrilonitrila butadieno estireno) com os dados concernentes ao ECO Design, ou seja, dados geoeconômicos.



Fonte: Ashby (2015).

Um exemplo de aplicação dessa ferramenta é analisado a seguir, trata-se de um recipiente para armazenar líquidos (ASHBY, 2012). Poder-se-ia utilizar os materiais vidro, polietileno, PET, alumínio e aço, todos com algum potencial de reciclagem. Tais materiais consomem a maior parte de energia nas etapas de produção e de fabricação do produto, gerando a maior parte das emissões de CO₂. Para que se possa minimizar a energia e as consequentes emissões de gás, são essas as fases que devem ser preliminarmente avaliadas. Os requisitos para cada um desses materiais, de acordo com a estratégia estabelecida no item 1.1 desse projeto, são: (a) a função é armazenar uma bebida, por exemplo, água mineral; (b) a restrição principal é a reciclabilidade; (c) minimizar a energia incorporada por unidade de capacidade e (d) escolha do material como a variável a ser investigada (livre escolha). Os detalhes dos recipientes podem ser observados na Tabela 1, a seguir. Nota-se que dos materiais apresentados, aquele que possui a menor energia acumulada por litro de bebida é o aço ao carbono comum, com um valor de 2,4 MJ.L⁻¹ enquanto o maior valor foi o de alumínio, com 9,0 MJ.L⁻¹. Além disso, os dados da energia necessária para a conformação mecânica podem ser vistos na Tabela 2. A comparação

desses dados permite concluir inicialmente que a energia necessária para conformação é sempre menor que aquela para a produção do material, exceto no caso do vidro. Em seguida, é possível entender a última coluna da Tabela 1, que é resultado da soma das duas energias (incorporada e consumida na conformação) multiplicada pela massa do recipiente por litro, o que permite depreender que a lata de aço é aquela que consome menos energia por unidade de volume.

Tabela 1 – Detalhes dos recipientes com a massa necessária para a armazenagem de diferentes quantidades de bebidas, a massa de cada recipiente e a energia acumulada por litro.

Tipo	Material	Massa (g)	Massa.litro⁻¹ (g.L⁻¹)	Energia.litro⁻¹ (MJ.L⁻¹)
Garrafa PET, 400 ml	PET	25	62	5,4
Garrafa de leite PE, 1 L	PE de alta densidade	38	38	3,2
Garrafa de vidro 750 mL	Vidro de soda	325	433	8,2
Lata Al 440 mL	Liga série 5000	20	45	9,0
Lata aço 440 mL	Aço ao carbono	45	102	2,4

Fonte: Ashby (2012).

Tabela 2 – Dados para os materiais dos recipientes para bebidas, a energia incorporada por quilograma, o método de conformação e a energia consumida nessa etapa, em MJ.kg⁻¹.

Material	Energia incorporada (MJ.kg⁻¹)	Método de conformação	Energia de conformação (MJ.kg⁻¹)
PET	84	Moldagem	3,1
PE de alta densidade	81	Moldagem	3,1
Vidro de soda	15,5	Moldagem	4,9
Liga série 5000	210	Estampagem	0,13
Aço ao carbono	32	Estampagem	0,15

Fonte: Ashby (2012).

Caso houvesse uma multa por conta da energia consumida, o material que possuiria a menor multa seria, portanto, o aço ao carbono comum. Há de se levar em conta que essa análise foi utilizada nesse item apenas como exemplo e que outras restrições como por exemplo o preço por unidade de produto ou mesmo propriedades químicas como a resistência à corrosão etc. não foram avaliadas e que, certamente, podem afetar a sua conclusão.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho tem por objetivo criar uma estratégia para o uso da opção ECO Design na disciplina Materiais Metálicos do curso de engenharia mecânica do Centro Universitário da FEI. Apesar de a metodologia de seleção de materiais de Ashby ser explorada em pormenor na aula 10 dessa disciplina, parece interessante tanto para o aluno como para o currículo ou o perfil profissiográfico do engenheiro mecânico o conhecimento de ferramentas mais sofisticadas de seleção de materiais.

Por essa razão, o presente trabalho pretende investigar o produto *cadeira*, bastante comum ao dia a dia do aluno na análise da opção ECO Design. Para isso, o produto deve obedecer aos padrões de ergonomia estabelecidos pela norma NR-17 (SECRETARIA DE INSPEÇÃO DO TRABALHO – SIT, 2002) e ser feito de um único material, por questões de simplicidade, se for possível.

O levantamento das solicitações mecânicas, físicas e químicas assim como as restrições impostas ao projeto será feito por intermédio de uma pesquisa aos principais fornecedores assim como por meio do levantamento dos respectivos índices de mérito.

De posse desses índices de mérito, diversos diagramas de materiais de Ashby serão levantados e analisados com vistas à seleção de materiais que atendam às exigências e que possuam como restrições preliminares apenas as dimensões principais e o preço.

Em seguida, a opção ECO Design será investigada de modo que outros mapas ou diagramas sejam levantados para se ter a seleção de um material ou materiais alternativos que atendam às exigências, mas que possuam o menor valor de energia consumida por unidade produzida ou por quilograma produzido.

De posse desses resultados pelas duas abordagens, há de se comparar os resultados e mostrar a possibilidade da criação de um selo ecológico ou amigável com o meio ambiente (environmentally friendly) que permita ao consumidor em futuro próximo distinguir de maneira tácita a quantidade de energia ou de emissões de gases CO₂ quando da escolha de determinado produto.

A estratégia será testada, por fim, em sala de aula, com a criação de um grupo temático no qual os alunos da disciplina poderão investigar o potencial da análise, analisar e criticar a metodologia proposta por Ashby (2012). Além disso, os alunos poderão desenvolver competências e habilidades com o trabalho em grupo no momento da seleção de materiais em projetos mecânicos, de modo geral.

3. OBJETIVOS

O presente projeto tem diversos objetivos, classificados como geral e específicos, descritos a seguir. Em ambos os casos, o aluno terá oportunidade de desenvolver um trabalho mais aprofundado de investigação não somente do programa CES Selector propriamente dito, mas sim do potencial que ele tem para a seleção sistemática de materiais.

3.1. Objetivo Geral

O presente projeto tem como objetivo geral a criação de uma estratégia para o aprendizado eficaz ou eficiente da ferramenta de ECO Design do programa CES Edupack ou CES Selector da Granta Design (2016) para os alunos do curso de engenharia mecânica, na disciplina de Materiais Metálicos.

3.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desse projeto podem ser subdivididos com relação à área de atuação, quais sejam: o aluno do projeto de iniciação didático-científica e os desdobramentos desse projeto, para os alunos do curso de engenharia mecânica. Com relação ao aluno Felipe Mesquita Ramos, pode-se afirmar que:

- Desenvolver a competência e habilidade de investigar um caso específico para a seleção de materiais com vistas à melhor escolha para uma dada aplicação, levando em conta restrições de natureza mecânica, física ou química, além das impostas pelo mercado ou pelo consumidor;
- Desenvolver a competência de utilização do programa CES Selector e CES Edupack no nível de usuário com uso intensivo da opção ECO Design e ECO Audit Tool tendo em vista a medida de eficiência na resposta para os demais alunos do curso;
- Desenvolver as competências requeridas em trabalhos de nível acadêmico e de caráter científico com foco em resultados a serem divulgados para a comunidade acadêmica brasileira, em congressos ou simpósios de iniciação científica.

Com relação aos alunos do curso de engenharia mecânica, os objetivos específicos do presente projeto são:

- Investigar a eficiência no aprendizado da metodologia de seleção de materiais, mais especificamente na opção ECO Design e ECO Audit Tool, em um caso concreto, amplamente investigado e que será trabalhado em ambiente controlado no laboratório de informática da própria instituição;
- Elaborar um relatório com as principais sugestões e críticas para a melhoria na eficiência do aprendizado desse item na disciplina;
- Sistematizar a implantação desse modelo na aula 10 da disciplina de Materiais Metálicos, ouvidas a Coordenadoria Departamental e o Colegiado de Curso.

4. RESULTADOS ESPERADOS

Os resultados esperados com o desenvolvimento desse trabalho são basicamente a construção de um método eficiente para o aprendizado do item *sustentabilidade* no currículo do curso, mais especificamente na área de materiais metálicos. Por eficiente, entende-se que seja um processo no qual o aluno desenvolve a capacidade de utilizar de maneira rotineira a seleção de materiais levando em conta os aspectos ambientais tais como a energia consumida por unidade de produto e tenha ciência bastante clara da importância estratégica em futuro próximo desse conhecimento.

Também espera-se com esse trabalho o desenvolvimento de outros estudos de caso que possam ser investigados em ambiente de sala de informática do Centro Universitário da FEI para que esse conhecimento seja compartilhado com outros alunos dos cursos de engenharia mecânica e de materiais na substituição de materiais em produtos que tenham de atender os requisitos de larga escala, eficiência na produção e inovação, como salientado por Duke (ECO:NOMICS:... 2014).

Candidato: Felipe Mesquita Ramos – número de matrícula 11.113.001-9

5. PLANO DE TRABALHO DO BOLSISTA

As atividades descritas a seguir representam o plano de trabalho do bolsista Felipe Mesquita Ramos, número de matrícula 11.113.001-9. Esse aluno possui conhecimento avançado de inglês, com 9 anos de estudo; possui os seguintes certificados pela Universidade de Cambridge: First Certificate in English (FCE) e o Certificate of Advanced English (CAE) e almeja ter mais conhecimento em inglês técnico, estando apto a utilizar o software em inglês e ajudar na tradução de material didático, se necessário. Além disso, possui conhecimento intermediário na área computacional e é utilizador de plataformas de produtividade e gerenciamento de projetos como Trello, Slack, Google Drive etc. O aluno mostra-se capaz de montar uma plataforma organizada para gerenciar o projeto para assistência remota robusta ou manter uma plataforma mais simples para sincronia de dados. Tendo em vista esse perfil, são as seguintes as atividades a serem desenvolvidas.

1. Conhecimento das dependências do laboratório de informática que o aluno deverá atuar no desenvolvimento do estudo de caso;
2. Assistir aos seminários na rede mundial de computadores (Webinars) oferecidos gratuitamente pela Granta Design (o aluno já está inscrito em um webinar a ocorrer em 9 de dezembro p.f.);
3. Leitura do livro de Michael F. Ashby que trata da seleção de materiais e sua metodologia, com os exemplos voltados para a opção ECO Design;
4. Desenvolver plataforma de produtividade para acompanhamento remoto das atividades de iniciação didático-científica;
5. Investigação das condições impostas pelo mercado para o produto do estudo de caso, com levantamento das solicitações mecânicas, físicas e químicas assim como das restrições de caráter ergonômico e de preço;
6. Criação do estudo de caso com a opção ECO Design e ECO Audit Tool com levantamento dos problemas enfrentados e as dúvidas oriundas dessa criação;
7. Criação da estratégia para implantação de um workshop oferecido aos alunos do sexto semestre do curso de engenharia mecânica, período diurno, ou sétimo semestre do curso de engenharia mecânica, período noturno, a ocorrer no segundo semestre de 2015;

8. Coletar os resultados das entrevistas oriundas do workshop oferecido aos alunos, com levantamento de sugestões de melhoria, críticas e ações possíveis de serem alcançadas em próximas versões do workshop;
9. Preparação de artigos visando a apresentação em Congresso Nacional na área ou em Simpósios de Iniciação Científica, particularmente do Centro Universitário da FEI.

Candidato: Felipe Mesquita Ramos

As atividades descritas anteriormente estão resumidas no cronograma mostrado na Tabela 3, a seguir.

Tabela 3 – Cronograma de atividades a serem desenvolvidas pelo candidato à bolsa de iniciação didático-científica do Centro Universitário da FEI.

Atividade	Mês											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	■											
2	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
3	■	■	■									
4		■	■									
5	■	■	■	■	■							
6			■	■	■	■	■	■	■	■		
7							■	■				
8									■	■	■	
9											■	■

Fonte: Autor (2015).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHBY, Michael F.. On the engineering properties of materials. **Acta Metallurgica**, [s.l.], n. 5, p.1273-1293, 1989.

ASHBY, Michael F.. Materials and the Environment. In: ASHBY, Michael F.. **Materials Selection in Mechanical Design**. 4. ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2011. Cap. 16. p. 417-438.

ASHBY, Michael F.. Materiais e o ambiente. In: ASHBY, Michael F. [tradução de Arlete Simille]. **Seleção de Materiais no Projeto Mecânico**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. Cap. 15. p. 401-420.

ASHBY, Michael F.. **Eco-selection and the Eco Audit tool**: Cambridge: Granta Teaching Resources, 2015. 27 slides, color.

BRASIL. Congresso. Câmara dos Deputados. Lei Ordinária nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Lei 6.938/1981 (lei Ordinária) 31/08/1981**. Brasília, DF, 2 set. 1981. p. 16509. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm>. Acesso em: 7 dez. 2015

BRASIL. Congresso. Câmara dos Deputados. Lei Ordinária nº 10.165, de 27 de dezembro de 2000. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Lei 10.165/2000 (Lei Ordinária) 27/12/2000**. Brasília, DF, 28 dez. 2000. p. 1. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l10165.htm>. Acesso em: 7 dez. 2015.

CES Selector for Eco Design. Produção de Granta Design. 2014. (4.00 min.), Streaming video, son., color. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=pCyciyf4U3g>>. Acesso em: 8 dez. 2015.

ECO:NOMICS: Will Consumers Pay For Sustainability?. Santa Barbara: Wall Street Journal, 2014. (2.49 min.), Streaming video, son., color. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Zsh9rwjbae0>>. Acesso em: 8 dez. 2015.

EUROPEAN COMISSION. EUROPEAN COMISSION. . **Climate Action**: Reducing emissions from transport. 2015. Disponível em: <http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/index_en.htm>. Acesso em: 7 dez. 2015.

GRANTA DESIGN (Cambridge). **Granta's History and Technology Leadership**. 2015a. Disponível em: <<http://www.grantadesign.com/company/history.htm>>. Acesso em: 8 dez. 2015.

GRANTA DESIGN (Cambridge). **Granta CES2016 Selector**. 2015b. Disponível em: <<http://www.grantadesign.com/products/ces/index.htm>>. Acesso em: 8 dez. 2015.

GRANTA DESIGN (Cambridge). **Granta CES2016 Selector**. 2015c. Disponível em: <<http://www.grantadesign.com/education/mat-network/index.htm>>. Acesso em: 8 dez. 2015.

JOYCE FEGAN. Business World. **Investors starting to bet big on green.** 2015. Disponível em: <<http://www.independent.ie/business/world/investors-starting-to-bet-big-on-green-34262298.html>>. Acesso em: 7 dez. 2015.

MATT MCGRATH (BBC News) (Org.). **COP21: Carbon emissions 'to stall or even decline' this year.** 2015. Disponível em: <<http://www.bbc.com/news/science-environment-35029962>>. Acesso em: 7 dez. 2015.

SECRETARIA DE INSPEÇÃO DO TRABALHO – SIT. Ministério do Trabalho (Ed.). **Manual de Aplicação da Norma Regulamentadora NR-17.** 2. ed. Brasília: Ministério do Trabalho, 2002. 95 p. Disponível em: <http://www3.mte.gov.br/seg_sau/pub_cne_manual_nr17.pdf>. Acesso em: 8 dez. 2015.

UNITED KINGDOM. NATIONAL MEASUREMENT & REGULATION OFFICE. . **RoHS: compliance and guidance:** Business and Enterprise - Guidance. 2014. Disponível em: <<https://www.gov.uk/guidance/rohs-compliance-and-guidance>>. Acesso em: 8 dez. 2015.