

GABRIEL RUBIN DE LIMA

**AVALIAÇÃO DE UM MÉTODO DE SELEÇÃO DE MATERIAIS:
QUADRO DE BICICLETA**

**SÃO PAULO
2007**

GABRIEL RUBIN DE LIMA

**AVALIAÇÃO DE UM MÉTODO DE SELEÇÃO DE MATERIAIS:
QUADRO DE BICICLETA**

Trabalho de Formatura apresentado ao
Departamento de Engenharia de Materiais e
Metalurgia da Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo.

Áreas de Concentração:
Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Seleção de materiais

Orientador:
Prof. Dr. Cesar Roberto de Farias Azevedo

**SÃO PAULO
2007**

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo minha família, que sempre esteve ao meu lado em todas as situações da minha vida, especialmente meus pais e minha irmã mais velha, Sr. Alfredo Santana de Lima, Sra. Angela Maria Rubin de Lima e Sra. Mariana Rubin de Lima, respectivamente.

Ao professor Cesar R. F. Azevedo, pela paciência e dedicação.

Aos amigos "Xumbrega" e "Zelão", que me motivaram a chegar nesta etapa.

A todos os alunos, professores e funcionários do PMT, que agüentaram minhas histórias e compartilharam alegrias e tristezas.

Ao "Pena", pela amizade e credibilidade.

RESUMO

Realizou-se uma avaliação de um método de seleção de materiais para componentes de engenharia, desenvolvido por Ashby, através do estudo de um caso: quadro de bicicleta. Foram variadas as condições de contorno e os objetivos de projeto, para investigar seu efeito sobre a seleção de materiais. Dentro deste foco, o efeito da introdução de objetivos de cunho ambiental, em detrimento de questões meramente econômicas e de eficiência, também foi estudada. Utilizou-se o software educacional GRANTA CES 2007 EDUPACK desenvolvido no Departamento de Eng. Mecânica da Universidade de Cambridge. Concluiu-se o sucesso do método depende da definição das variáveis restritivas e dos objetivos do projeto. Do ponto de vista mais operacional, o software apresenta uma interface simples e cumpre bem seu objetivo (manipulação de um banco de dados de propriedades de cerca de 130.000 materiais através de operações de filtragem e classificação). Notou-se que algumas etapas do fluxograma de operação do software podem ser melhoradas, como, por exemplo, a introdução de uma ferramenta para traçar a linha de *trade-off* e um modo mais simples de traçar a função *penalty*. Finalmente, foi interessante observar como a introdução de um objetivo ambiental deslocou a escolha do material do quadro da bicicleta para aço. O uso de algumas variáveis ambientais, como, por exemplo, emissão de CO₂ deve ser adaptada à matriz energética local.

Palavras-chave: Seleção de materiais; quadro de bicicleta; Ashby; GRANTA CES 2007 EDUPACK.

ABSTRACT

An evaluation of Ashby's materials selection method has been performed, using the design of a bicycle frame. The project concept (design restrictions and goals) was varied to show how it affects the final material selection. In this sense, an eco-design objective was considered along with the usual economical and efficiency design targets. The evaluation was carried out using the GRANTA CES 2007 EDUPACK (materials selection software developed in Department of Mechanical Engineering of Cambridge University). The results proved that the software is very useful, as long as the process of translating the design requirements is reliable. Operationally, the software's working interface is rather simple but few major deficiencies were observed (plot of both the trade-off line and penalty function). Finally, during the selection of the bicycle frame material, the introduction of eco-design objectives shifted the materials choice to steel. Some of the eco-design parameters should be analysed with care, such as the amount of CO₂ emission, which depends, among other things, on the local energy matrix.

Key-words: Material Selection, bicycle frame, Ashby methods, GRANTA CES 2007 EDUPACK.

“NUNCA É TARDE PARA FAZER A COISA CERTA”.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 MÉTODO DE ASHBY.....	3
2.2 BANCO DE DADOS / SOFTWARE.....	16
2.3 ECO-DESIGN.....	31
2.4 QUADRO DE BICICLETA.....	35
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	41
3.1 CASO A.....	41
3.2 CASO B.....	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
4.1 CASO A.....	44
4.2 CASO B.....	49
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	55
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

A seleção de materiais é um processo que decorre da antiguidade e seu uso pode ser evidenciado desde o tempo do “homem da caverna”, quando a escolha variava entre madeira, pedras e ossos, basicamente. A descoberta de novos materiais foi decisiva ao longo da história, como no caso do uso dos metais para fabricação de ferramentas. Outra evidência histórica do uso de seleção de materiais está na arte, já que os artistas selecionavam os materiais mais adequados para suas esculturas e pinturas de acordo com as características naturais como o brilho, cor e textura superficial. A grande atividade no mundo da ciência dos materiais foi alavancada pela revolução industrial, pela corrida armamentista e pelo desenvolvimento aeroespacial, criando uma vasta variedade de produtos, materiais e processos [1-5]. A seleção de materiais baseava-se na análise qualitativa dos materiais e processos, considerando basicamente o histórico de uso e restringindo o uso de novos materiais. No entanto, para lidar com esse universo de escolhas cada vez mais complexo, a seleção de materiais assumiu um caráter mais quantitativo. Este processo baseia-se na relação existente entre as condições de uso do componente e as propriedades desejadas para o material. A seleção de materiais ocorre, desta forma, pela simples “manipulação” de bancos de dados de propriedades de materiais e processos, a partir das restrições impostas pelas condições de contorno e pelos objetivos do projeto [1-5].

As diversas etapas de um projeto são mostradas na figura 1. Desde a identificação de uma necessidade de mercado para um produto até a sua produção, várias propriedades (materiais e processo) precisam ser definidas, sendo que muitas vezes este é um longo processo iterativo. Para cada etapa da figura 1, é essencial a disponibilidade de informações dos materiais e processos, sendo que do topo para a base há uma necessidade crescente de informações cada vez mais precisas e detalhadas. A seleção do material está atrelada de maneira iterativa com a escolha do processo utilizado para a sua fabricação e também com sua geometria. Na elaboração de projetos existe uma grande necessidade de participação de uma equipe multidisciplinar (marketing, projetistas mecânicos, engenheiros de produção e de materiais, etc). A boa sinergia entre a funcionalidade do projeto, o material, o processo e a geometria promove o sucesso do produto [1,3-7].

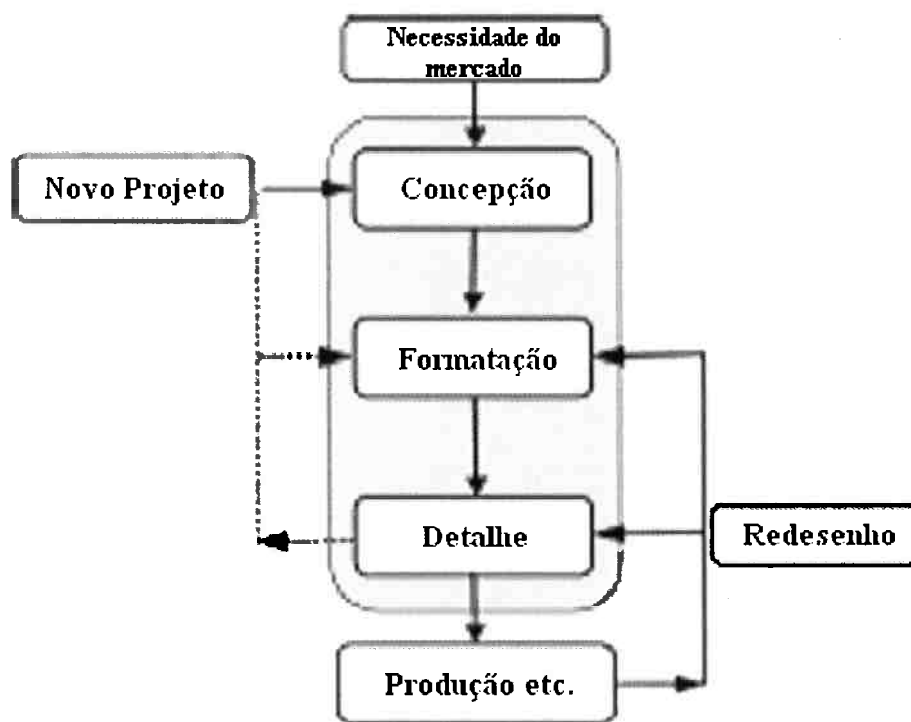


Figura 1: Fluxograma mostrando etapas da execução de um projeto. Informações a respeito dos materiais e dos processos de fabricação são necessárias em cada etapa, sendo que de cima para baixo há um aumento no número de detalhamento das propriedades do material [6].

O presente trabalho objetiva avaliar um método de seleção de materiais desenvolvido pelo Prof. Ashby, aplicado a um caso de seleção de materiais para um quadro de bicicleta. Será usado o CES software (*Cambridge Engineering Selector*), que permite a manipulação de um banco de dados de propriedades de materiais e processos, de modo selecionar alguns materiais a partir das restrições e objetivos estabelecidos pelo projeto. Dentro deste escopo, o trabalho investigará como a inserção de objetivos ambientais (*eco-design*) afeta o resultado da seleção do material do quadro de bicicleta.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MÉTODO DE ASHBY

M. Ashby propôs [1,6,7,9-10] que a estratégia de seleção de materiais e processos converte os requisitos e características do projeto (dados de entrada), nos materiais e processos adequados (dados de saída), como mostrado na figura 2. Para isso esta estratégia deve: formular restrições de certas propriedades dos materiais (de acordo com a função do componente), definir maneiras de quantificar a adequação dos materiais aos requisitos (como saber se o material é próprio ou não para a função estabelecida) e estabelecer procedimentos de busca e classificação dos materiais mais adequados.

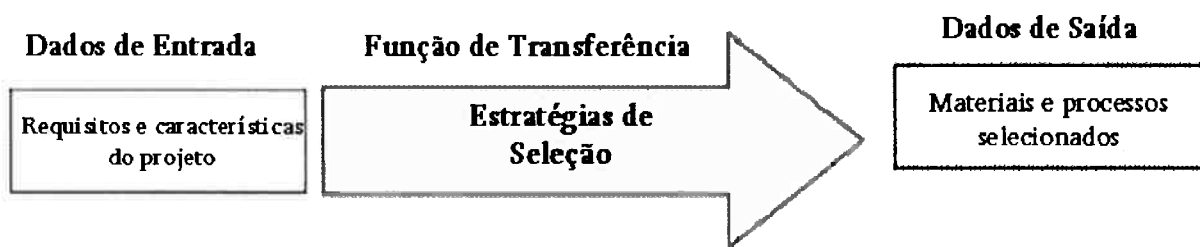


Figura 2: Estratégia de seleção agindo como funções de transferência, convertendo requisitos do projeto em lista de materiais e processo escolhidos.

Esta estratégia prevê etapas de filtragem e de classificação dos materiais em função da sua performance (uso de índices quantitativos de desempenho para a função). As etapas finais correspondem à eliminação ou seleção de um material de acordo com informações relativas ao projeto, sem uso de dados de propriedades dos materiais, mas levando em conta algumas condições de mercado (existência de fornecedores qualificados e confiáveis, logística de transportes, disponibilidade, histórico de variação de preços e histórico de falha). A estratégia de Ashby é baseada na busca de certas propriedades críticas dos materiais, seguida de classificação dos materiais e da seleção dos materiais (figura 3). Esta estratégia é considerada rápida e eficiente, oferecendo grande liberdade de aplicações, sendo propícia para inovação (escolha é feita a partir de todos os materiais existentes) [6-8].

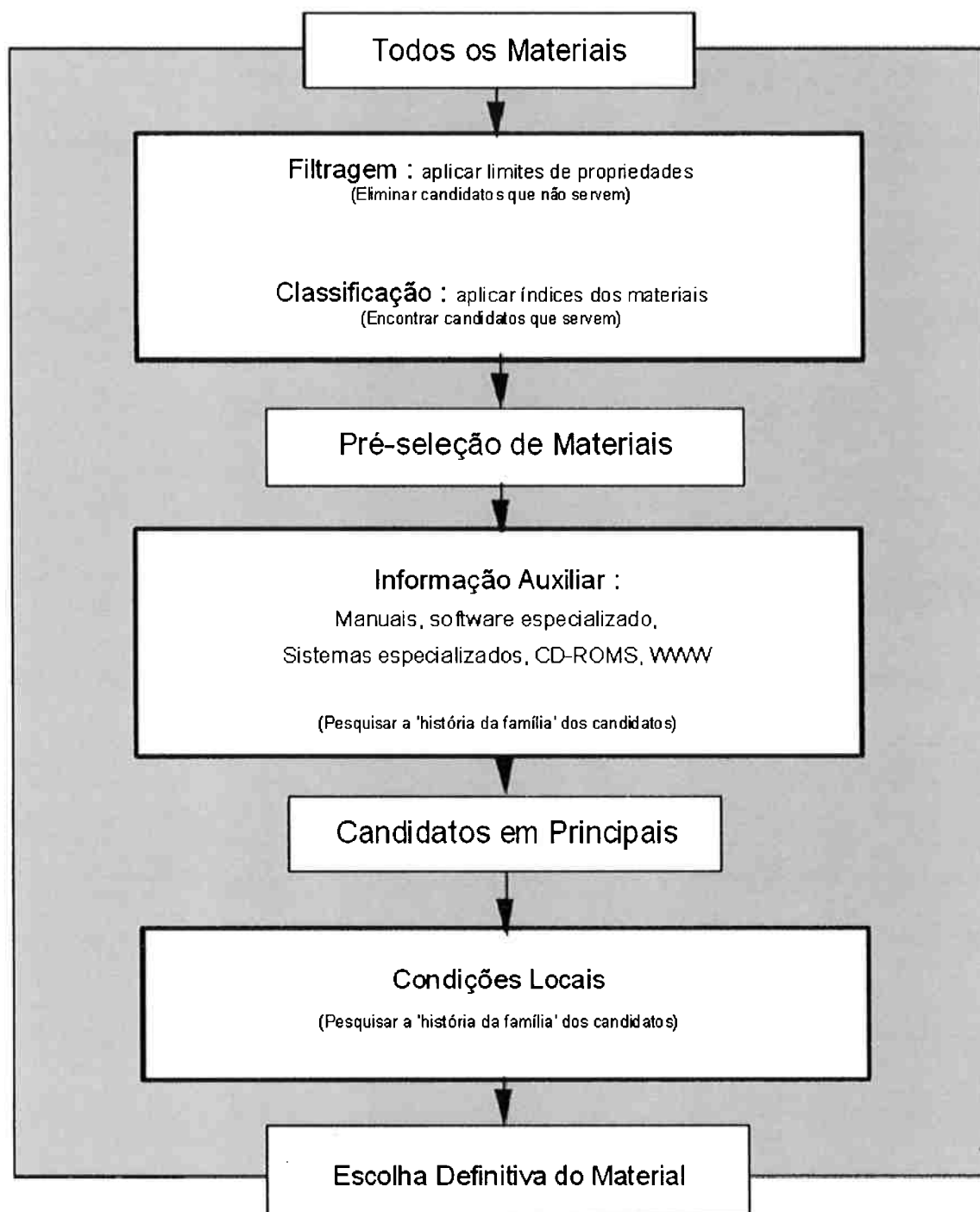


Figura 3: Estratégia de livre procura baseada em análises quantitativas para seleção de materiais. As etapas primordiais encontram-se nas caixas em negrito [7].

Definida a estratégia, o próximo passo é obter de maneira correta as condições de contorno do projeto para a filtragem e a classificação quantitativa. As condições de contorno são obtidas através da elaboração da “tradução dos requisitos de projeto”

(*translation of design requirements*). A elaboração desta tradução deve ser feita através das respostas para as seguintes perguntas [1,8-10]:

- Qual a função do componente? (suportar momento fletor, conter uma pressão externa, transmitir calor, etc.);
- Quais condições essenciais devem ser atendidas? (o componente deve suportar as tensões sem falhar, possuir controle dimensional adequado, suportar faixas de temperaturas e diferentes ambientes);
- Quais os objetivos do projeto? (fazer produto o mais barato possível, ou mais leve, ou seguro talvez);
- Quais parâmetros que o projetista tem liberdade de alterar? (geometria, condições de uso).

Estas respostas definem respectivamente: função, restrições, objetivos e variáveis livres do projeto, que serão a base para a quantificação índice de performance (desempenho) dos materiais. As restrições são divididas em geométricas e funcionais, estas últimas contêm os limites e valores desejáveis das propriedades dos materiais. A partir da definição das propriedades restritivas (quantitativas) do projeto (por exemplo: limite de escoamento, tenacidade à fratura, condutividade térmica, temperatura máxima de uso) e dos objetivos do projeto (eficiência, custo, meio-ambiente), criam-se condições para a seleção de materiais. As combinações de propriedades dos materiais são chamadas de “índices do material” (*material index*) e podem ser usados para definir os índices de performance do material. Supondo-se, por exemplo, o dimensionamento de uma barra tracionada com o objetivo de ser o mais leve possível. A propriedade restritiva será o limite de escoamento e a propriedade relacionada com o objetivo (leveza) será a densidade. O índice de performance do material (**M**) é dado pela equação 1 [1,7-10].

$$M = \sigma_y / \rho \dots\dots\dots (Eq. 1)$$

onde:

- σ_y é o limite de escoamento;
- ρ é a densidade;

Valores altos de M atribuem ao material boa adequação ao projeto (performance/desempenho), pois resultam de baixas densidades e altos limites de escoamento, atendendo à restrição e ao objetivo do projeto. Entretanto o material que com maior índice de performance não é necessariamente a melhor escolha, já que podem existir restrições geométricas e outras restrições com relação às condições de uso (carregamento de forças, etc.). Assim o “índice de performance” (P) do componente deve levar em conta estas outras restrições, como mostra a equação 2 [1,7-10].

$$P = f(F, G, M) \dots \dots \dots (Eq.2)$$

onde:

- F são os requisitos funcionais (tensões, limites, etc.);
- G são os requisitos geométricos;
- M é o índice de performance do material (equação 1).

Cada projeto possui um respectivo índice de performance de material, calculado a partir da definição da sua função, dos seus objetivos e das suas restrições. A tabela 1, por exemplo, traz os índices de performance do material para diferentes funções (tirante, viga, coluna, etc.), com o objetivo de minimizar a massa e otimizar a rigidez [1,7,9].

A partir das variáveis que definem os índices de performance do material, é possível obter os “mapas de Ashby” (*materials property chart*), como é mostrado na figura 4, que traz o mapa do módulo de Young (E) versus densidade (ρ). Este mapa é usado na análise de materiais leves e rígidos. Cada “bolha” do mapa representa um material enquanto as retas definem os índices de performance do material. Retas de iso-performance, definidas a partir do M mostrado na equação 1 e na tabela 1, identificam os materiais que apresentam o mesmo índice de performance de material de valor constante C , dentro de uma mapa em escala logarítmica, vide equação 3-5 [7,9]. O valor da constante C aumenta quando as linhas apontam mais para o canto esquerdo (materiais com maior rigidez e menor massa).

$$E/\rho = C \leftrightarrow \log(E) = \log(\rho) + \log(C) \text{ (menor massa para amarraras rígidas)} \dots (Eq.3)$$

$$E^{1/2}/\rho = C \leftrightarrow \log(E) = 2\log(\rho) + 2\log(C) \text{ (menor massa para vigas rígidas)} \dots (Eq.4)$$

$$E^{1/3}/\rho = C \leftrightarrow \log(E) = 3\log(\rho) + 3\log(C) \text{ (menor massa para placas rígidas)} \dots (Eq.5)$$

Tabela 1 Projeto com massa mínima limitado pela rigidez (custo, energia, impacto ambiental*)

<i>Funções e restrições</i>	<i>Maximizar†</i>
Tirante (estrutura resistiva) rigidez, comprimento especificados; área da seção livre	E/ρ
Eixo (carregamento sob torção) rigidez, comprimento, forma especificados; área da seção livre rigidez, comprimento, raio externo especificados; espessura da parede livre rigidez, comprimento, espessura de parede especificados; raio externo livre	$G^{1/2}/\rho$ G/ρ $G^{1/3}/\rho$
Viga (carregada sob flexão) rigidez, comprimento, forma especificados; área da seção livre rigidez, comprimento, altura especificados; largura livre rigidez, comprimento, largura especificados; altura livre	$E^{1/2}/\rho$ E/ρ $E^{1/3}/\rho$
Coluna (carregamento sob torção) carga de flambagem, comprimento, forma especificados; área da seção livre	$E^{1/2}/\rho$
Painel (placa plana, carregada sob flexão) rigidez, comprimento, largura especificados; espessura livre	$E^{1/3}/\rho$
Placa (placa plana, sob compressão, falha por flambagem) carga de colapso, comprimento e largura especificados; espessura livre	$E^{1/3}/\rho$
Cilindro com pressão interna distorção elástica, pressão e raio especificados; espessura da parede livre	E/ρ
Casca esférica com pressão interna distorção elástica, pressão e raio especificados; espessura da parede livre	$E/(1 - \nu)\rho$

*Para minimizar o custo, utilizar os critérios acima para peso mínimo, substituindo densidade ρ por $C_m \rho$, onde C_m representa o custo de material por Kg. Para minimizar o conteúdo energético, utilizar os critérios acima para peso mínimo substituindo densidade ρ por $q \rho$, onde q é o conteúdo energético por Kg. Para minimizar o impacto ambiental, substituir ρ por l, ρ , onde l , é o valor do eco-indicador do material.

†E = módulo de Young para tensão, módulo flexor para flambagem e flexão; G = módulo de cisalhamento; P = densidade, q = conteúdo energético / Kg; l, = valor do eco-indicador / Kg.

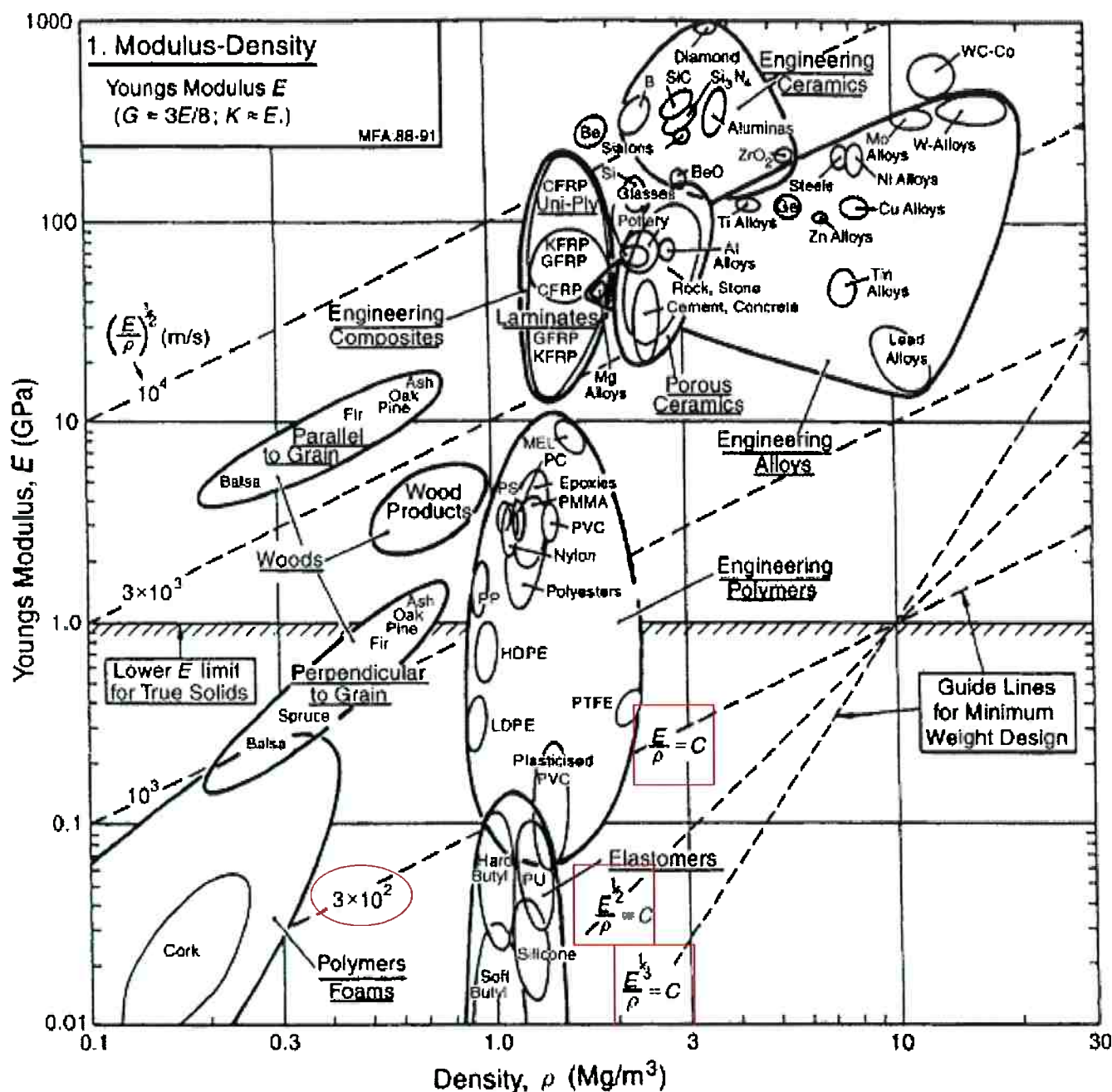


Figura 4: Mapa de Ashby $E \times \rho$, com linhas de apoio (iso-performance) de minimização da massa para a função de vigas rígidas (equação 4) e funções distintas (amarras e placas, vide equações 3 e 5) apresentadas nas caixas vermelhas, em escala logarítmica. O círculo vermelho traz o valor constante C dos "índices de material" fixado, $C=3 \times 10^2$ [7].

O modo de utilização dos "índices de performance" depende da complexidade do projeto. Os casos variam entre: objetivo & restrição simples até objetivos & restrições múltiplos [7,9-10], como será visto a seguir.

- **Objetivo simples – restrição simples.**

Neste caso o método mais adequado é a utilização de um único “índice de performance”, e será buscado o material que maximiza ou minimiza este índice. O mapa de Ashby $LE \times \rho$ mostrado na figura 5 mostra que o valor de M aumenta no sentido do canto superior esquerdo do mapa, ou seja, materiais com maiores valor de limite de escoamento e menor peso [7,9-10].

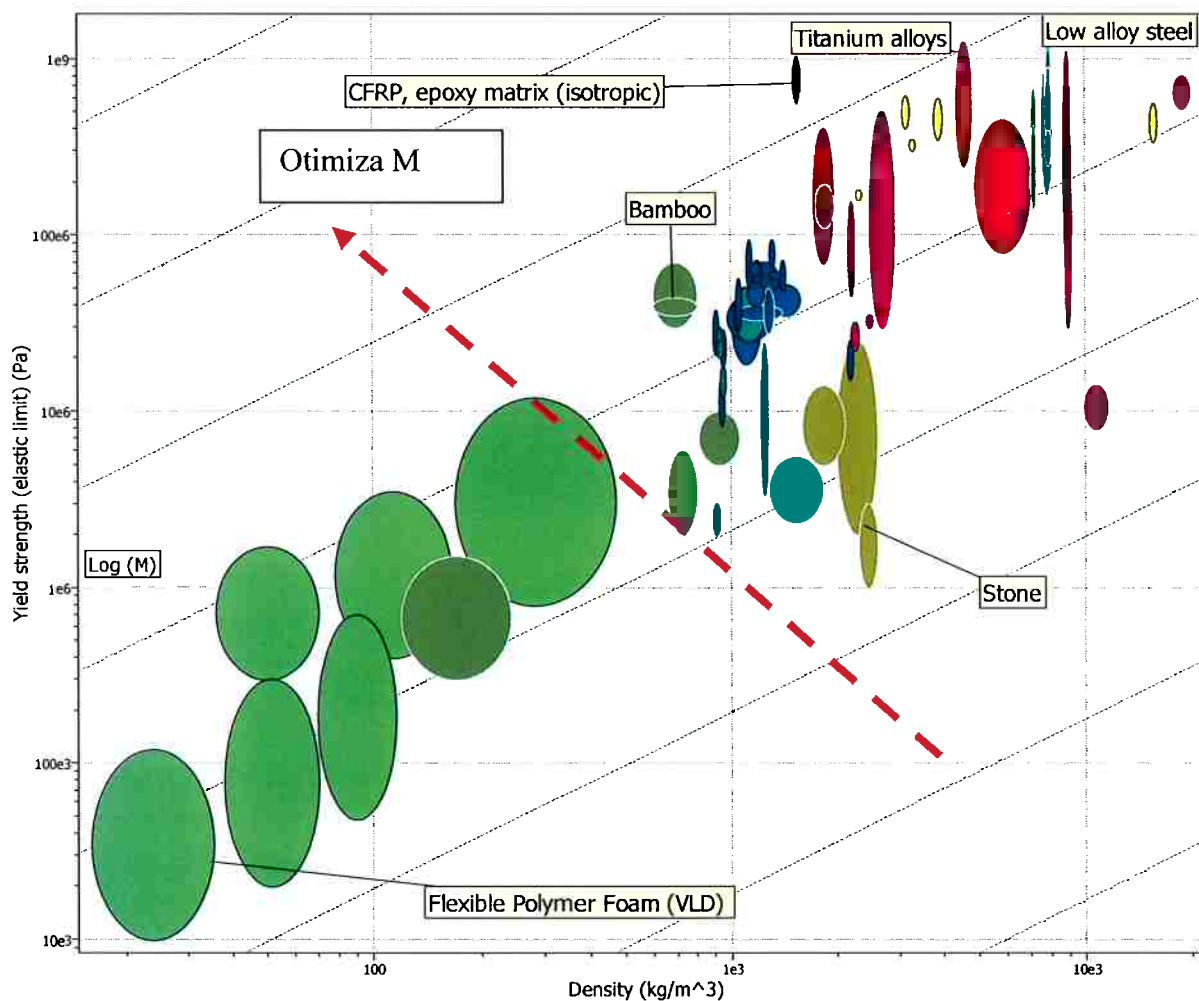


Figura 5: “Mapa de Ashby”, limite de escoamento x densidade, com diversas linhas com inclinação 1, apontando para a otimização de M, $\log(M)$ é a intersecção da reta com o eixo y, criado no CESEdunpack2007, banco de dados nível 1.

Outro recurso gráfico para a visualização dos possíveis candidatos com maiores valores de M é a elaboração de um gráfico de apenas uma coordenada contendo o “índice de performance do material”, mostrado na figura 6. O material que mais otimiza o índice será aquele posicionado no extremo máximo do eixo y [7,9-10].

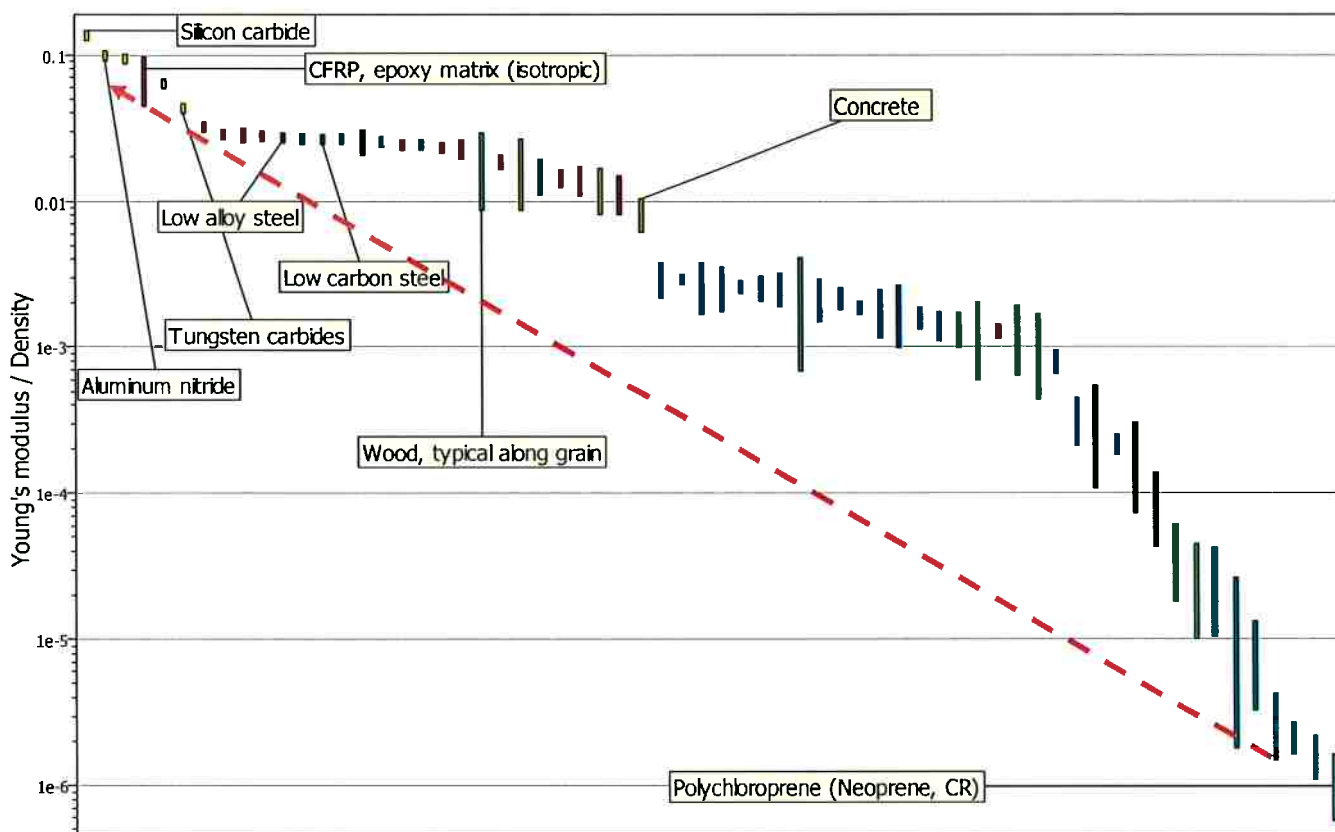


Figura 6: Gráfico contendo o índice de performance, definido por $M = E$ (módulo de Young) / ρ (densidade), que, segundo a tabela 1, minimiza a massa para restrição de rigidez com objetivo de redução de massa (vide seta vermelha), construído no CEEEdupack2007.

- **Objetivo simples - restrições múltiplas.**

Neste caso o objetivo do projeto depende de duas ou mais restrições (por exemplo, projeto com objetivo de minimizar a massa; restrições: componente necessita de alto limite escoamento e de alta rigidez) [7,9-10]. Uma maneira para a efetuar a escolha é o uso da função peso, que permite atribuir “pesos” diferentes para os diversos “índices de performance”, definindo deste modo um índice de performance médio, que poderá ser maximizado (ou minimizado) dentro de um mesmo objetivo [7].

Outra maneira é a utilização de uma única equação contendo os “índices de performance” de cada restrição, conforme a equação 6. As variáveis P_i ($i= 1, 2, 3, \dots$) da equação 6 são os “índices de performance” de cada restrição para o mesmo objetivo [7,9-10].

$$O = \text{Max} (P_1, P_2, P_3, \dots) \dots \dots \dots (\text{Eq.6})$$

onde:

- P_1, P_2 e P_3 são “índices de performance” obtidos pela equação 2 para diferentes restrições;
- O é o valor que deve ser otimizado para o alcance do objetivo.

Outro recurso bastante utilizado é decidir qual restrição é mais severa. Se a primeira restrição for a mais restritiva, a performance é dada por **P1**, se a segunda restrição exerce maior impacto, a equação de performance é dada por **P2** e assim sucessivamente. Este equacionamento já é suficiente para a escolha de um bom candidato. Porém existem casos em que duas restrições são importantes. Equacionando dois “índices de performance do componente” **P1** e **P2** de acordo com a equação 2, obtém-se as equações 7 e 8. Estas equações combinam os dois índices de performance do material, **M1** e **M2**, e a constante entre colchetes na equação 8 (a constante acoplada, **C_c**) é fixada pela especificação do projeto (geometria de condições de carregamento)[7,9].

$$P_1 = P_2 \leftrightarrow M_2 = [(F_1 \times G_1) / (F_2 \times G_2)] \times M_1 \dots \dots \dots (\text{Eq.7})$$

ou

$$M_2 = [C_c] \cdot M_1 \leftrightarrow \log (M_2) = \log (M_1) + \log (C_c) \dots \dots \dots (\text{Eq.8})$$

onde:

- M_1 e M_2 são os “índices do material” para P_1 e P_2 , respectivamente;
- F_1 e F_2 são as restrições funcionais de P_1 e P_2 , respectivamente;
- G_1 e G_2 são as restrições geométricas respectivamente;
- C_c é a constante acoplada.

Através da determinação de C_c consegue-se introduzir uma reta em um mapa de Ashby contendo M_1 e M_2 como eixos. Os materiais que cruzarem a linha são aqueles

que estão dentro das restrições do projeto (figura 7). A melhor solução é aquela que minimiza ou maximiza, dependendo do caso. Esta reta também divide o mapa em dois domínios de predominância de restrição [7,9-10].

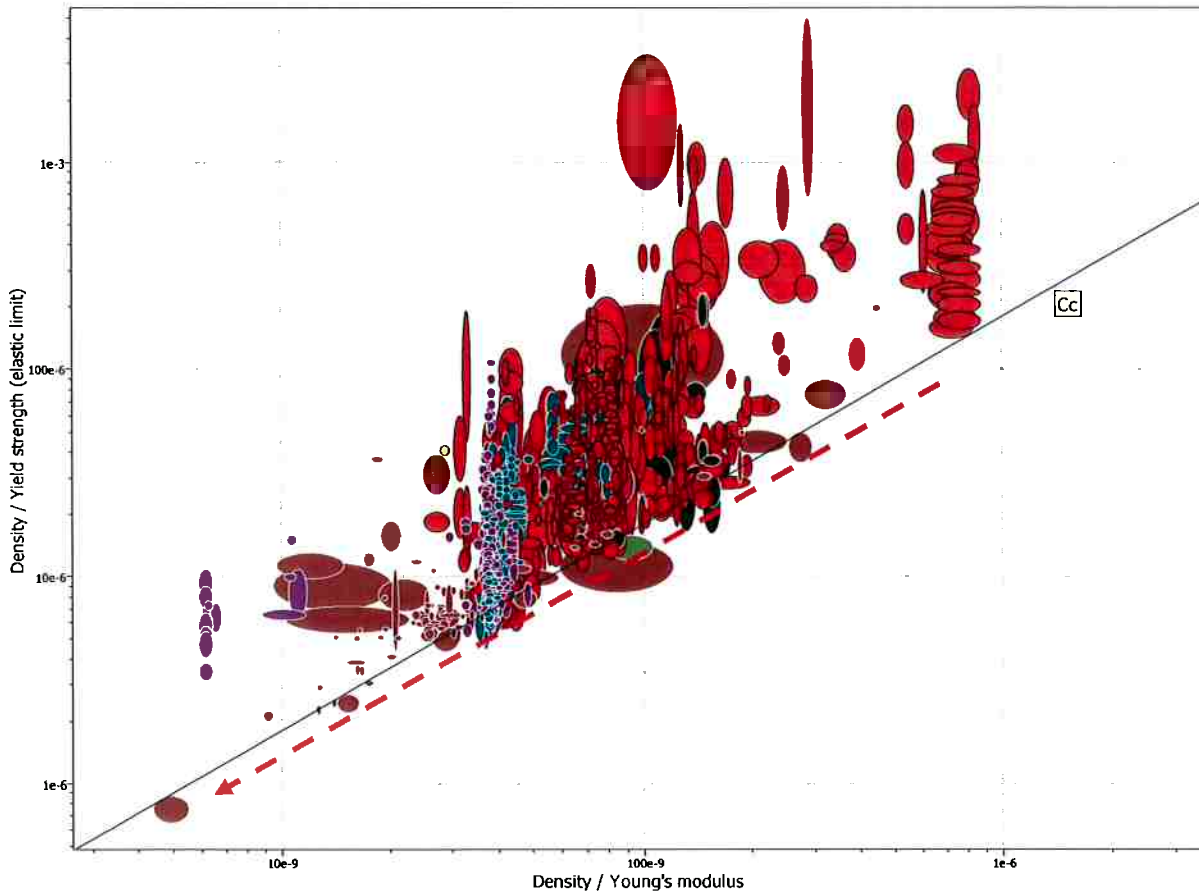
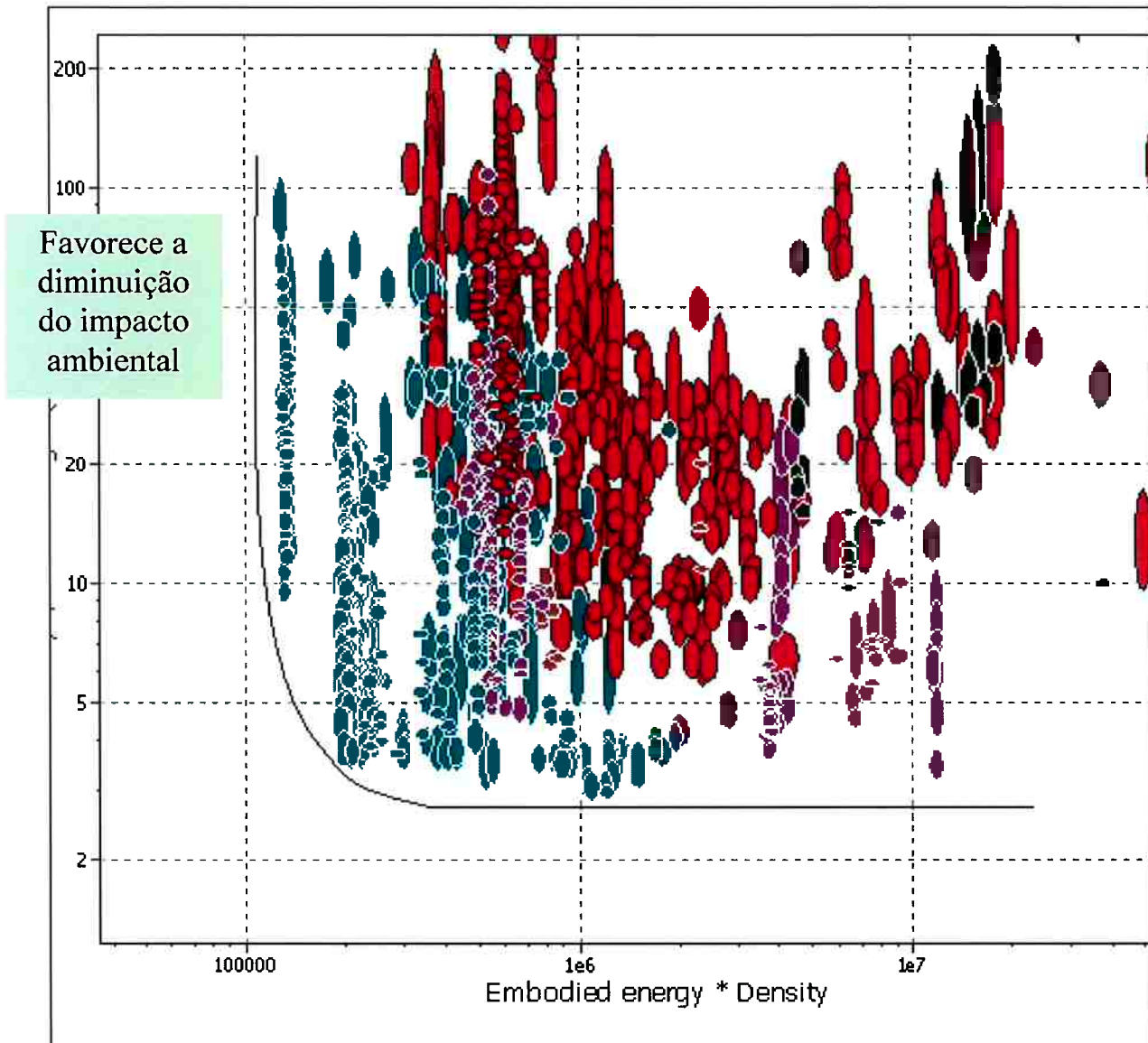


Figura 7: Mapa de Ashby para a minimização da massa, pelas restrições limite de escoamento (eixo y, densidade / limite de escoamento) e rigidez (eixo x, densidade / módulo de Young), com linha de iso-atividade, para Cc, apontando a melhor solução, extraído do CESEdupack2007(caso A, deste trabalho).

- **Objetivos múltiplos – restrições múltiplas:**

No caso de objetivos múltiplos é necessária a otimização (maximização ou minimização) de cada índice de performance relacionado com objetivos diferentes, porém em grande parte dos casos otimizar um pode significar não otimizar o outro. A análise desta problemática se inicia com a geração de um mapa de Ashby contendo em cada eixo um índice de performance relacionado com um objetivo. Nota-se a dificuldade da construção deste gráfico para casos em que o número de objetivos

supera dois, pois um projeto com n objetivos demanda um gráfico com n dimensões. Dentro do gráfico constrói-se uma linha sem embasamento matemático que estabelece os materiais, ou soluções, que mais otimizam os dois índices, figura 8. Esta linha é chamada de superfície trade-off¹ (figura 6) (*trade-off surface*). A



proximidade com esta linha também torna os materiais passíveis de escolha [9-10].

Figura 8: Linha trade-off construída dentro do “mapa de Ashby” de redução da massa (eixo y, densidade/limite de escoamento) e diminuição do impacto ambiental (eixo x, energia gasta para produção do material / densidade), As diversas cores representam as diversas famílias de materiais. Construída no CESEdunpack2007 (caso B deste trabalho).

¹ *Trade-off* (oposição; conflito) Existe um *trade-off* entre dois objetivos quando a busca de um implica afastar-nos da realização do outro.

A escolha é limitada aos materiais próximos à *linha trade-off* (vide figura 8), porém ainda existe a necessidade de ponderar os objetivos. A otimização dos objetivos acontece quando se estabelece uma relação entre os objetivos. O método consiste em combinar os índices de performance de cada restrição para cada o objetivo em uma única ‘função penalidade’ (*penalty function*). Esta função deve possuir termos com a mesma unidade, para isso são utilizadas constantes definidas como ‘taxas de troca’ (*exchange constants*), que definem os pesos de cada objetivo. A constante de troca pode ser obtida através da análise funcional do objeto ou da análise de soluções já existentes [6,8-10]. Partindo-se dos índices de performance P1 e P2 para dois objetivos distintos, a função penalidade (*penalty*) Z para estes objetivos é dada na equação 9 [9-10].

$$Z = a_1P1 + a_2P2.....(Eq.9)$$

Onde:

- a_1 e a_2 são constantes;
- P1 e P2 são os índices de performance para cada objetivo.

As constantes a_1 e a_2 são as taxas de troca e devem transformar a_1P1 e a_2P2 na mesma unidade, por exemplo custo. Valores das “taxas de troca” não são encontrados com facilidade e sua estimativa é complicada. Normalmente a unidade para Z é monetária, pois reduzir o custo é o objetivo comum na indústria, assim ao minimizar Z aperfeiçoamos o projeto. A definição de taxa de troca está expressa na equação 10. Alterando o valor da constante, a intersecção entre as linhas se desloca no mapa e favorece um objetivo em detrimento do outro, conforme visto na figura 9 [7-10].

$$a_i = \frac{\delta Z}{\delta P_i} (Eq. 10)$$

Resumindo o processo, primeiro identificam-se os “índices de performance” para cada objetivo, constrói-se a “*linha trade-off*” dentro do mapa contendo estes índices nos eixos x e y e introduz-se a função Z. O material de seleção é aquele mais próximo do ponto de tangência de Z com a *trade-off* [9-10], vide figura 9. Dentro da

figura 9, apresentam-se duas funções penalidade com “taxas de troca” diferentes, mostrando que ganhar no preço acarreta em aumento no peso da bicicleta.

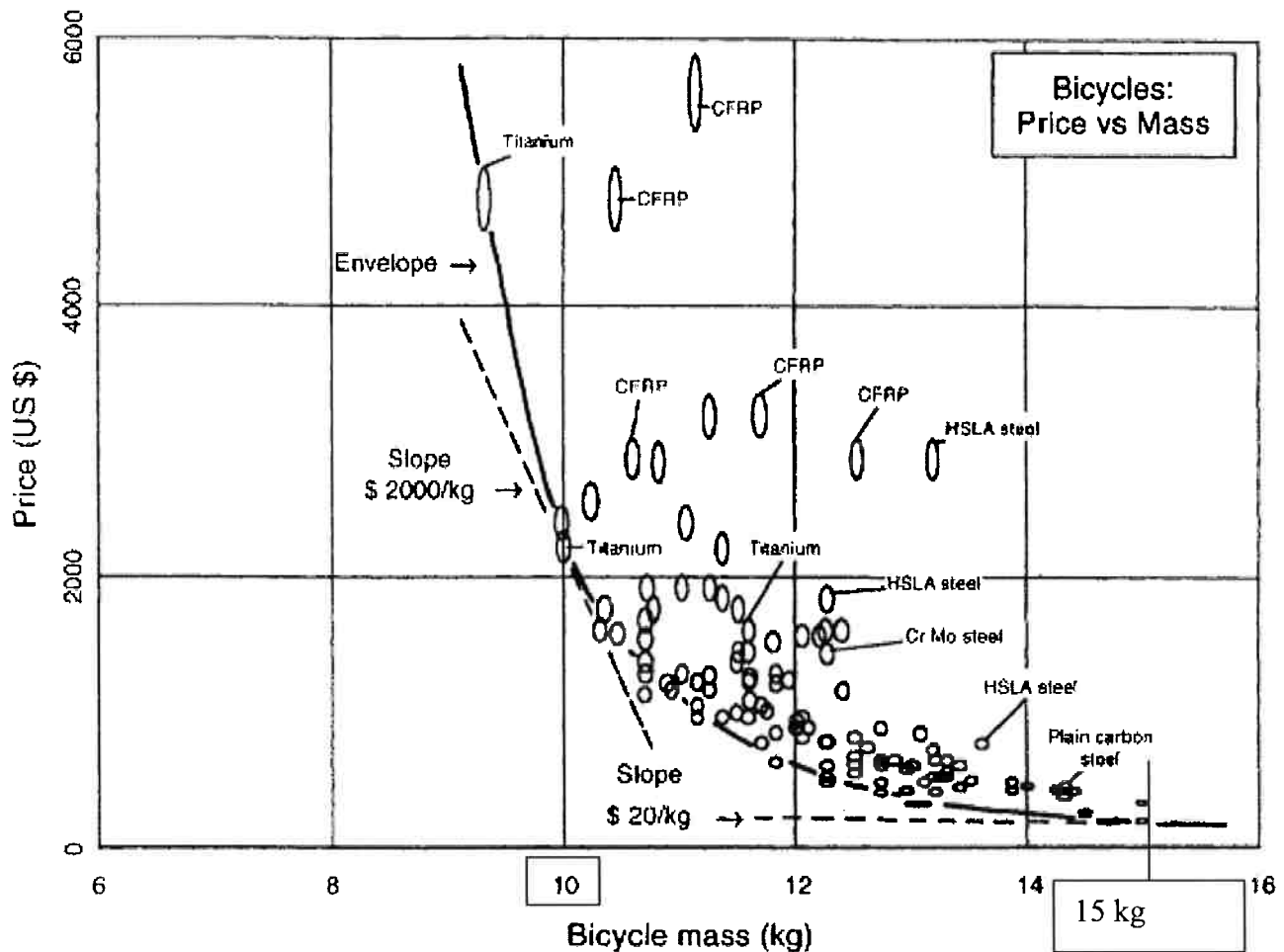


Figura 9: Curvas de funções penalidades dentro de um mapa que minimiza a massa e o custo no projeto de uma bicicleta, para diferentes valores de taxa de troca, mostrando a tangência com a superfície trade-off.[7].

2.2 Banco de dados de propriedades de materiais

A equipe Granta Design fundada em 1994 em parceria com a Universidade de Cambridge desenvolveu os mapas de Ashby, índices de performance e sistemáticas de seleção de materiais através da construção de banco de dados de propriedades dos materiais. Pioneira neste ramo, esta equipe lançou em 1999 o software Seletor de Engenharia Cambridge (*CES - Cambridge Engineering Selector*), contendo um banco de dados das propriedades dos materiais, com recursos gráficos e de filtragem, classificação e seleção [6,11].

Na parte experimental deste trabalho foi utilizado o CES-Edupack 2007, do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Este software utiliza um banco de dados que contém cerca de 160.000 tipos de materiais e processos, apresentando suas propriedades. O CES apresenta recursos de filtragem e classificação dos materiais a partir das informações em seu banco de dados. Para ampliar a precisão das informações dos materiais e assim o poder de seleção, o software também conta com atributos não numéricos relacionados com as aplicações dos materiais em uso e nos processos de fabricação, junção, revestimento e outros, organizados conforme apresentado na figura 10. Um desafio em construir ferramentas de seleção consiste em utilizar ao máximo todo tipo de informação [6,8,11].

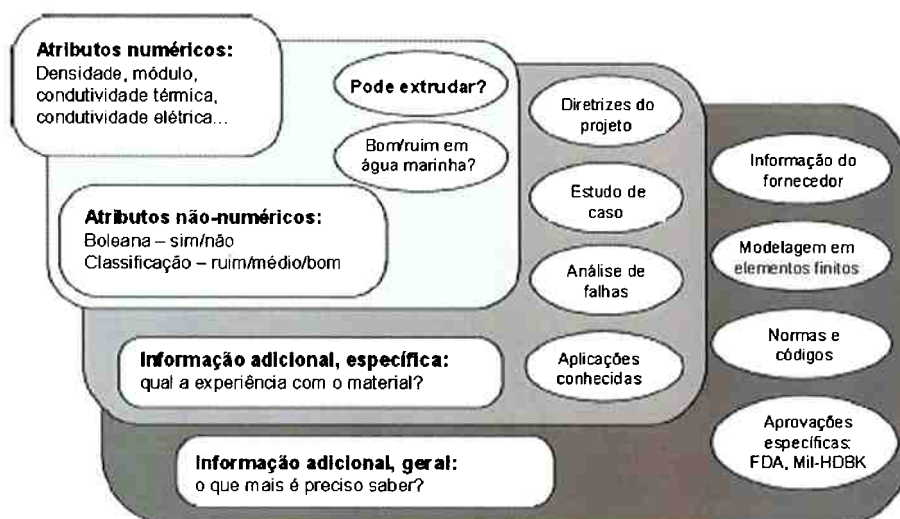


Figura 10: Dados para materiais e processos de fabricação adquirem formato de formulários, variando desde valores numéricos para propriedades padrões (como densidade) até experiência a partir de aplicações prévias [6].

Para que a iteratividade seja facilitada, devem-se organizar os dados de maneira hierárquica (ver figura 11), possibilitando a criação de algoritmos. Além disso, informações extras devem estar prontas para serem atreladas e devem ser facilmente obtidas. Finalmente, pesquisa bibliográfica é importante para a obtenção de informações adicionais, como estudos de casos relacionados com o projeto e com análise de falhas de componentes similares [6,8,11].

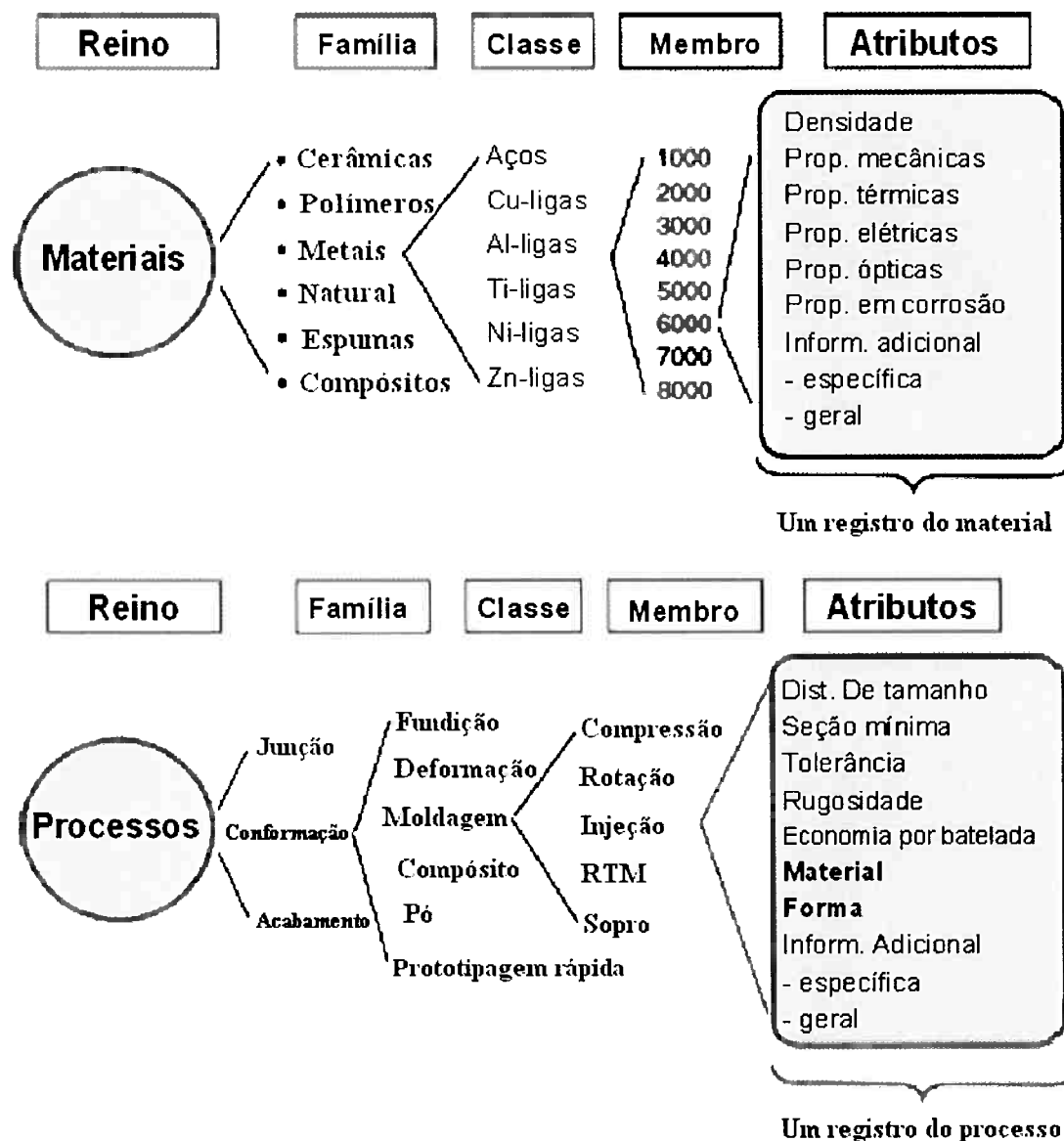


Figura 11: A organização da estrutura de dados como comumente encontrada em livros de referência e planilhas. O material e o processo são indexados pelo título; toda informação listada sob o título fornece valores numéricos para as propriedades do material, uma listagem de desempenho em função de condições padrões e classificações sim / não da compatibilidade entre material e processo [6].

O banco de dados do CES é subdividido nas categorias: universo dos materiais, universo dos processos, produtores e referências. A versão educativa também divide o banco de dados em três níveis: nível 1, introdutório; nível 2; intermediário; e nível 3, avançado, conforme visto figura 12. Estes níveis se diferenciam pela quantidade de materiais envolvidos. Nos níveis 1 e 2 o software aglomera informações das classes dos materiais (ou processo) em único material (ou processo) e no nível 3 cada tipo específico de material (ou processo) é tratado diferentemente.

Como exemplo o nível 3 apresenta todos os tipos de ligas de alumínio com suas informações específicas, no nível 2 as ligas de alumínio são divididas em três grupos: endurecíveis por precipitação (Age-hardening wrought alloys), ligas de alumínio fundidas (Cast Al-alloys) e não endurecíveis por precipitação (Non Age-hardening wrought alloys), e no nível 1 apenas ligas de alumínio (Aluminium Alloys), generalizando bastante as informações. O nível 3 ainda apresenta dados mais específicos como uma divisão dos elementos da tabela periódica com características atômicas (números atômicos, estrutura cristalina, etc), materiais estruturais e características geométricas [8,11].

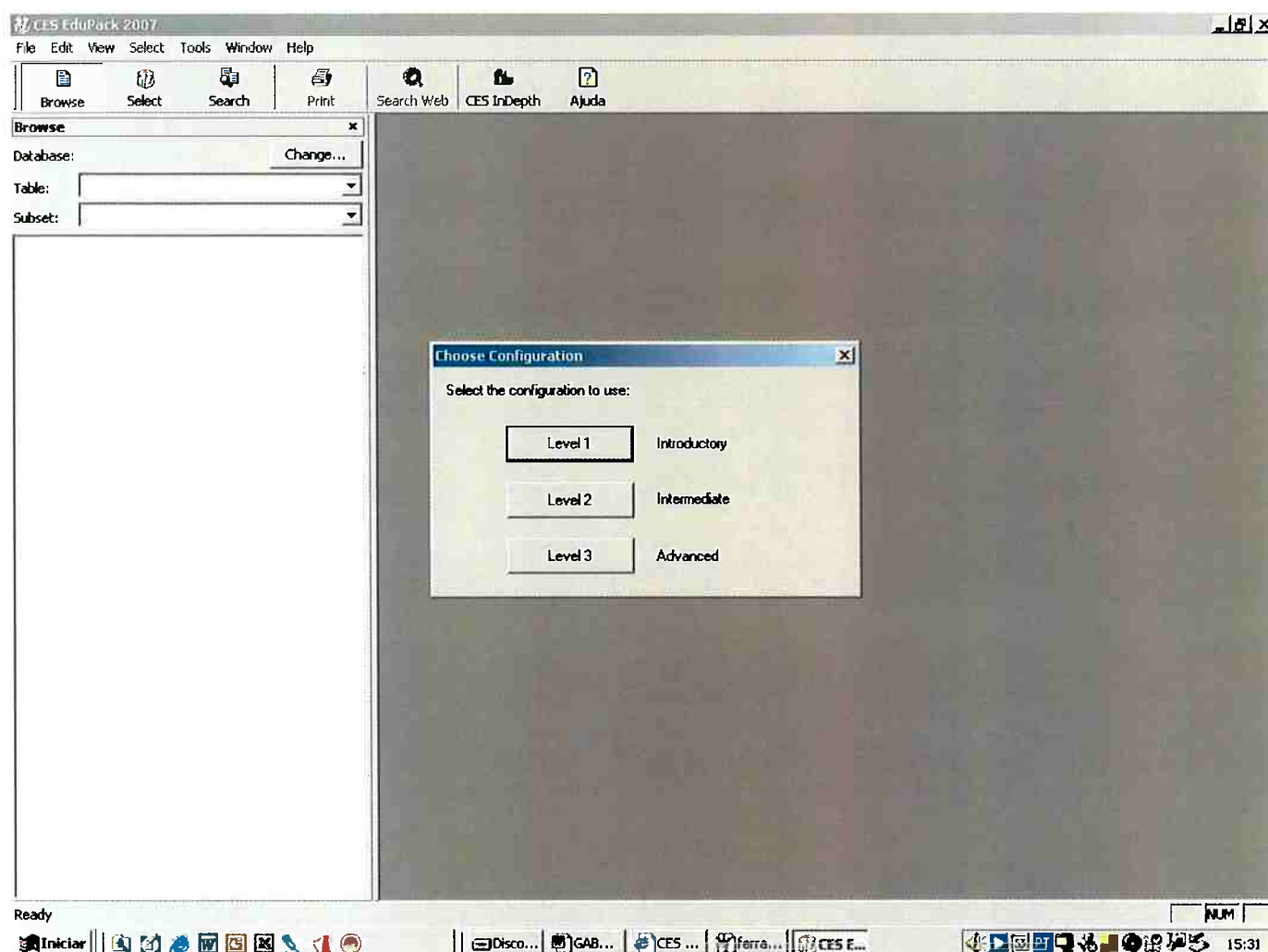


Figura 12: Tela inicial do CESEdupack2007, solicitando a escolha de nível do banco de dados.

O CSE Edupack traz três grandes ferramentas, “escolher” (*Browse*), “localizar” (*Search*) e “seleção” (*Select*). As ferramentas “escolher” (*Browse*) e “localizar” (*Search*) são de busca de informações referentes ao banco de dados, sendo que na primeira a busca é feita por árvores de hierarquia (figura 13) e na segunda a busca é feita pelo nome, nome comercial, sigla, aplicação ou outras (figura 14). Ambas dependem da escolha do banco de dados e de sua subdivisão.

CES EduPack 2007 - [MaterialUniverse:Metals and alloys\Ferrous]

File Edit View Select Tools Window Help

Browse Select Search Print Search Web CES InDepth Ajuda

Browse Database: CES EduPack 2007 Levels 1 & 2 Change... Table: MaterialUniverse Subset: Edu Level 1

MaterialUniverse

- Ceramics and glasses
- Hybrids: composites, foams, natural materials
- Metals and alloys
 - Ferrous
 - Cast iron, ductile
 - Cast iron, gray
 - High carbon steel
 - Low alloy steel
 - Low carbon steel
 - Medium carbon steel
 - Stainless steel
 - Non-ferrous
- Polymers and elastomers

Stainless steel

Description

The material

Stainless steels are alloys of iron with chromium, nickel, and - often - four of five other elements. The alloying transmutes plain carbon steel that rusts and is prone to brittleness below room temperature into a material that does neither. Indeed, most stainless steels resist corrosion in most normal environments, and they remain ductile to the lowest of temperatures.

Composition

Fe/<0.25C/16 - 30Cr/3.5 - 37Ni/<10Mn + Si,P,S (+N for 200 series)

Image



Caption

One the left: Siemens toaster in brushed austenitic stainless steel (by Porsche Design). On the right, scissors in ferritic stainless steel; it is magnetic, austenitic stainless is not.

General properties

Density 7600 - 8100 kg/m³

Stainless steel

Figura 13: Informações do aço inoxidável no CESEdpack2007 obtidas através de busca (Browse) utilizando o nível 1 e a subdivisão universo dos materiais.

Wrought austenitic stainless steel, AISI 316L

Suppliers: Carpenter Technology Corp. (USA); PROJECT 700 STAINLESS TYPE 316L, Carpenter Technology Corp. (USA); ARGESTE 4404 LA/SB/VC, Stahlwerk Ergste Westig GmbH (GERMANY); SPARTAN REDHEUGH 316S11, Spartan Redheugh Ltd (UK); PROJECT 7000 STAINLESS TYPE 316L, Carpenter Technology Corp. (USA); ALLEGHENY LUDLUM TYPE 316L, Allegheny Ludlum Steel (USA); ARGESTE 4571 TB/SA/TA, Stahlwerk Ergste Westig GmbH (GERMANY); ARGESTE 4401 PA/LA/PC/SB/VC, Stahlwerk Ergste Westig GmbH (GERMANY); SPARTAN REDHEUGH 316S31, Spartan Redheugh Ltd (UK); ALLEGHENY LUDLUM TYPE 321, Allegheny Ludlum Steel (USA); EMPIRE TYPE 316EZ, Empire Specialty Steel Inc. (USA); ACX 290, Acerinox, S.A. (SPAIN); ACX 260, Acerinox, S.A. (SPAIN); RDN 280, Roldan S.A. (SPAIN); ACX 280, Acerinox, S.A. (SPAIN); RDN 255, Roldan S.A. (SPAIN); RDN 270, Roldan S.A. (SPAIN); ACX 250, Acerinox, S.A. (SPAIN); ACX 270, Acerinox, S.A. (SPAIN); SANDVIK SANMAC 316L, Sandvik Steel Co. (USA); RDN 250, Roldan S.A. (SPAIN); APMZ, Acciaierie Valbruna SpA (ITALY); SANDVIK 2R61, Sandvik Steel Co. (USA); SANDVIK 3R65, Sandvik Steel Co. (USA);

Composition

Composition (summary)

Fe/<.03C/16-18.5Cr/10-14Ni/2-3Mo/<2Mn/<1Si/<.045P/<.03S

Base	Fe (Iron)		
C (carbon)	0	-	0.03 %
Cr (chromium)	16	-	18.5 %
Fe (iron)	61.4	-	72 %
Mn (manganese)	0	-	2 %
Mo (molybdenum)	2	-	3 %
Ni (nickel)	10	-	14 %
P (phosphorus)	0	-	0.045 %
S (sulfur)	0	-	0.03 %
Si (silicon)	0	-	1 %

Mechanical

Young's modulus	190	-	205 GPa
Shear modulus	74	-	82 GPa
Bulk modulus	134	-	152 GPa
Poisson's ratio	0.265	-	0.275
Yield strength (elastic limit)	170	-	210 MPa

Wrought austenitic stainless steel, AISI 316L

Figura 14: Informações referentes ao aço inoxidável AISI 316L no CES Edupack2007, utilizando nível 3 no universo dos materiais, obtidas através de busca pela sigla (Search).

A ferramenta seleção (Select) é mais complexa e através dela é possível selecionar materiais de maneira sistemática. Ao escolher esta ferramenta, a interface do CES fica dividida em três (figura 15), 1-Dados para a seleção (Selection Data), 2- Estágios da seleção (Selection stages) e 3- Resultados (Results).

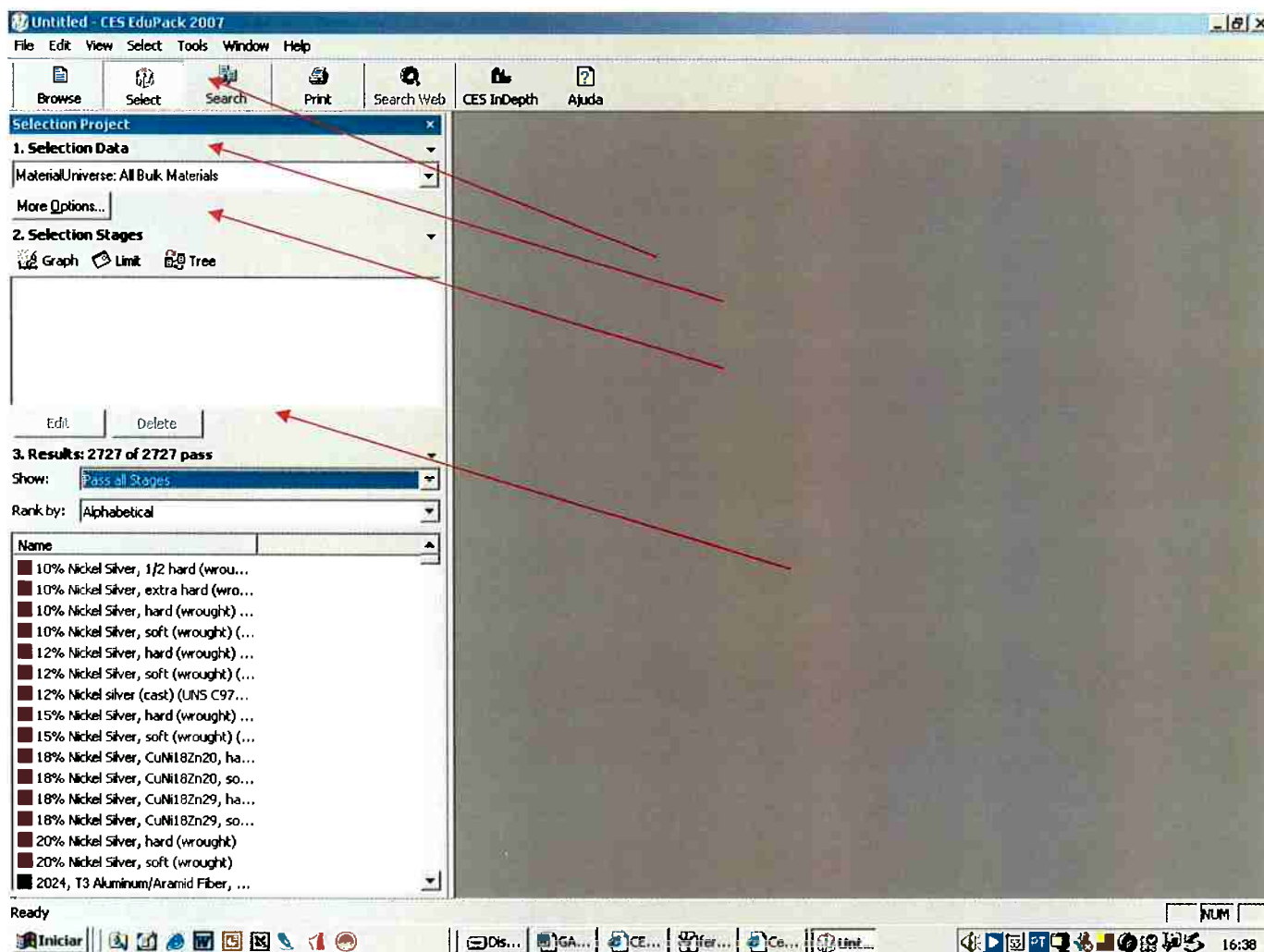


Figura 15: Interface inicial do CESEduPack2007 para o uso da ferramenta Select, considerando o nível 3 e universo dos materiais, contendo como resultados iniciais todos os materiais, pois não foi feita nenhuma seleção fora a do banco de dados.

Estas divisões podem ser consideradas como passos para a seleção. Definindo-se o tipo de dados, o próximo passo é selecionar os materiais (ou processos) através dos três recursos: “gráfico” (*graph*), “limite” (*limit*) e “árvore” (*tree*). O recurso “árvore” seleciona grupos de materiais ou processos para continuarem nas próximas etapas independentemente do banco de dados da seleção. Este recurso utiliza árvores de hierarquia para a busca e escolha e seu uso é útil quando já se tem conhecimento, por exemplo, que o resultado deve obrigatoriamente ser um metal, ou que o material deve ser utilizado para fundição (figuras 16 e 17) [8,11].

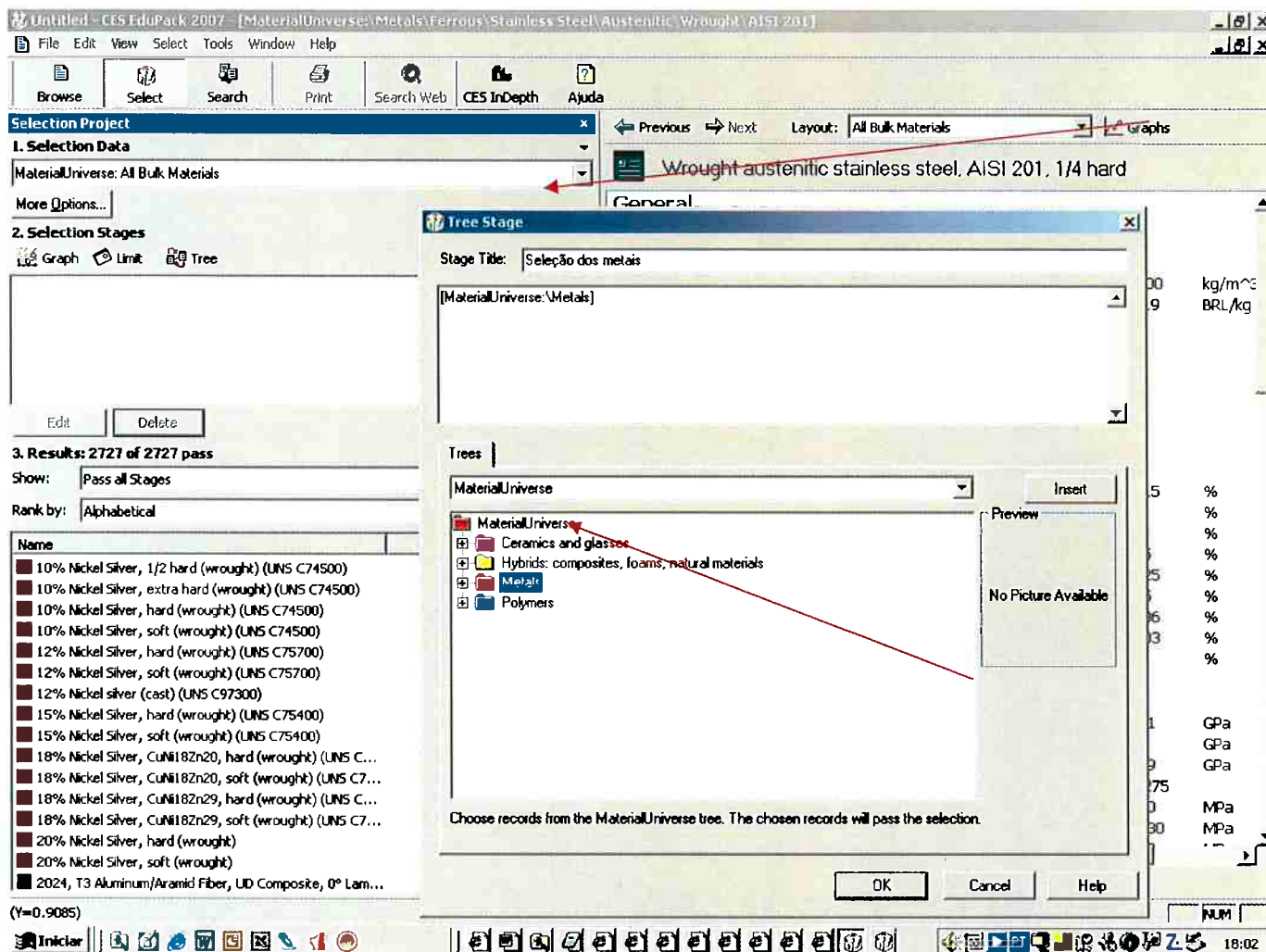


Figura 16: Seleção dos metais dentro do banco de dados nível 3, subdivisão universo dos materiais utilizando o recurso de busca por árvores (tree).

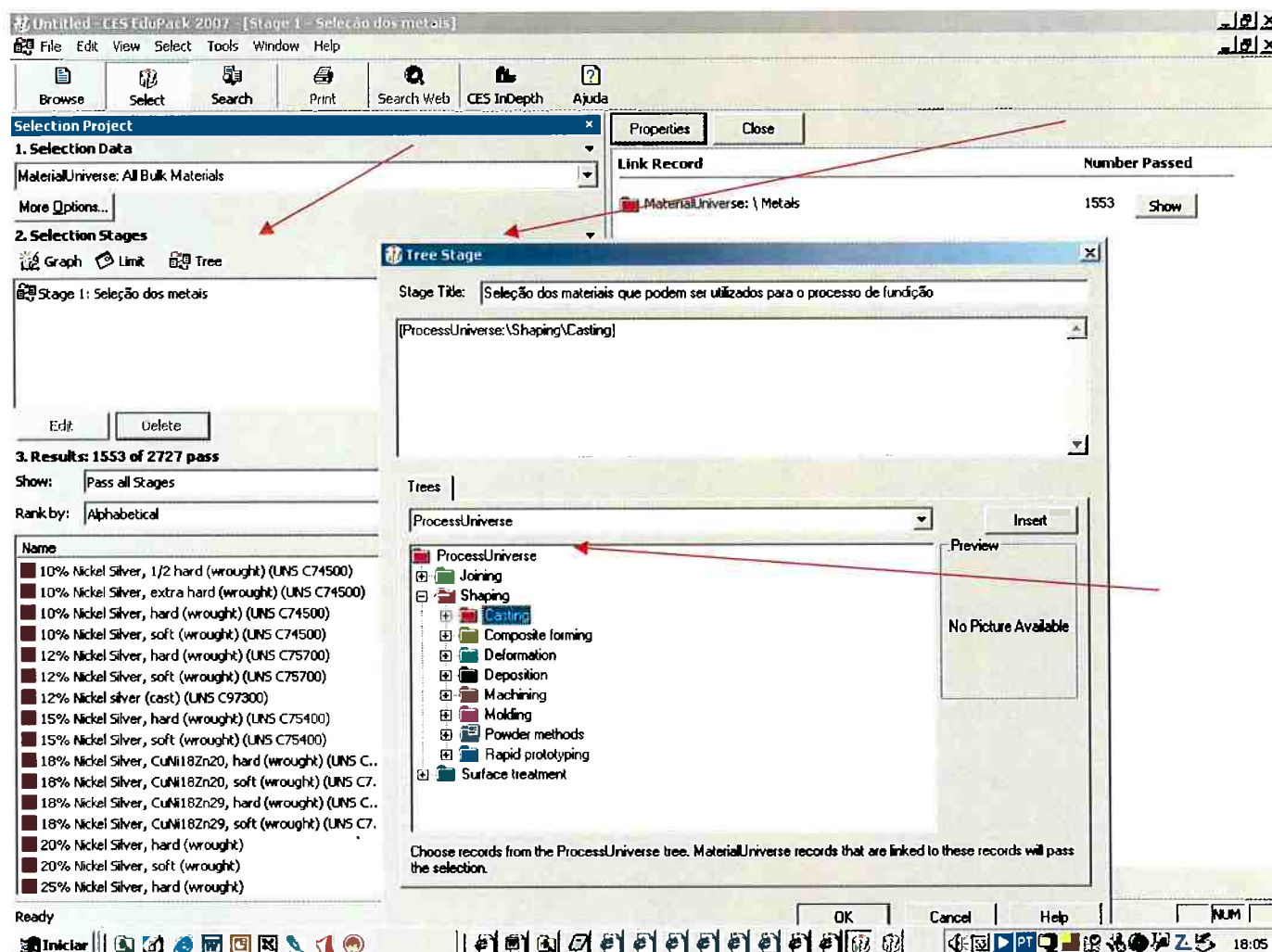


Figura 17: Seleção dos metais que podem ser processados por fundição, sendo que os metais já foram selecionados como visto na figura 16.

O recurso “limite” (*limit*) desqualifica os materiais ou processos em função de limites das propriedades dos materiais ou processos. Conhecendo-se restrições fixas para o projeto, consegue-se separar os materiais ou processos que as atendem (figura 18).

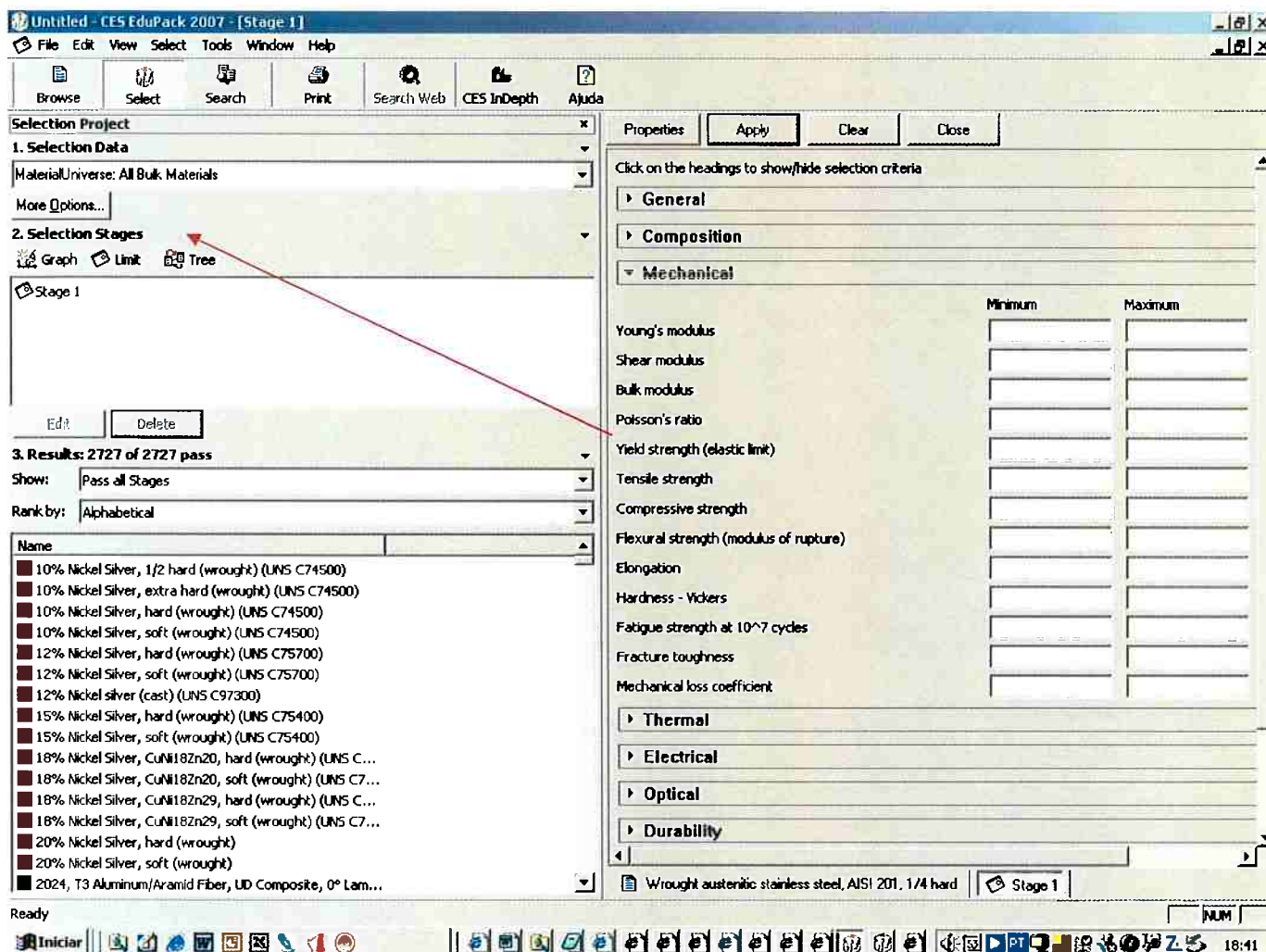


Figura 18: Tela do recurso limite (limit), detalhando as propriedades mecânicas que podem ser restringidas, banco de dados nível 3, subdivisão universo dos materiais.

O recurso “gráfico” (*graph*) permite a elaboração de gráficos em duas dimensões utilizando em seus eixos atributos numéricos, como propriedades dos materiais ou processos e combinações destes, em escala linear ou logarítmica (figuras 19 e 20). Conforme o método de seleção visto neste trabalho a elaboração dos índices de performance e dos mapas de ashby é decisiva para a classificação dos candidatos. O ferramental para trabalhar com o mapa (figura 21) tem como principais ferramentas: a seleção materiais por um quadro de seleção (*box selection tool*), a introdução de uma reta com inclinação variável que seleciona os materiais acima ou abaixo dele (*line selection tool*), a introdução de retas de apoio com inclinação variável (*guide lines*) e esconder os materiais que não passam pelos outros estágios de seleção para que não influenciem na análise do gráfico (*Hide failed materials*) [8,10].

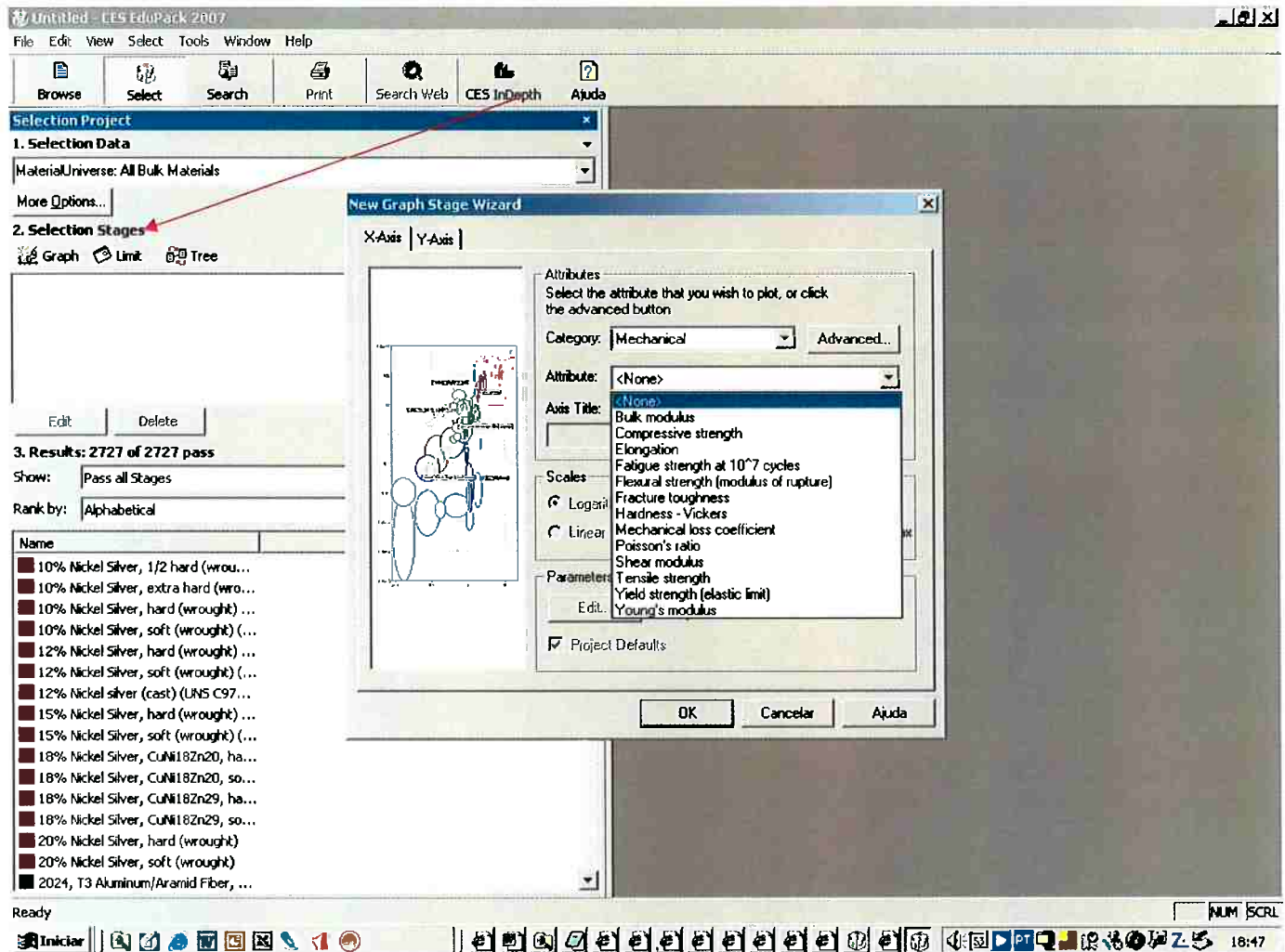


Figura 19: Opções de escolha de atributos de propriedades mecânicas para o eixo x do gráfico, nível 3, subdivisão universo dos materiais.

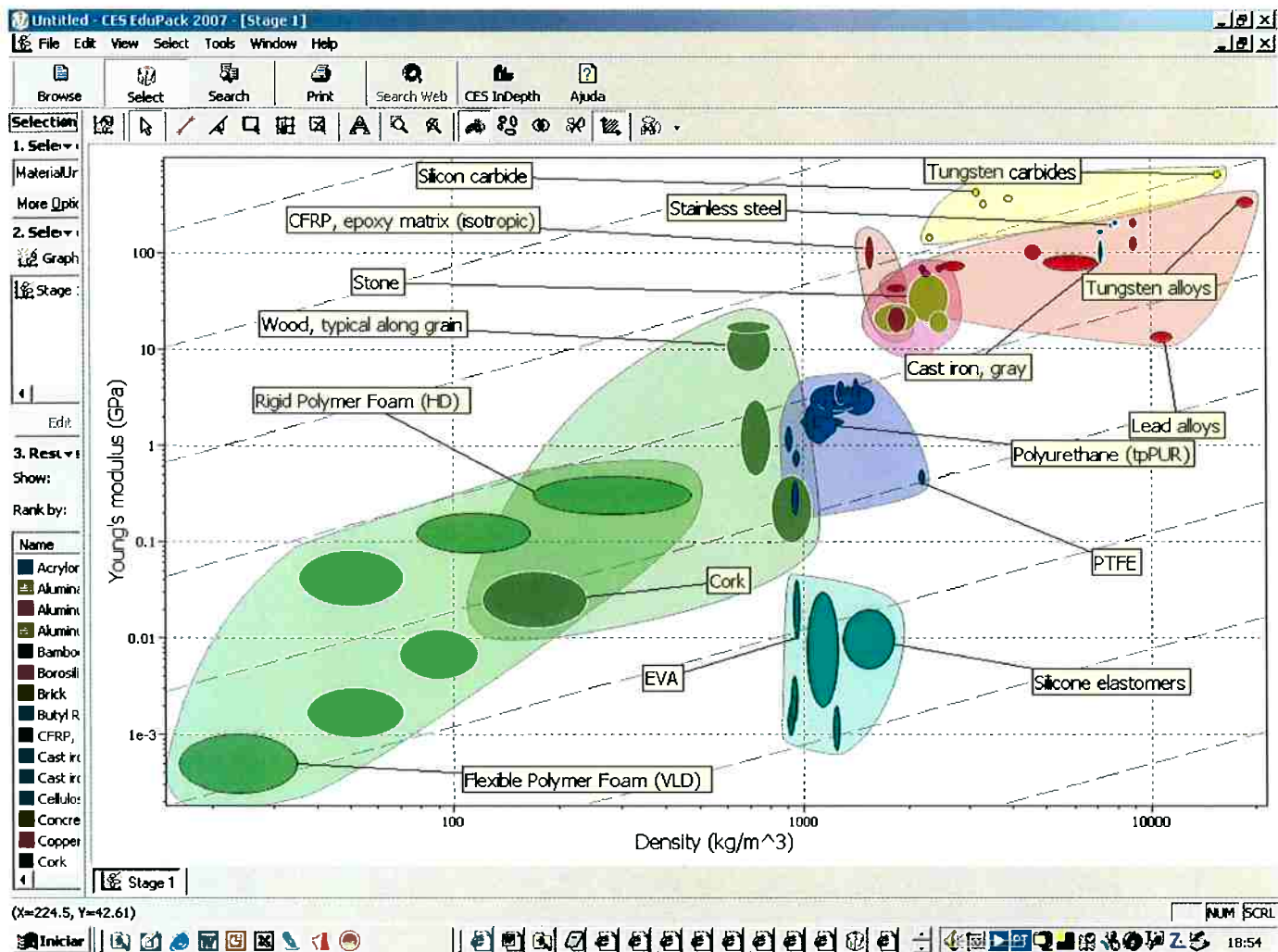


Figura 20: Gráfico de E (módulo de Young) $\times$ ρ (densidade), banco de dados nível 2, subdivisão universo dos materiais, contendo linha de apoio de inclinação 1, envelopes de materiais.

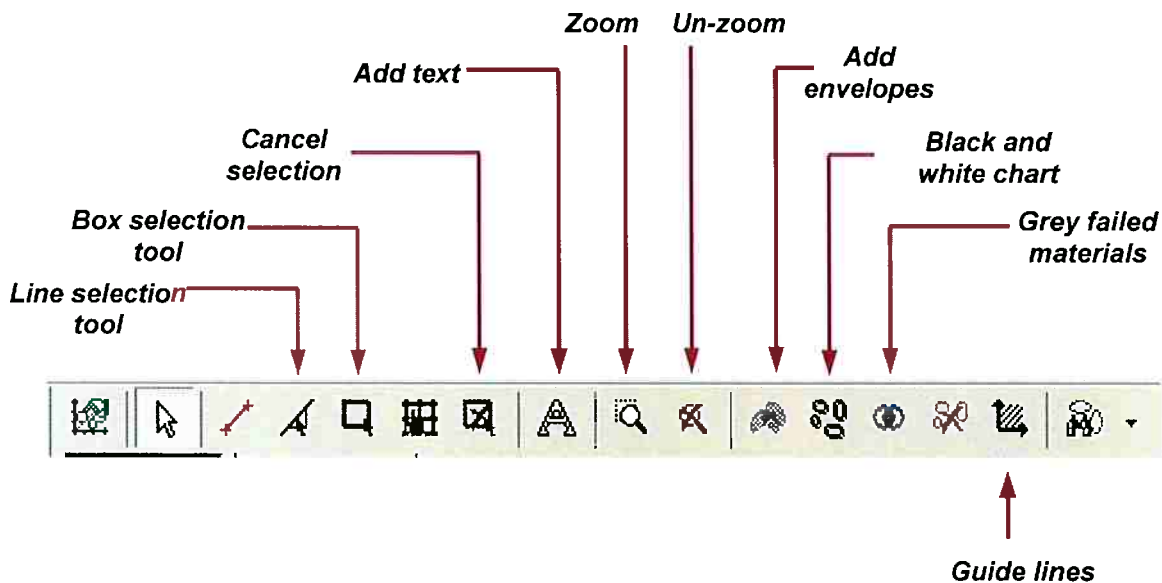


Figura 21: Ferramentas de trabalho do recurso gráfico (graph). Da esquerda para a direita: seleção por linha, seleção por caixa, cancelar a seleção, adicionar texto, ampliar, não ampliar, adicionar (mostrar) envelopes dos materiais, mapa preto e branco, materiais que falham na cor cinza, linhas de apoio [8].

Os materiais e processos aparecem nos gráficos e nas árvores de hierarquia com cores diferentes para tipos diferentes de materiais e processos. Os envelopes da figura 20 englobam os materiais que pertencem a mesma família. Para obter o nome do material dentro do gráfico, basta clicar em cima dele [8,10].

Os resultados (*result*) podem ser divididos pelos estágios de seleção feitos, ou seja, existe a possibilidade de ver os materiais ou processos que falharam para certo estágio. O recurso também classifica os materiais (rank) por ordem alfabética ou pelos valores dos eixos dos gráficos, com isso consegue-se obter de maneira simples qual material que otimiza o índice de performance referente a um eixo [8,10] (figuras 22 e 23).

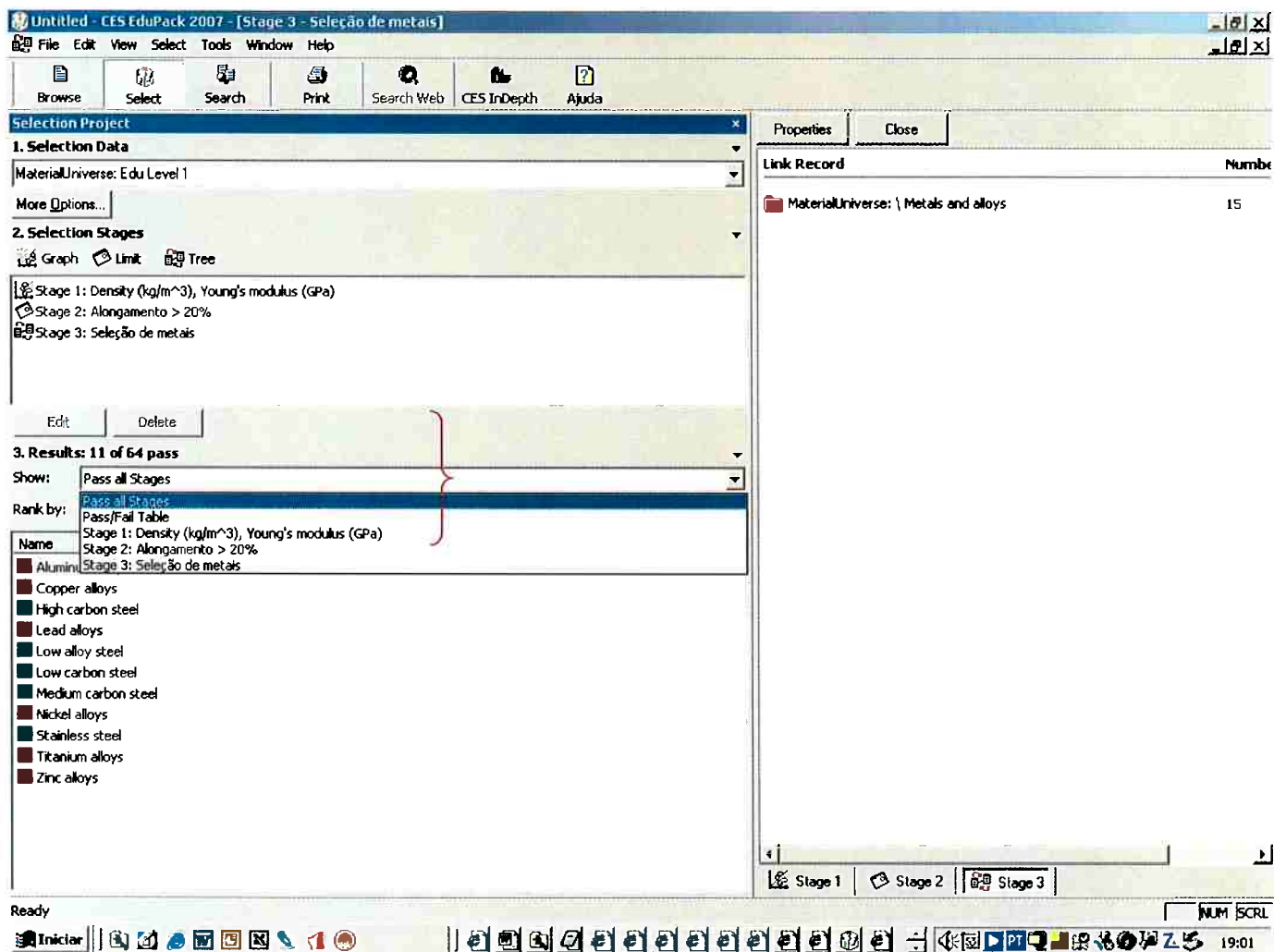


Figura 22: Tipos de escolha dos resultados a ser mostrado, CESEdpack2007, nível 2, subdivisão universo dos materiais.

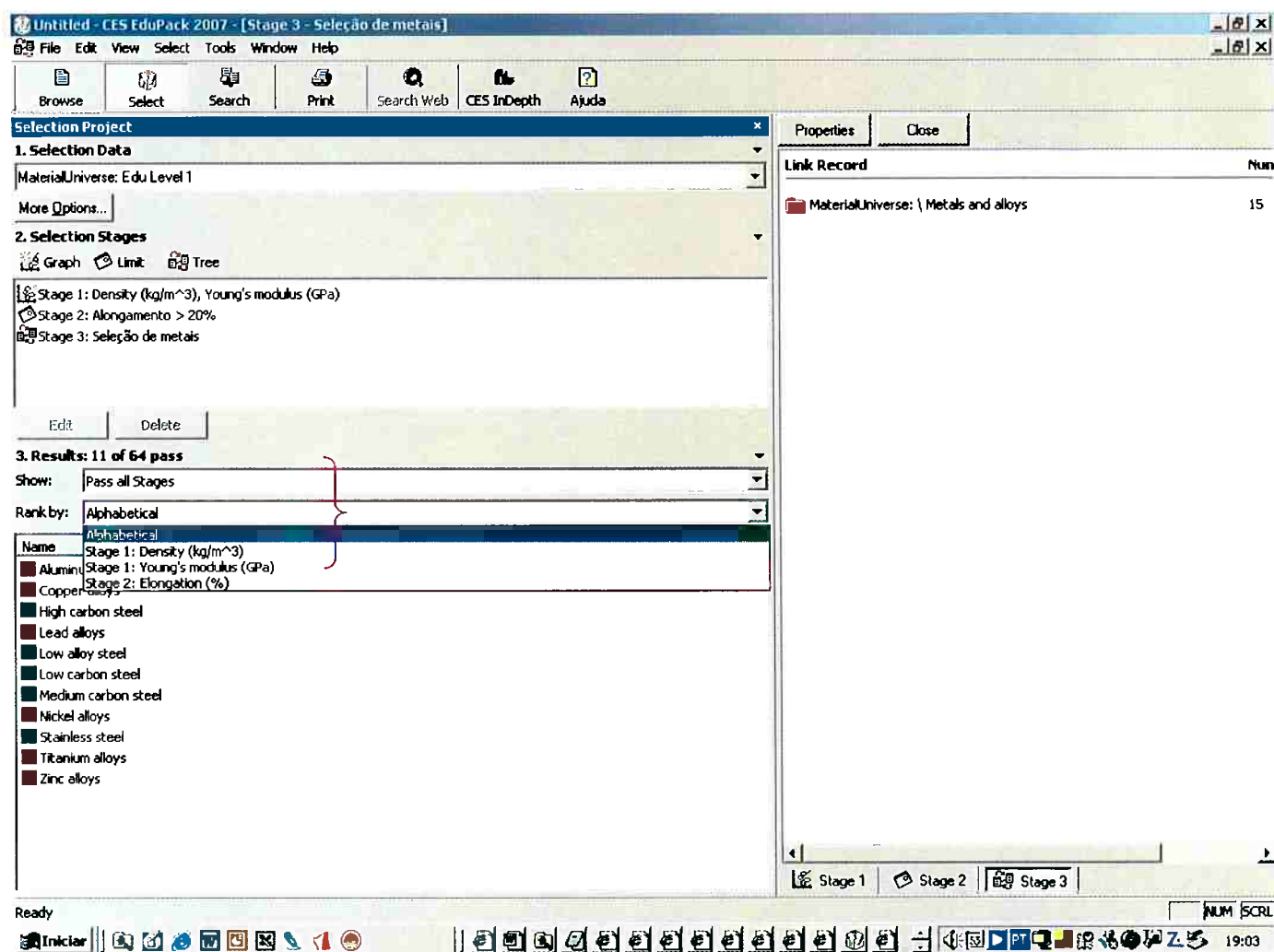


Figura 23: Tipos de classificação (rank) fornecidos pelo CESEdupack2007.

2.3. ECO-DESIGN

Eco-design é o termo para uma crescente tendência nos campos da arquitetura, engenharia e design em que o objetivo principal é projetar lugares, produtos e serviços que de alguma forma minimizem o impacto ambiental, substituindo e criando produtos e processos menos nocivos ao meio ambiente. O eco-design está relacionado com o termo sustentabilidade, pauta das grandes discussões ambientais dos dias de hoje e vem se tornando um valor importante para as empresas. Existe muita discussão neste contexto, mas define-se produto sustentável como aquele que causará o menor impacto possível ao meio ambiente durante sua vida útil [12-13].

Grupo de Materiais	Exemplos de Materiais	Vantagens Típicas	Desvantagens Típicas	Classificação de Sustentabilidade ^a
Metais	- Aço (Fe + C) - Alumínio - Bronze (e.g., Cu + Sn)	- Durável e resistente - Conformação Plástica - Geralmente baratos	- Alto custo de usinagem - Maior parte sensível à corr.	Fácil reciclagem (nova fusão) 2 - 3
Cerâmicas	Materiais sintéticos como: - Porcelana (argila) - Vidro mineral - Al₂O₃, Si₃N₄, SiC, etc.	- Não-tóxico - Leve - Duro e durável - Resistente à corrosão - Resistente à altas temp.	- Frágil - Alto custo de usinagem quando sinterizado - Não recomendado para carregamentos sob tensão	- Fácil depósito (não-tóxico) - Re-fusão possível, mas o processo é caro 2 - 3
Polímeros sintéticos	- Termoplásticos (e.g., PE, PS, PC, PP) - Blendas (e.g., epóxi) - Borracha (e.g., isopreno)	- Não-tóxico - Leve - Barato e de fácil conform. - Geralmente simples de reciclar (e.g., queima)	- Às vezes muito tóxicos quando queimados - Sensível a altas temperaturas	- Tipicamente não-renovável - Geralmente fácil de re-fundir ou queimar 1 - 3
Materiais orgânicos naturais	- Madeira - Algodão - Seda	- Renovável - Leve - Barato e de fácil conform. - Reciclável por queima	- Fácil decomposição - Não durável - Tóxico quando impregnado	- Reciclável por, por exemplo, queima - Renovável 2 - 3
Materiais inorgânicos naturais	- Rocha - Minerais	Ver cerâmicas acima!	- Frágil - Alto custo de usinagem quando sinterizado - Não recomendado para carregamentos sob tensão	Ver cerâmicas acima! 3
Compósitos	Mistura de materiais, e.g.: PS + fibras de vidro, Cu + W-fibras, Borracha + fibras têxteis, asfalto (óleo + pedra), Madeira-Polímero Compósitos (WPC)	- Uso otimizado dos mat. - Em geral leves e resist.	- Alto custo de produção - Propriedades bastante variáveis para diversos compósitos	Tipicamente baixa sustentabilidade devido a problemas no processo de separação dos diferentes materiais misturados 1 - 2

Notar que as vantagens/desvantagens e 'sustentabilidade' podem mudar devido a um tipo específico de material, e os exemplos dados não são válidos para todos os materiais de um grupo

^a A sustentabilidade é estimada em uma escala de 1 a 3, na qual 3 indica a mais alta (ou melhor) sustentabilidade e 1 a pior.

Tabela 2. As seis grandes classes de material, exemplos e aspectos para o projeto de produtos sustentáveis [13].

Para avaliarmos o impacto ambiental durante sua vida útil, utiliza-se a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA - Life Cycle Assessment), onde um produto é avaliado passo a passo do berço ao túmulo, fazendo com que seu custo, impacto, expectativa de vida, etc. possam ser quantificados facilmente. Uma maneira simples de identificar um produto ecologicamente correto é conferir a todos os produtos um peso ambiental, utilizando a Unidade de Peso Ambiental (ELU – Environmental Load Unit) em índice/Kg ou unidade. As estratégias para o Eco-design são, por exemplo, a utilização dos materiais de baixo impacto ambiental (tabela 2), escolher processos de fabricação conscientes, evitar o uso de materiais tóxicos, maximizar a eficiência da energia utilizada para a produção e para o funcionamento do produto, além de projetar métodos para controle de rejeitos e reciclagem [8-9,11,13].

O programa CES EDUPACK apresenta algumas propriedades ecológicas, que são divididas em três classes:

- Produção dos materiais:

Energia incorporada: quantidade de energia necessária para a produção de uma unidade de massa de um dado material a partir de seus minérios ou matérias-primas, sem considerar parcelas provenientes de combustíveis fósseis. A energia incorporada por unidade de massa, H_e , pode ser expressa da seguinte maneira:

$$(H_e) = \frac{\sum \text{Energia fornecida à indústria por ano}}{\text{Massa de material entregue por ano}} \quad (\text{Eq.11})$$

Fração reciclada: é a fração que corresponde à quantidade de material reciclado que existe no mercado do próprio material.

Emissão de CO₂: monitora-se a quantidade emitida pela indústria, avalia-se o proveniente de transportes, e a parte associada à manufatura das matérias-primas é estimada. O vestígio de CO₂ por unidade de massa é então:

$$(CO_2) = \frac{\sum \text{Massa de } CO_2 \text{ diretamente resultante da produção do material}}{\text{Massa de material entregue por ano}}$$

(Eq.12)

As expressões apresentadas de energia incorporada e de emissão de CO₂ exemplificam como funciona a análise de dados de entrada/saída. Durante o processo industrial considera-se o total de energia e CO₂ provenientes de recursos não-renováveis. Desconta-se deste total a parte atribuída aos combustíveis fósseis (carvão, etanol, biogás, etc.), para que seja considerada apenas a fração de energia que é recapturada e o carbono que é re-absorvido no crescimento da matéria orgânica da qual ele se originou. É importante reconhecer que os valores de energia incorporada e vestígio de CO₂ são, no máximo, aproximações [8-9].

Um ponto que merece atenção é a validade das variáveis apresentadas pelo programa. Um exemplo que serve de “tira-teima” é o caso do alumínio. A extração do alumínio da natureza é feita pelo processo Hall - Heroult, consome uma considerável quantidade de energia elétrica. A emissão de CO₂ por quantidade de material produzido deve levar em conta a matriz energética de cada país, pois a energia hidráulica não emite CO₂. As figuras 24 e 25 mostram um comparativo da matriz energética brasileira com a do mundo. Portanto deve-se reconsiderar o uso da variável emissão de CO₂ apresentada no programa para projetos no Brasil.

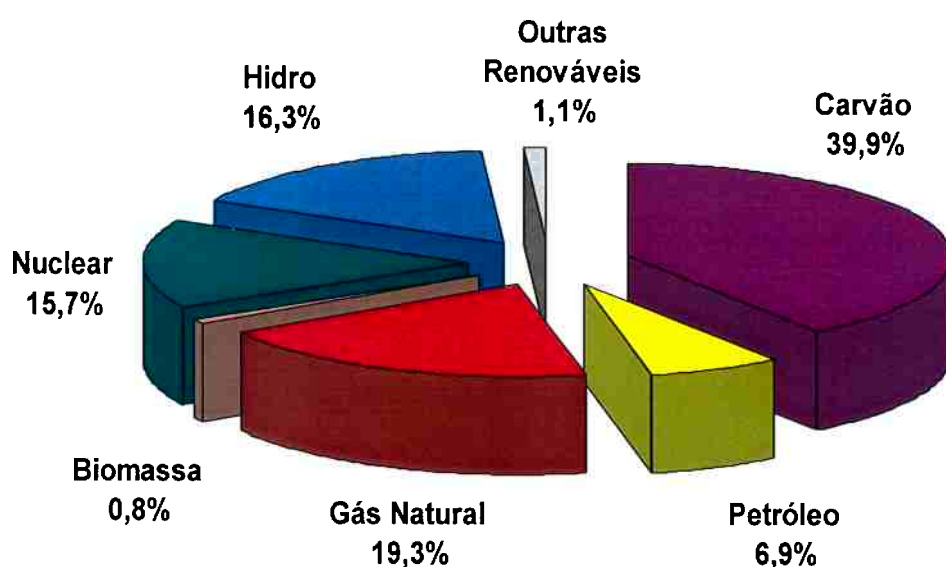


Figura 24: Matriz de geração de energia elétrica mundial [14] .

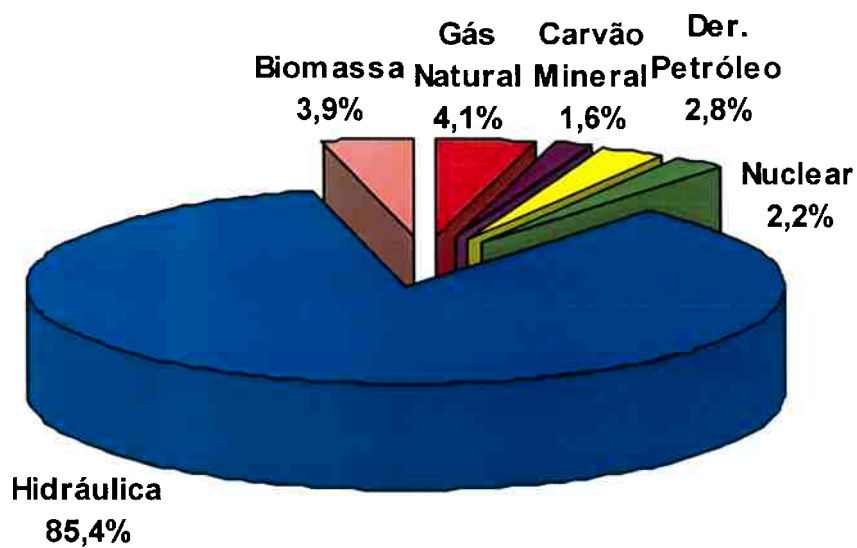


Figura 25: Matriz de geração de energia elétrica brasileira [14].

- Processos de fabricação

O indicador representa a quantidade total de energia em cada etapa de processo (fusão, tratamento térmico, soldagem) dividida pelo total em massa de material processado.

- Reciclagem e despejo:

Separa os materiais que podem ser : recicláveis; reaproveitáveis; biodegradáveis; combustível para recuperação de energia; disposição em aterros; e renováveis. Com a definição de propriedades ecológicas dentro do método de seleção de materiais ou processos, é possível elaborar índices de performance e mapas de Ashby para objetivos e restrições ambientais, fornecendo aos engenheiros e projetistas dados consistentes e prontos para o uso [15].

2.4. QUADRO DE BICICLETA

As primeiras bicicletas datam dos séculos XV e XVI, manufaturadas em madeira e reforçada com metais (vide figura 20). Além de pesadas e desajeitadas, as primeiras bicicletas eram movidas pelo condutor (duas rodas ligadas por uma trave de madeira e movidas por impulsos alternados dos pés no chão) ou por sistemas de correntes ou alavancas (criados por Leonardo da Vinci) [16-18].

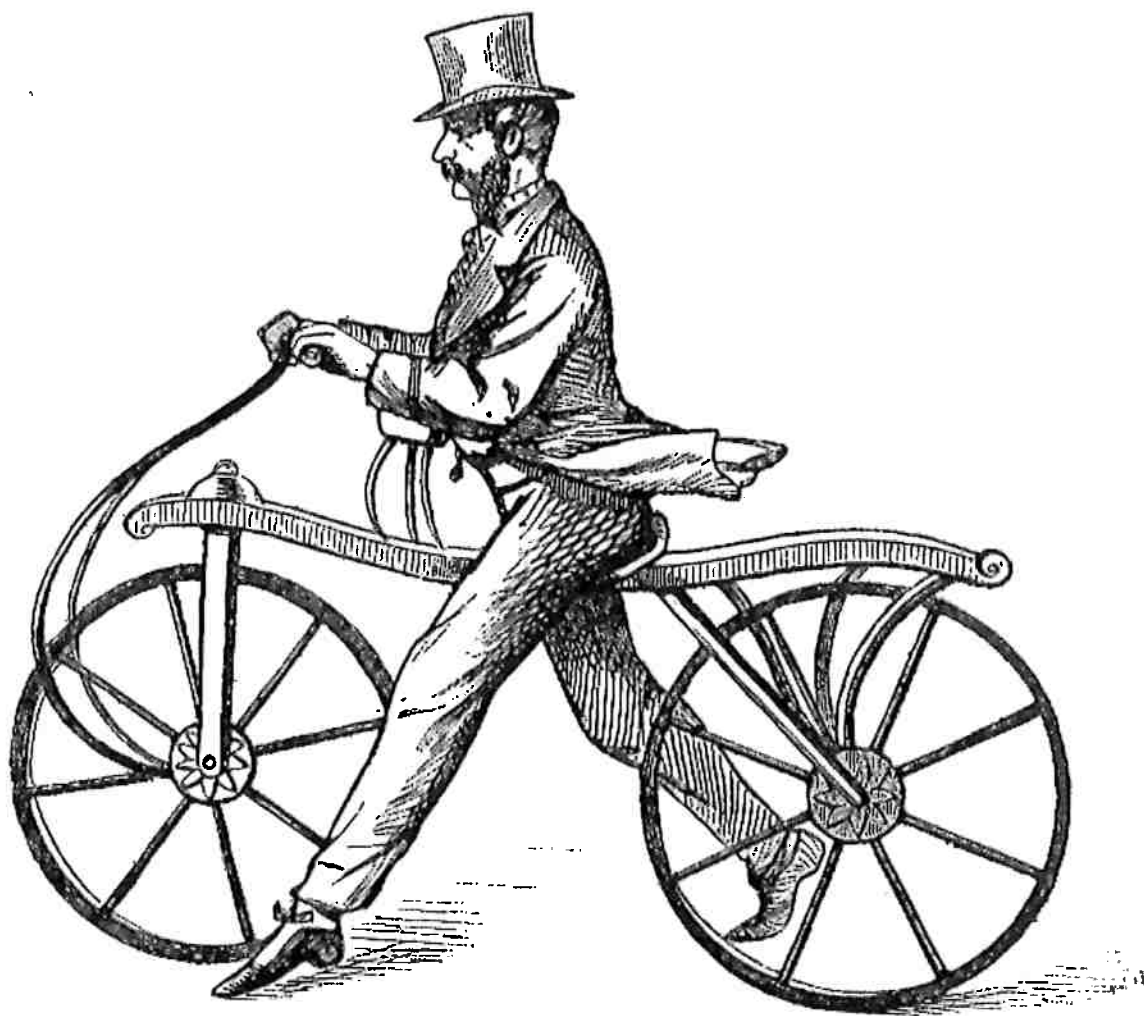


Figura 26: Primeiro tipo de bicicleta, patenteada em 1818 pelo Barão von Drais na França.[16]

Os avanços nos sistemas de transmissão e no desenvolvimento de pneus de borracha e dos tubos de aço, permitiram que na segunda metade do século XIX, a bicicleta se consolidasse como veículo de transporte, lazer e prática esportiva. No final do século XX, a introdução de novos materiais (alumínio, titânio, fibra de

carbono e fibra de vidro) e de ferramentas de *design* permitiram uma segunda onda na evolução dos quadros de bicicleta. A figura 27 mostra de modo bastante genérico as principais famílias de materiais utilizados na fabricação de bicicletas (com uma pequena lista de prós e contras para cada família de material). Tendo-se em vista a vasta gama de materiais e a crescente competitividade de mercado, com definição de mercados cada vez mais fragmentados, a escolha do material para um quadro de bicicleta está cada vez mais associada com os objetivos do fabricante e com as necessidades de cada nicho de mercado. Dentro deste escopo, alguns consumidores trocam (*trade-off*) custo ou eficiência por estética ou por um selo verde [9,16-19]. Um caso interessante é o da bicicleta do quadro de bambu, que apesar do seu grande amortecimento de vibrações, baixo peso e alto valor rigidez, não possui outras propriedades mecânicas de concorrentes diretos (alongamento, tenacidade à fratura, limite de escoamento e limite de fadiga) . Ainda sim, a bicicleta é comercializada para um público “verde” por Calfee Design pelo preço de U\$ 3.100,00 (vide figura 28) [22-23].

	Módulo de Young, E (Gpa)	Limite de Resistência (MPa)	Limite de escoamen to (Mpa)	Alongam ento (%)	(Limite de Fadiga) / (Limite de Resistência (5x10 ⁸ ciclos)	Densidade (Mg/m ³)
Aços						
Médio Carbono	200	520	310	26	0,5	7,85
CrMo (AISI 4130)	200	1.425	1.240	12	0,5	7,85
Ligas de Alumínio						
2024-T4	73.1	470	325	20	0,29	2,8
6061-T6	68.9	310	276	12	0,31	2,8
7075-T6	71.7	570	503	11	0,265	2,8
Magnésio	44	248	200	8,00	0,37	1,79
Ligas de Titânio						
IMI 125(pure)	105-120	390-540	340	20-29	0,5	4,51
IMI 318	105-120	~1,000	900	8	0,55	4,42
Compósitos						
Fibra de vidro	90	3,750?	3.450	3.5?	0,16	2,63
graphite-epoxy	221	3600?	2.000	1,25	0.25?	1,75
Boro-epoxy	250?	1.200	?	?	0.80?	1,9
Boro-alumínio	165	1.025	?	0,65	0,7	2,4
Kevlar-49-resina	75	1.380		2,75	0,7	1,45
Vidro-nylon (DuPont Zytel FE8018 NC-10)	2.3	59.9	59,9	14	?	1,18
Madeiras	12	100	60	?	?	0,67

Tabela 3: Propriedades de materiais usados em quadro de bicicleta, com ? = desconhecido

[17].

Comparação dos Materiais Usados em Bicicletas

AÇO		TITÂNIO	
Prós	Contras	Prós	Contras
• Barato • Resistente • Rígido • Resiliente e barato • Fácil processamento e reparo	• Pesado • Corrosivo • Projeto limitado pelos padrões de tubos • Polimento e soldagem resultam em zonas mais fracas afetadas pelo calor	• Leve • Resistente • Resiliente • Absorve choques • Não-corrosivo	• Caro • Projeto limitado pelos padrões de tubos • Dificuldade de reparo • Disfarça soldas ruins • Substitui resistência por leveza
ALUMÍNIO		FIBRA DE CARBONO	
Prós	Contras	Prós	Contras
• Barato • Leve • Suficientemente resistente • Bastante rígido em relação ao peso • Não-corrosivo em meios dessalinizados	• Risco de fadiga requer "superdimensionamento" • Pouco resiliente e caro • Dificuldade de reparo • Juntas propensas à falha • Tratamento térmico pode ser inconsistente	• O mais leve • O mais resistente • Melhor absorção de choques • Aplicações ilimitadas • Não-corrosivo • Alta tolerância à fadiga • Facilidade de reparo em alguns projetos	• Caro • Tecnologia em evolução • Resistência e rigidez dependentes do projeto • Limitações de tamanhos para peças moldadas

Figura 27: Comparação de alguns materiais usados em bicicletas.[15]



Figura 28 – Bicicleta com quadro de bambu comercializada por Calfee Design [23]

O projeto de um quadro de bicicleta leva em consideração a sua resistência (mecânica, corrosão) durante o uso e o conforto do usuário. As restrições de projeto de uma bicicleta de corrida para competição difere de uma bicicleta de montanha, de uma bicicleta de estrada, de uma bicicleta de *cross*, de uma bicicleta de passeio, de uma bicicleta híbrida ou de uma bicicleta popular. Algumas das propriedades relevantes ao projeto de quadro de bicicleta são listadas abaixo, mas elas variam com os objetivos do fabricante[16-21]:

- limite de escoamento: o material deve trabalhar dentro do seu regime elástico;
- limite de fadiga: presença de tensões alternadas pode provocar a ruptura do material em níveis de tensão inferiores ao seu limite de ruptura;
- tenacidade à fratura: material deve resistir ao choque e à propagação de trincas estáveis durante uso;
- amortecimento de vibrações: conforto do usuário e minimização de dano por fadiga;
- alongamento: indica que o material não apresentará comportamento frágil;
- resistência à corrosão;
- módulo de Young (rigidez); quadros de bicicletas rígidos aumentam a performance (bicicletas para competição), porém diminuem o conforto durante uso, pois durante o uso, a força aplicada quadro não é absorvida pelo material.
- massa (densidade): o quadro é o maior componente da bicicleta e diminuir seu peso aumenta a performance e facilita o uso para os ciclistas.

Além destas variáveis, o preço dos materiais também serve de critério para o projeto. A tabela 3 apresenta os valores destas propriedades para materiais utilizados em quadros de bicicleta, com exceção da tenacidade à fratura. Os quadros de bicicleta possuem fontes de concentradores de tensão, devido a diferenças de tamanho entre os tubos e de processos de junção, exigindo do projetista cuidados na montagem e dimensionamento dos tubos [9,16-21]. O uso de ferramentas computacionais (elementos finitos) tem sido abordado para o projeto de quadros de bicicleta em função das diferentes tensões aplicadas em cada tipo de uso. Consideram-se nestes experimentos fatores como resistência do vento, forças aplicadas pelo condutor, choques com a superfície e diferentes apoios para diferentes modelos de quadro [16-22].

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Avaliou-se o método de seleção de materiais em projetos de quadros de bicicletas através de restrições e objetivos distintos para dois casos diferentes, que serão abordados nos itens desse capítulo utilizando o banco de dados nível 2 para o universo dos materiais.

3.1- CASO A

Este projeto objetiva minimizar a massa, tendo como restrições a rigidez, o limite de escoamento e a tenacidade à fratura. Neste caso selecionou-se o material que minimiza a massa e ao mesmo tempo maximiza a rigidez e o limite de escoamento. Fixou-se a restrição de tenacidade à fratura $> 15\text{MPa.m}^{1/2}$, com a barra se comportando como um tubo carregado em compressão [9,16]. Desta maneira, define-se o índice de performance para cada uma das restrições, rigidez e limite de escoamento. A “tradução dos requisitos” do projeto esta na tabela 4.

Função	• Tubo carregado em compressão
Restrições	• Tenacidade a Fratura $> 15\text{MPa.m}^{1/2}$ • Rigidez: máxima • Limite de escoamento: máximo
Objetivos	• Minimizar massa
Variáveis	• Espessura do tubo • Escolha do material

Tabela 4: Tradução dos requisitos contorno do projeto do caso A.

Retirou-se da literatura os “índices do material” M1 (rigidez) e M2 (limite de escoamento) pertinentes à “tradução dos requisitos do projeto” da tabela 4, vistos nas equações 15 e 16 [9]. A partir de M1 e M2 definiram-se os “índices de performance” P1 (rigidez / flambagem) e P2 (escoamento) que ao serem minimizados diminuem a massa, vide equações 17 e 18.

$$\rho / E^{1/2} = M1, \dots \dots \dots (Eq.15)$$

onde:

- E é o módulo de Young;
- ρ a densidade;
- M1 é o “índice do material” para a restrição rigidez.

$$\rho / \sigma_y = M2, \dots \dots \dots (Eq.16)$$

onde:

- σ_y é o limite de escoamento;
- ρ é a densidade;
- M2 é o “índice do material” para a restrição limite de escoamento.

$$P1 = F1 \times G1 \cdot (M1), \dots \dots \dots (Eq.17)$$

onde:

- F1 e G1 são restrições funcionais e geométricas.

$$P2 = L2 \times F2 \cdot (M2), \dots \dots \dots (Eq.18)$$

onde:

- F2 e G2 são as restrições funcionais e geométricas.

Para que ambas as restrições fossem priorizadas, igualou-se P1 e P2, retirando-se a constante C_c de iso-performance para P1 e P2, vista na equação 19. A constante depende da geometria do quadro (Ex: momento de inércia, espessura), e dos esforços, estes que se relacionam com as condições de uso da bicicleta (competição, passeio). O mapa de Ashby de M1 versus M2 serviu para encontrarem-se as linhas de iso-performance, para diferentes valores de C_c . Estipulando-se valores de C_c , a solução é o material mais próximo do eixo x.

$$C_c = (F2 \times G2) / (F1 \times G1), \dots \dots \dots (Eq.19)$$

onde:

- F1, G1, F2 e G2 são restrições funcionais e geométricas.

2.2 CASO B

Neste caso objetivou-se avaliar o material que menos causa impacto ambiental e ao mesmo tempo minimiza a massa. Trata-se de um caso com objetivos em conflito, pois minimizar a massa da bicicleta não necessariamente diminui a quantidade de energia gasta na fabricação do material. As restrições para este caso são: o limite de fadiga, tenacidade à fratura, limite de escoamento, ser reciclável e disposição em aterros. As restrições fixas são: limite de fadiga $> 90 \text{ MPa}$; tenacidade à fratura $> 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$; ser reciclável; possibilidade de disposição final em aterros e a energia incorporada. A tradução dos requisitos do projeto está na tabela 5.

Função	• Tubo carregado em compressão
Restrições	• Tenacidade à Fratura $> 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ • Reciclável • Limite de fadiga $> 90 \text{ MPa}$ • Disposição em aterros • Limite de escoamento: máximo
Objetivos	• Minimizar massa • Minimizar consumo de energia (impacto ambiental)
Variáveis	• Espessura do tubo • Escolha do material

Tabela 5: Tradução dos requisitos do projeto do caso B.

Utilizaram-se os recursos de "linha trade-off" e da "função penalidade" através da definição dos índices de performance para o objetivo de minimizar a massa e o impacto ambiental, dados respectivamente pelas equações 20 e 21. É importante ressaltar que ambos os objetivos são alcançados conforme os valores dos índices diminuem.

$$P1 = F1 \times G1 \times (\rho / \sigma_y) \dots \dots \dots (Eq.20)$$

$$P2 = F2 \times G2 \times (He \times \rho) \dots \dots \dots (Eq.21)$$

Onde:

- He é a energia “incorporada”,
- ρ é a densidade;
- σ_y é o limite de escoamento.
- F1, G1, F2 e G2 são restrições funcionais e geométricas.

A partir de P1 e P2, definiu-se a função Z como a função penalidade (*penalty function*), dada pela equações 22 e 23.

$$Z = \alpha \times P1 + b \times P2 \dots \dots \dots (Eq.22)$$

Onde :

- α e b são constantes;
- P1 e P2 os índices de performance das equações 18 e 19, respectivamente.

$$P1 = Z / \alpha - P2 / \alpha \dots \dots \dots (Eq.23)$$

Assim existe uma relação linear entre P1 e P2. Construindo-se diversas retas paralelas com inclinação de $-1/\alpha$, o material mais adequado será aquele que estiver mais próximo da linha trade-off. A busca por valores razoáveis da constante α na literatura não teve resultado positivo, assim adotou-se $\alpha = 10.000$. Com esta constante, procurou-se dar pesos iguais para os dois objetivos em questão. Os materiais que ficam mais próximos do ponto de tangência entre a “linha *trade-off*” e a “função penalidade” foram selecionados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CASO A

Para esta etapa do método foi utilizado o software CES EDUPACK 2007.

- Uso das restrições do projeto: tenacidade à fratura $>15\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. (figura 29)

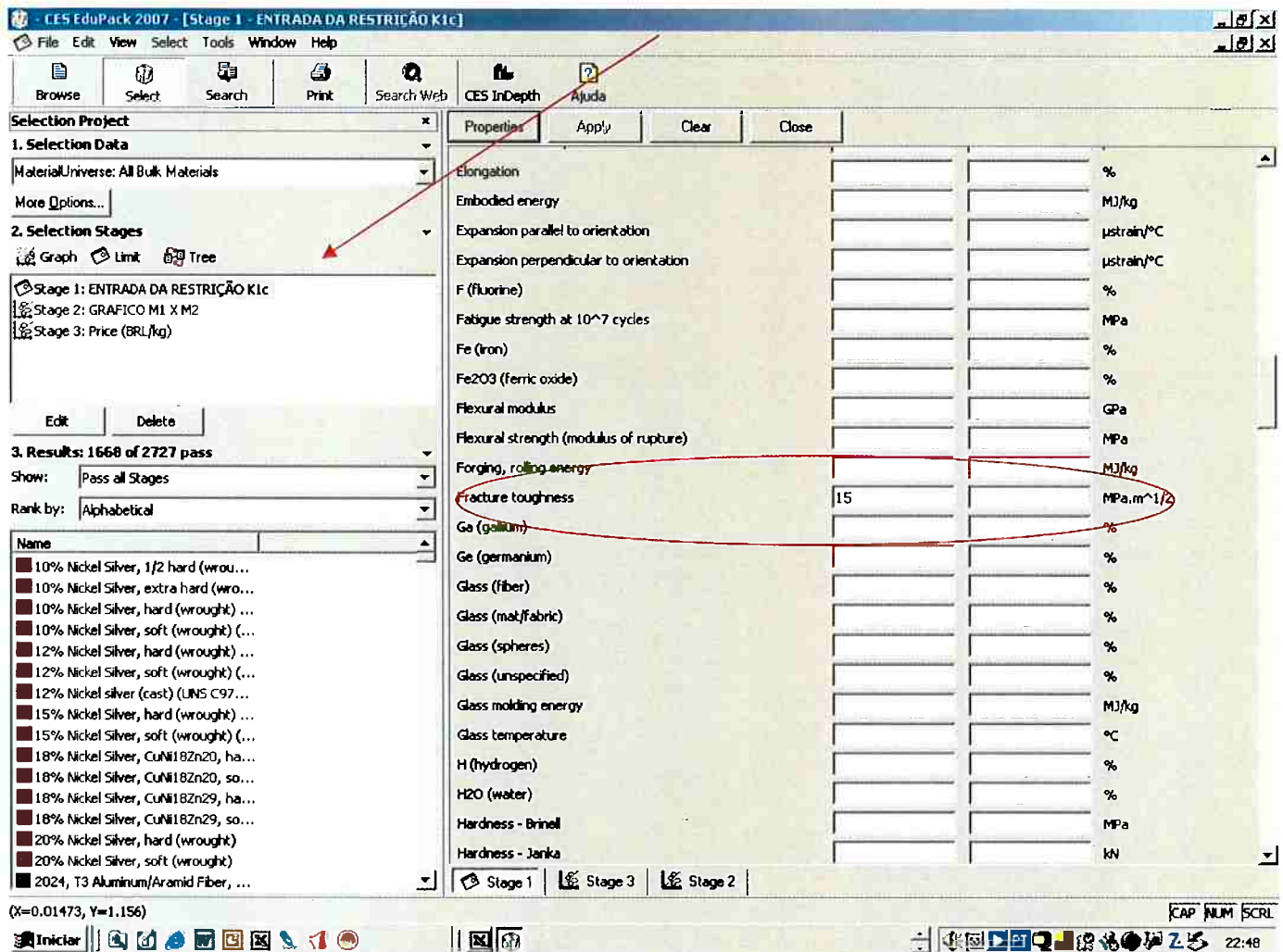


Figura 29: Introdução da restrição de tenacidade à fratura $>15\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, utilizando o recurso limite (limit), banco de dados nível 3, sub-divisão universo dos materiais.

- Mapa de $M1$ (p / σ_y) x $M2$ ($p / E^{1/2}$), vide figura 30.

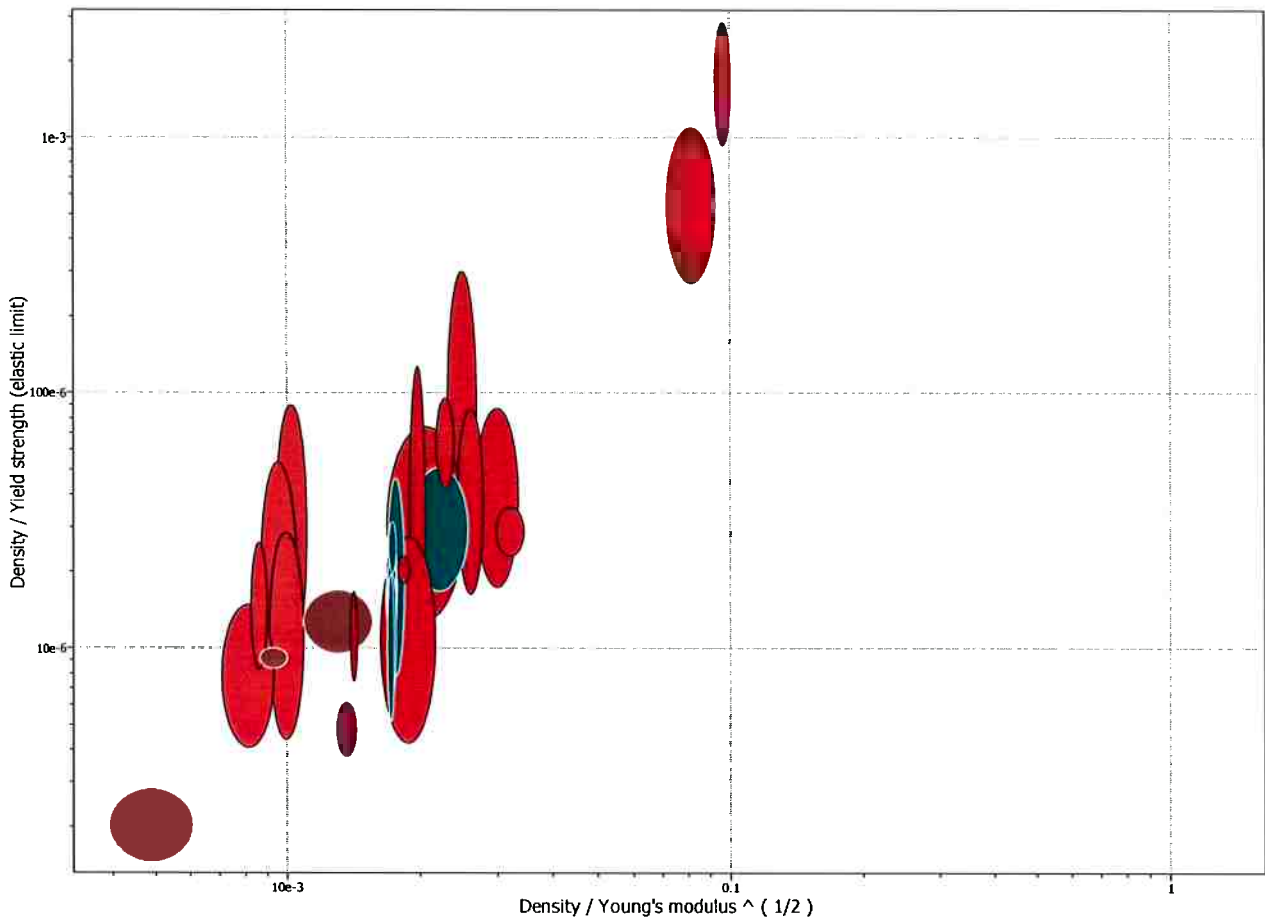


Figura 30: “Mapa de Ashby” contendo os “índices do material”, densidade dividida pelo limite de escoamento no eixo y (M1) e densidade dividida pelo módulo de Young ao quadrado (M2), para banco de dados nível 2 do CESEdupack2007, em escala logarítmica.

- Uso de linhas de apoio com inclinação 1, para visualização de linhas de iso performance para diferentes valores de C_c , que aparecem no mapa como a intersecção da reta com eixo y ($\log C_c$). (figura 31)

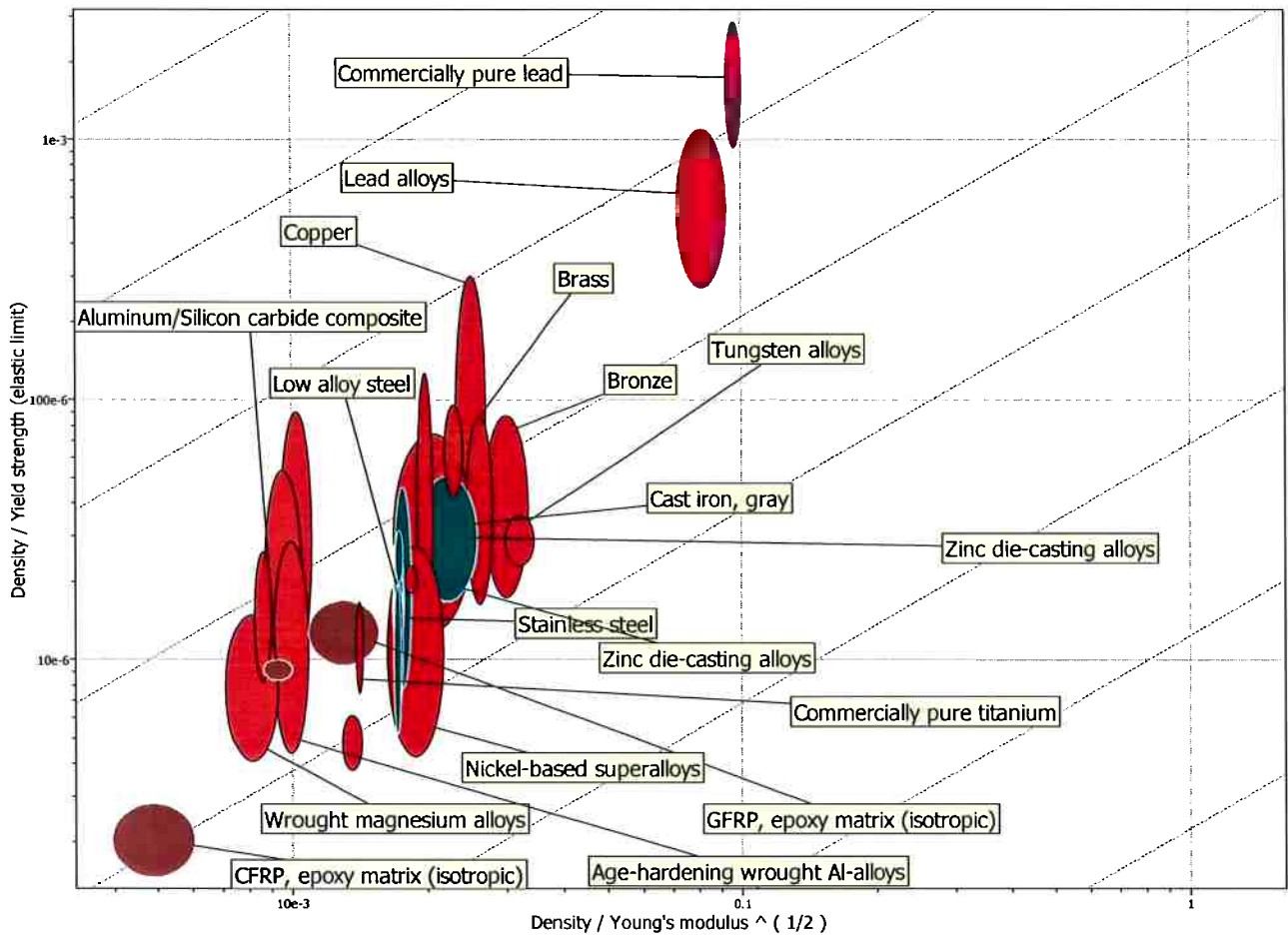


Figura 31: Mapa de $M1 \times M2$, com linhas de apoio com inclinação 1, com os nomes dos materiais representados pelas “bolhas”, banco de dados nível 2, em escala logarítmica, extraído do CESEdupack2007.

- Pelo mapa da figura 31, consegue-se extrair a faixa de valores de C_c . Para linha mais baixa que cruza algum material tem-se $C_c \sim 1,00009$, equação 24, e para a mais ‘alta’, desconsiderando o cobre e o chumbo, $C_c \sim 1,021$, equação 25.

$$\log C_c = 1,3 \times 10^{-6} \leftrightarrow C_c \sim 1,000003 \dots \dots \dots (\text{Eq. 24})$$

$$\log C_c = 40 \times 10^{-6} \leftrightarrow C_c \sim 1,00009 \dots \dots \dots (\text{Eq.25})$$

- Para $C_c = 1,0000046$ (média aritmética dos valores das equações 24 e 25) a solução são os compósitos reforçados com fibra de carbono isotrópicos (CFRP, epoxy matrix, isotropic), figura 32.

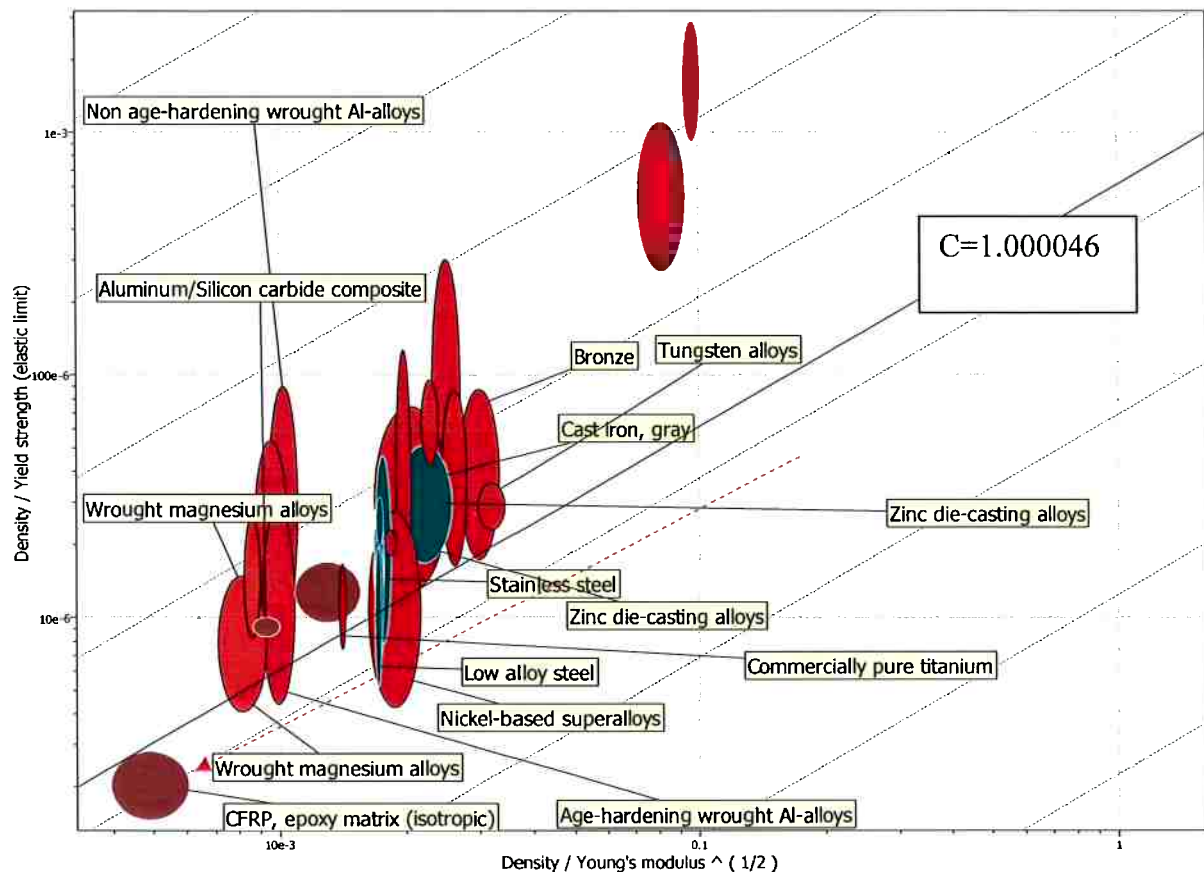


Figura 32: Mapa de $M1 \times M2$, com linha de iso-atividade de constante $C_c=1.000046$, apontando o material que minimiza a massa, banco de dados nível 2, escala logarítmica, extraído do CESEdpack2007.

4.1.1 Discussão do caso A

Utilizou-se o banco de dados nível 2, para simplificar as soluções em função das simplificações do projeto e da estimativa de C_c . O mapa para o nível 3 está na figura 33, e mostra soluções muito particulares que não teriam sentido o intuito deste trabalho. A estimativa de C_c levou em conta uma linha de iso-performance que atravessa os materiais de uso em quadros, como visto na tabela 3, para validar a escolha dos compósitos de fibra reforçados com fibra de carbono (*CFRP, epoxy matrix (isotropic)*), como os materiais que minimizam a massa otimizando o limite de escoamento e a rigidez. Segundo Calfee [19], as fibras de carbono são o futuro dos quadros de bicicleta.

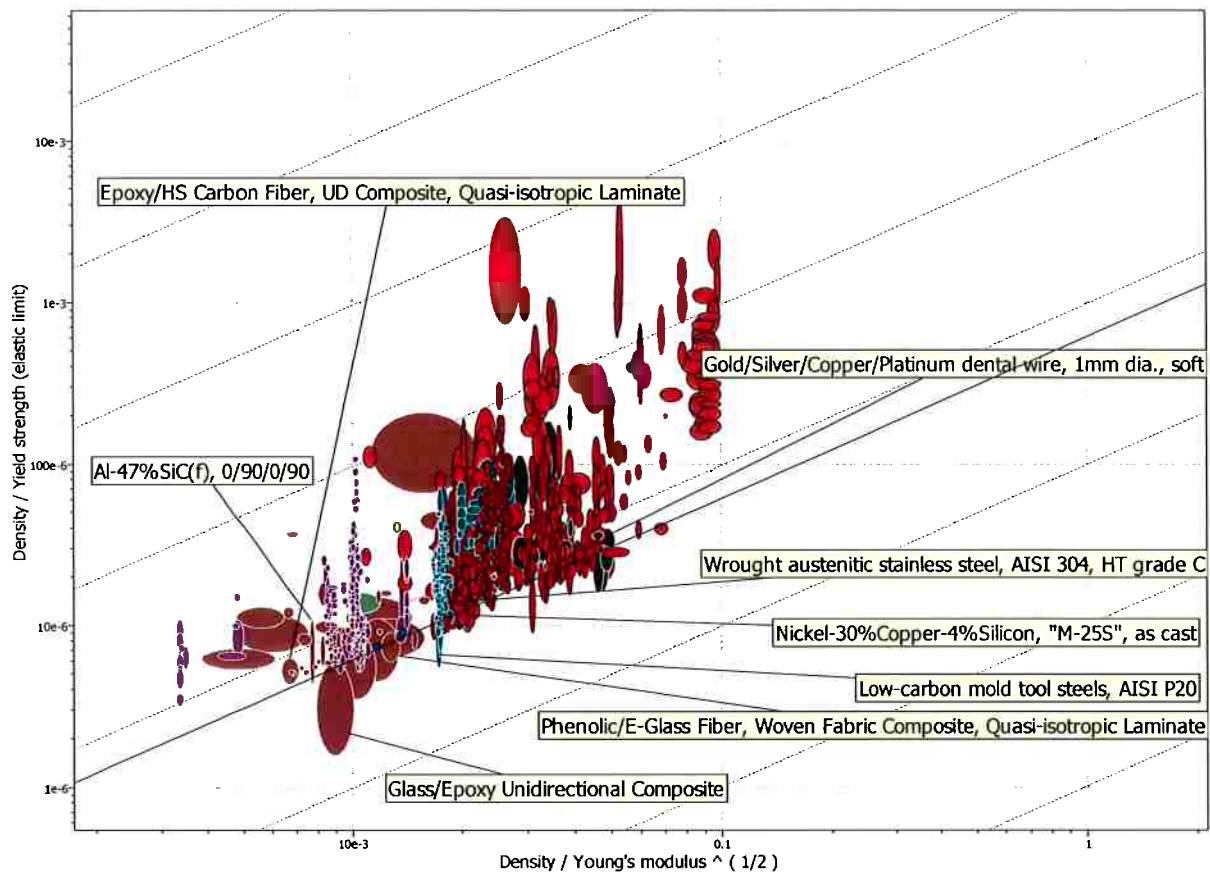


Figura 33: "Mapa de Ashby" contendo os "índices do material", densidade dividida pelo limite de escoamento no eixo y ($M1$) e densidade dividida pelo módulo de Young ao quadrado ($M2$) com linha de iso-performance para $C_c = 1,000046$, banco de dados nível 3 do CESEdupack2007, em escala logarítmica.

4.2 CASO B

Para esta etapa do método foi utilizado o software CES EDUPACK 2007.

- Uso das restrições: Tenacidade à Fratura $>15\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$; Reciclável; Disposição em aterros; Limite de Fadiga $> 90\text{Mpa}$. (figuras 34 e 35)

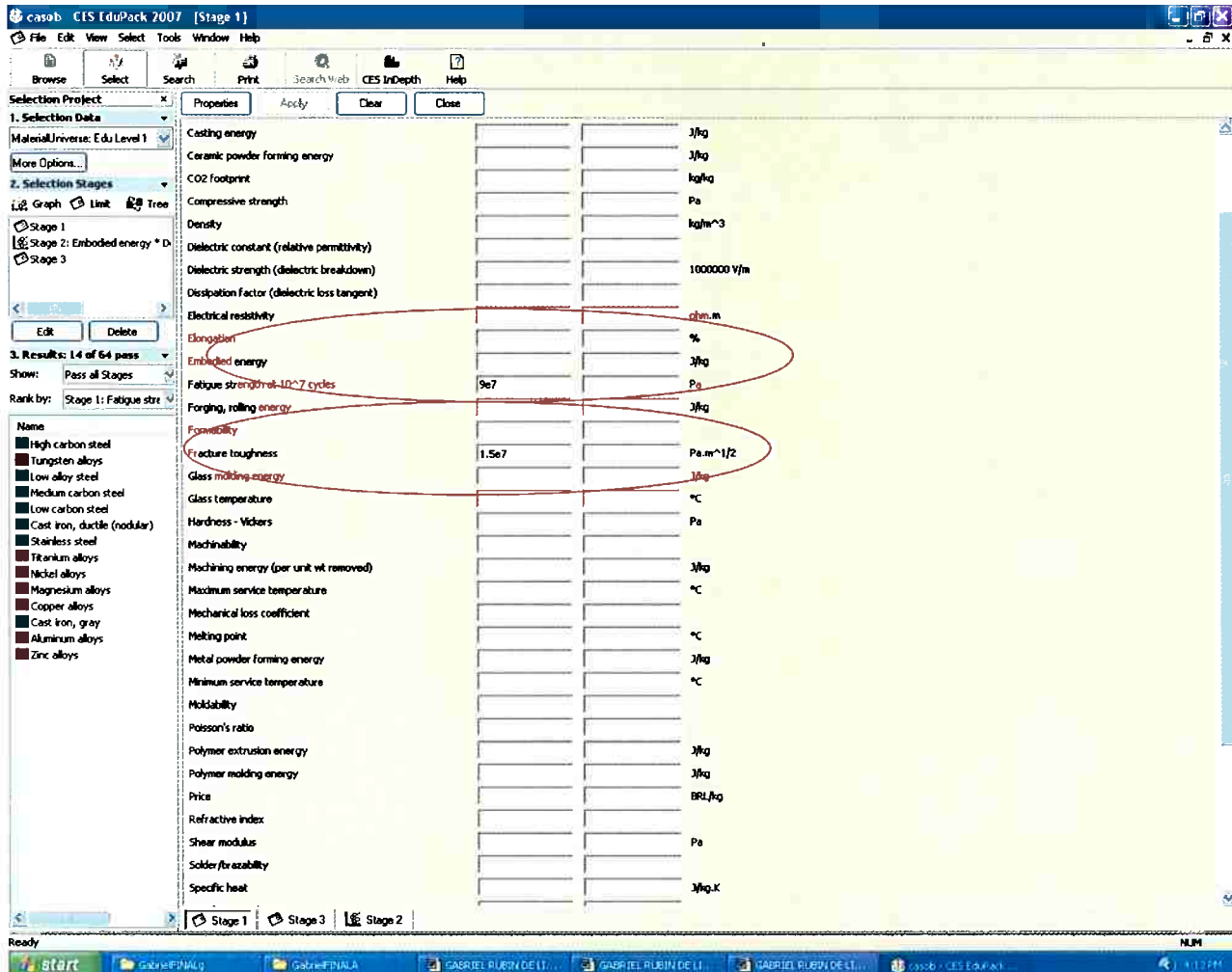


Figura 34: Restrições mecânicas do caso B inseridas no recurso limite (limit), CESEdupack2007.

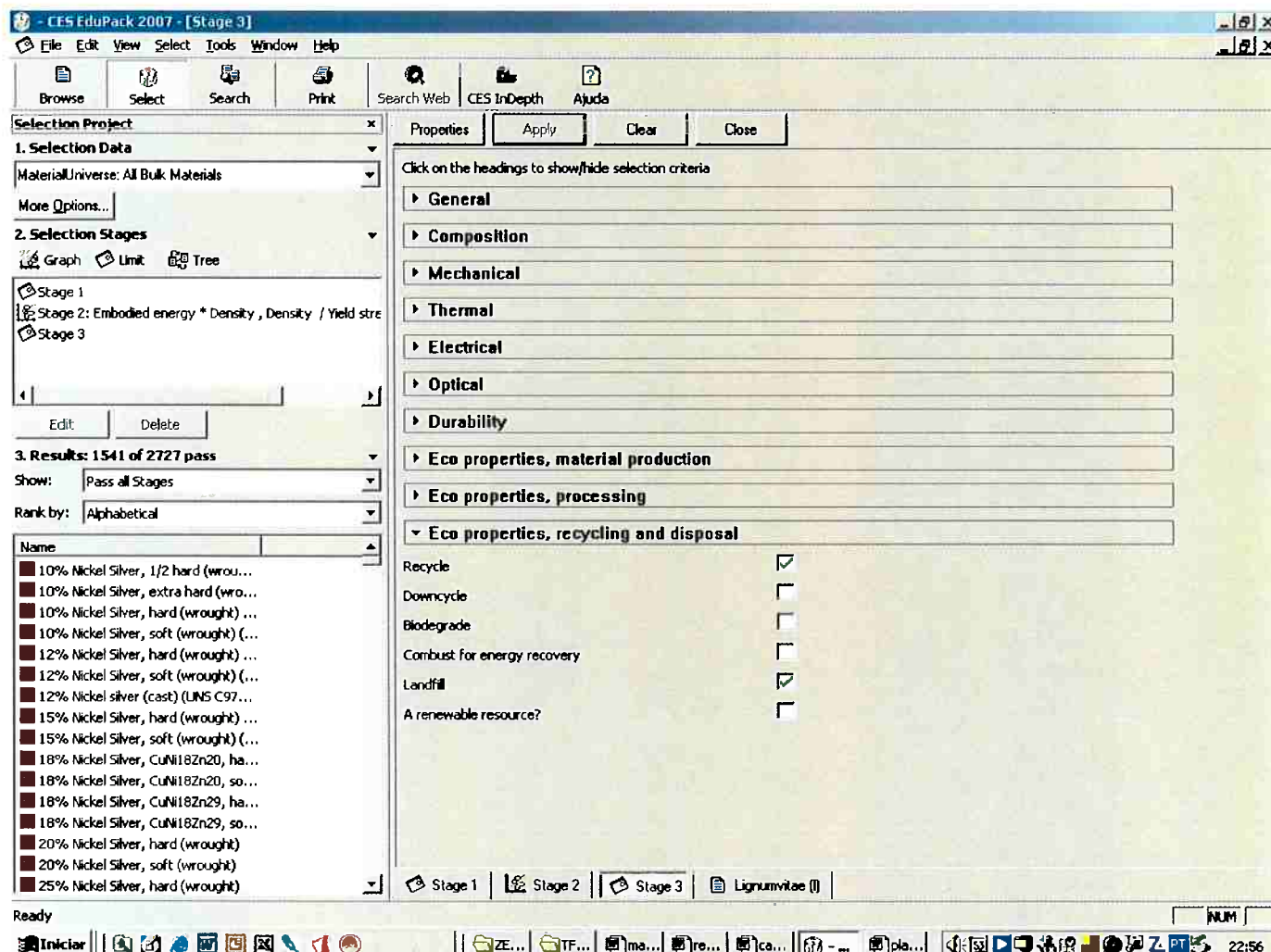


Figura 35: Restrições não numéricas de cunho ambiental inseridas no caso B através do recurso limite (limit), CESEdpack2007.

- Construiu-se o “mapa de Ashby” com os “índices do material” de $P1$ (ρ / σ_y) e $P2$ ($H_e^* \rho$), respectivamente nos eixos y e x (vide figura 36); construída a “superfície *trade-off*”. Definida a variável $\alpha = 10000$, introduziu-se a “função penalidade” Z e procurou-se o ponto de tangência com a “superfície *trade-off*”. (vide figura 36).

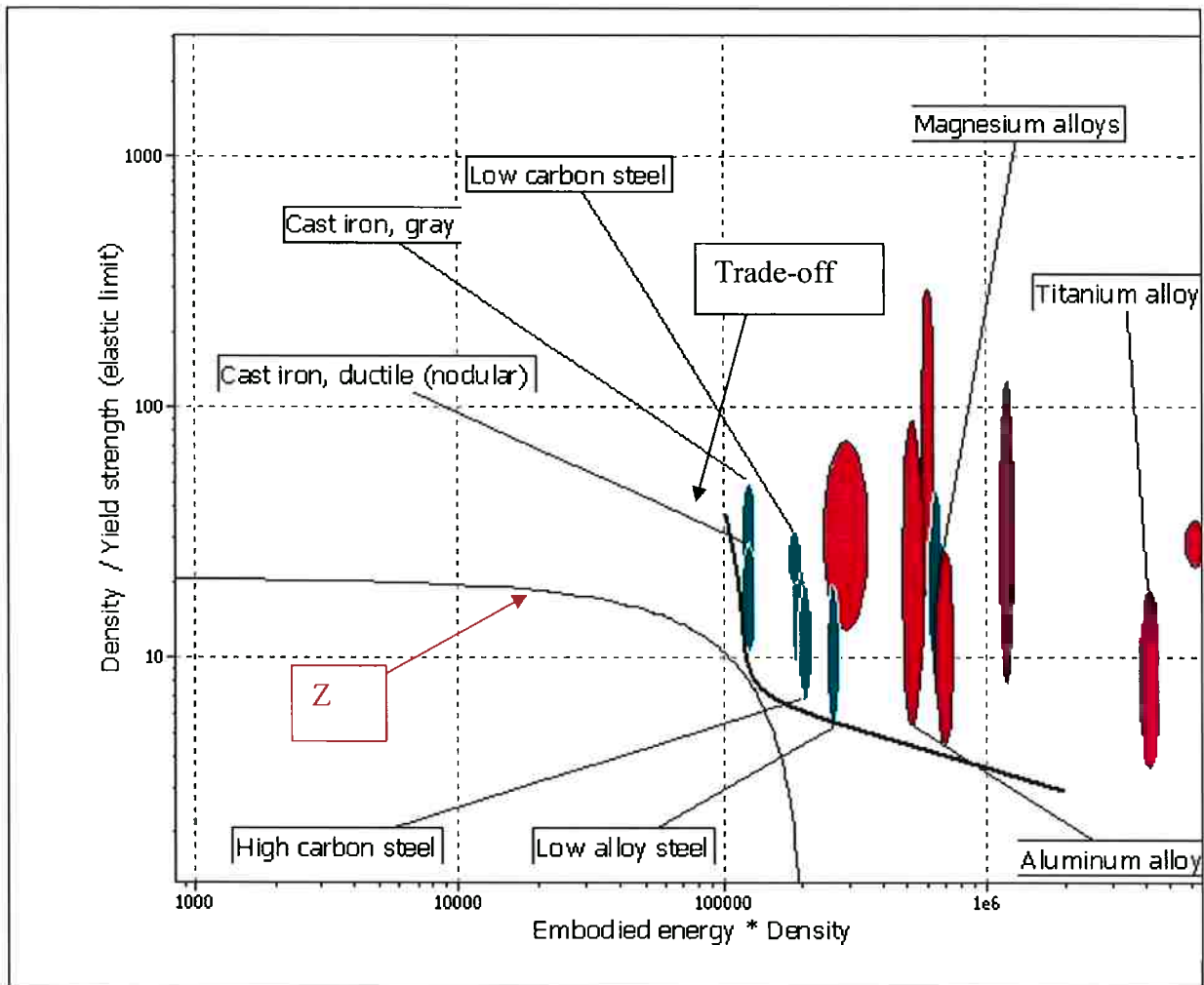


Figura 36: Mapa de $P1(\rho / \sigma_y) \times P2(He * \rho)$, com “superfície trade-off”, “função penalidade” Z para $\alpha = -10000$ ($1/\alpha = -.0001$), nomes dos materiais, banco de dados nível 2 em escala logarítmica, extraído do CESEdupack2007.

- As soluções que mais se aproximam do ponto de tangência entre as curvas são: ferros fundidos nodular (cast iron, ductile (nodular)) e os aços com alto teor de carbono (high carbon steel).

4.2.1 Discussão do caso B

A fabricação de tubos por fundição é complexa, ainda mais para o caso de quadros de bicicleta, com espessura média de 0.5 mm, além de não apresentarem boa soldabilidade. Assim podemos escolher como melhor solução os aços AC (alto carbono). A escolha da propriedade ecológica energia incorporada levou em

consideração a matriz energética brasileira (figura 25), como previamente discutido neste trabalho. O valor de 90 MPa para o limite de fadiga foi extraído da liga de alumínio 6061 T6, usada para a fabricação de quadros e 15MPa para a tenacidade à fratura retirado de um exemplo do Prof. Ashby [8]. Estas restrições eliminaram o bambú de nossa seleção, tido como o material ambientalmente correto (figura 37). Isto mostra que restrições a partir da necessidade de mercado (supondo que esta seria para o público verde) trocam o bambu (o que o mercado busca) pelo aço.

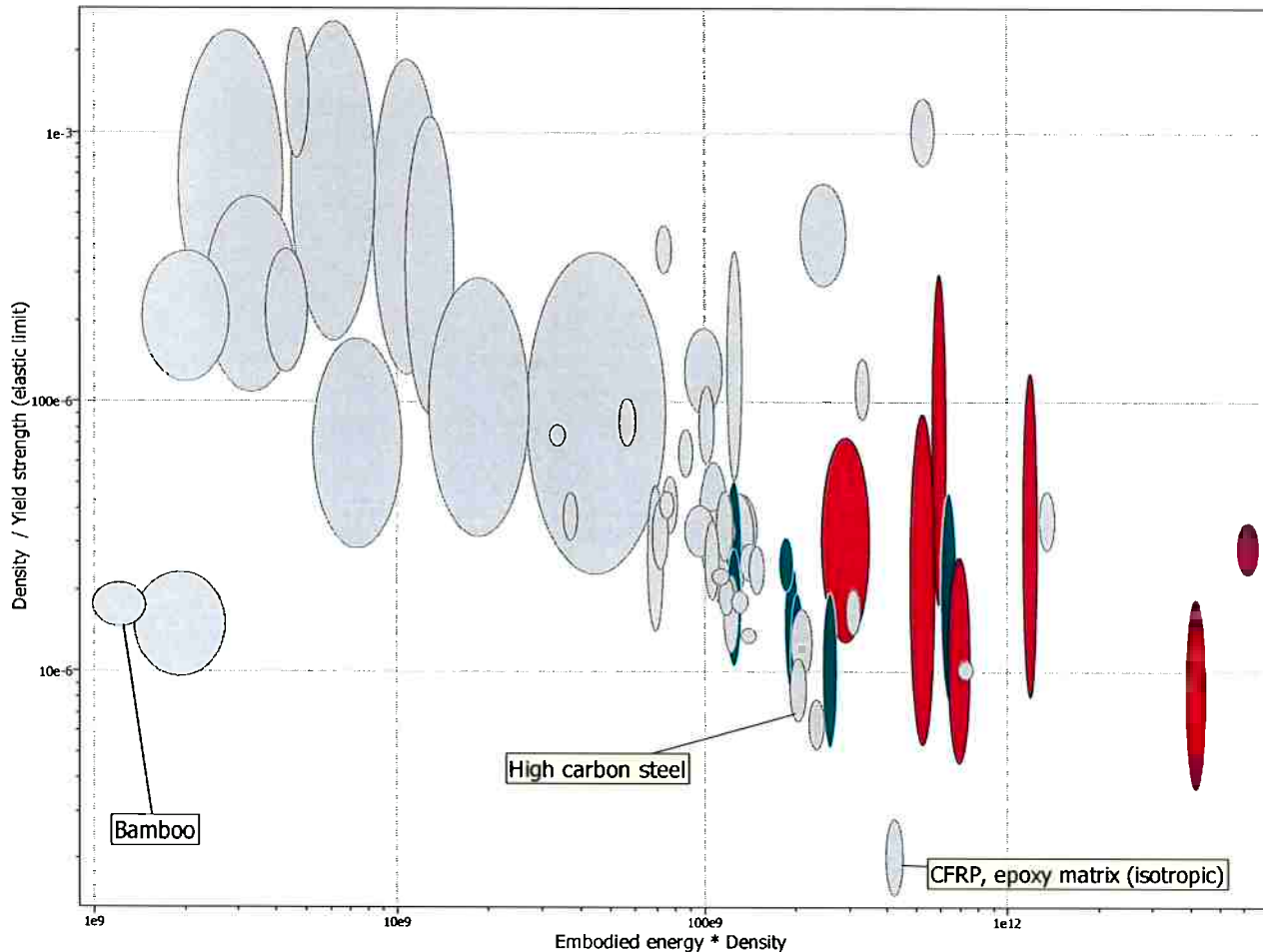


Figura 37: Mapa de $(\rho / \sigma_y) \times (H_e \cdot \rho)$, em cinza devido à falha nas restrições, banco de dados, mostrando a melhor performance de minimização do impacto ambiental.

Uma dificuldade neste procedimento é encontrar com precisão o ponto de intersecção da linha trade-off com a curva Z, pois o CES não gera a curva trade-off, esta que vai depender da habilidade de seu “projetista”. Uma análise importante é como a escolha da constante α influencia no projeto. Valores de α maiores do que 10000, fazem com que o ponto de tangência entre a curva Z e a trade-off vá para uma região onde minimizar o impacto ambiental é mais relevante do que minimizar a

massa, conforme visto na figura 38. De maneira análoga, diminuir a constante α , favorece a minimização da massa, conforme figura 39.

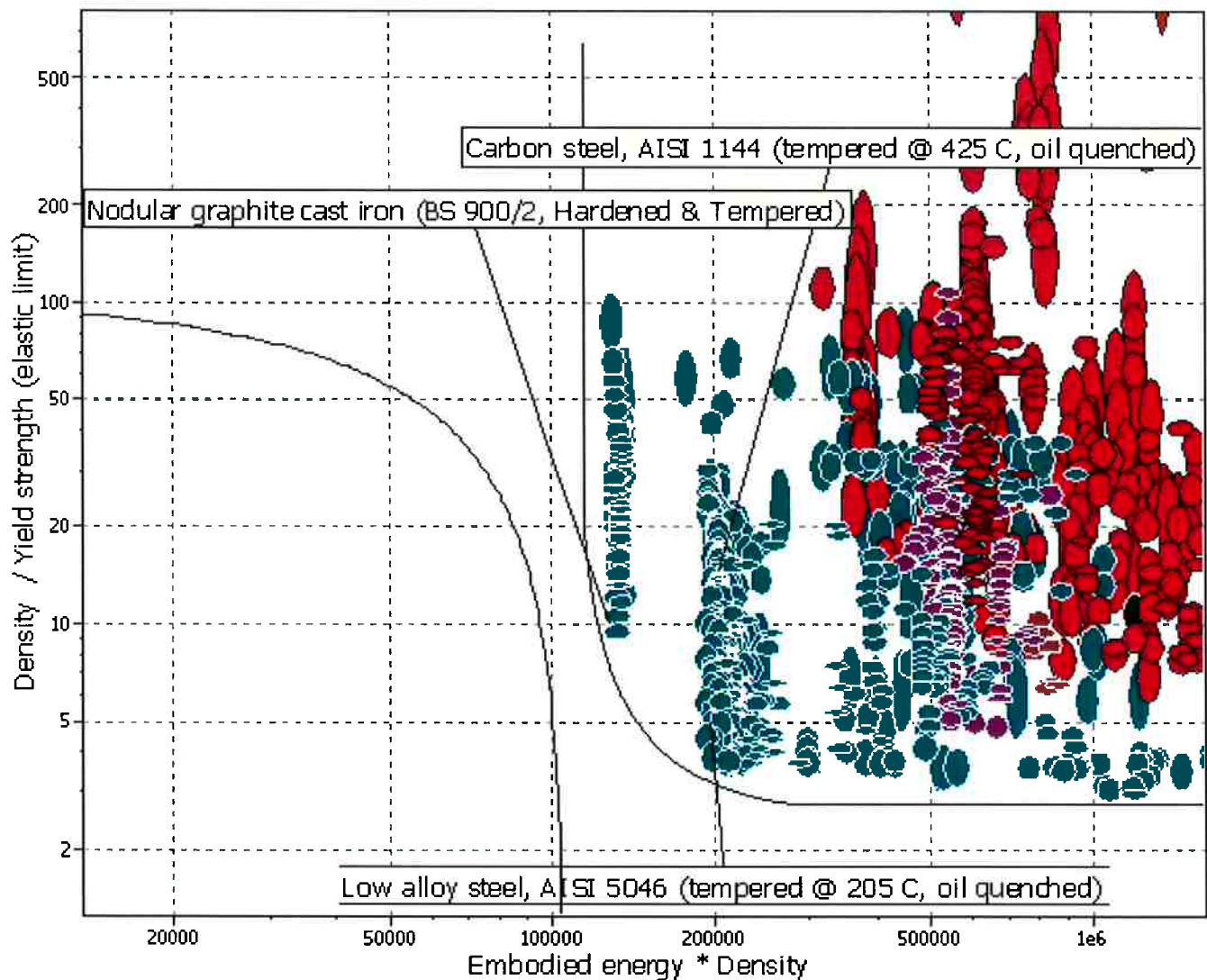


Figura 38: Mapa de $(\rho / \sigma_y) \times (He \cdot \rho)$, com $a=1250$, $-1/a=-0.0008$, favorece o campo da minimização do impacto ambiental, banco de dados nível 3, em escala logarítmica, extraído do CESEdpack2007.

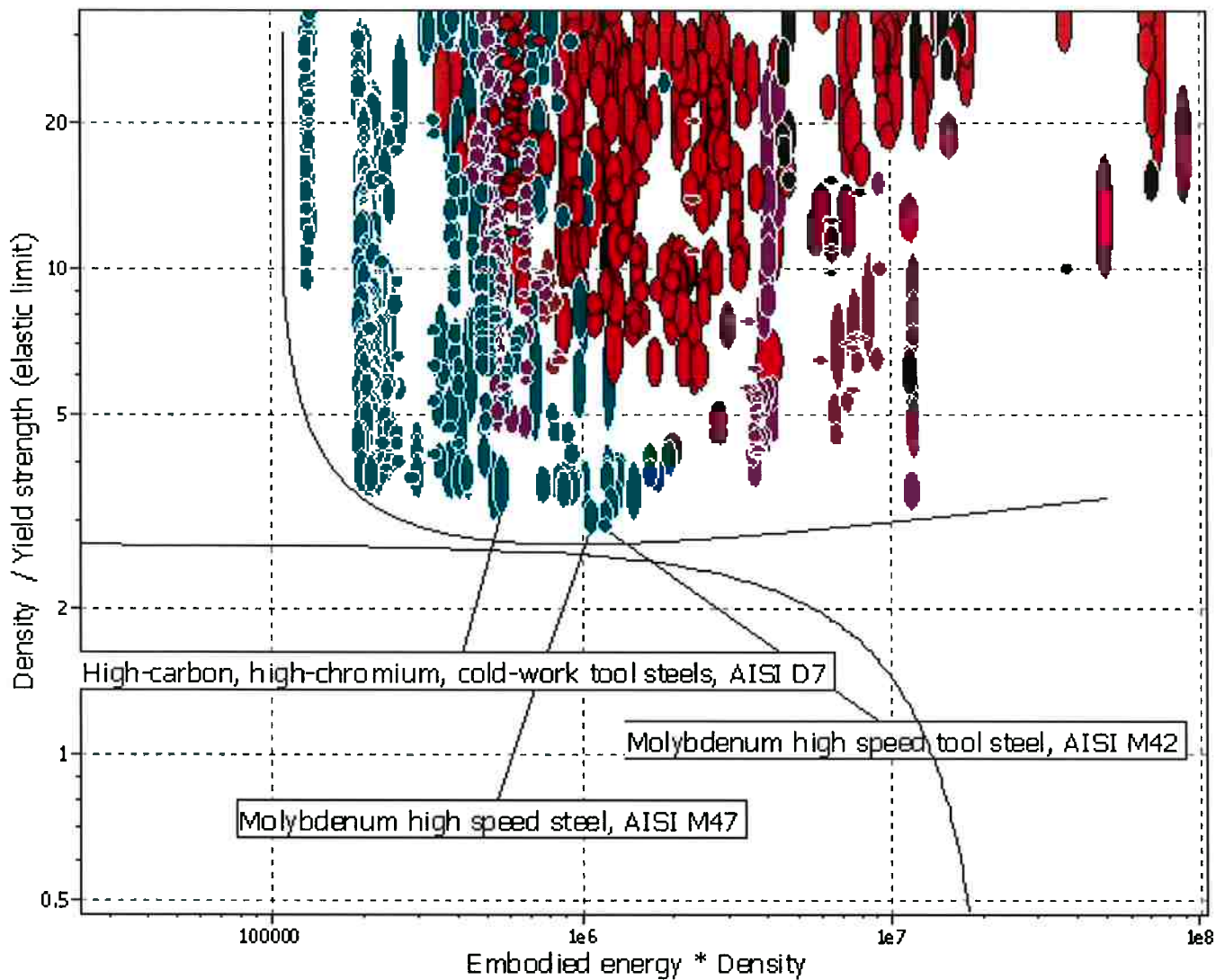


Figura 39: Mapa de $(\rho / \sigma_y) \times (He \cdot \rho)$, com $a=800000$, $1/a=-0,00000125$, favoreço a minimização da massa. banco de dados nível 3, em escala logarítmica, extraído do CESEdupack2007.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES

- A seleção do material (compósito reforçado com fibra de carbono) no caso A (minimizar a massa com limite de escoamento e rigidez como restrições e tenacidade à fratura restrita) está coerente com os materiais de bicicletas de alta performance, mostrando eficácia do método, mesmo estimando o valor da constante C_c que representa a combinação das restrições funcionais e geométricas.
- A seleção do material do caso B (minimizar a massa e o impacto ambiental) mostra que o desempenho do método depende de uma boa “tradução dos requisitos do projeto”, visto a escolha do aço ao invés do bambu.
- Avaliando-se o resultado do caso A, tem-se ilustrado o poder deste método para a substituição de materiais em componentes já existentes.
- Os índices ecológicos devem ser utilizados com cautela para não servirem apenas como marketing de produtos, pois são imprecisos e variam de acordo com a matriz de energia elétrica de cada região/país.
- Durante o uso do CESEdunpack2007 notaram-se dificuldades tais como: a construção da “linha *trade-off*” não é uma ferramenta do software e foi feita em outro programa; no posicionamento das linhas de seleção (que depende apenas da inclinação e do arraste do “mouse”, aumentando a imprecisão); e a impossibilidade do uso de mais de uma linha de seleção dentro de um mapa.
- Sugere-se incrementar a seleção do quadro de bicicleta para casos específicos (bicicleta de corrida, mountain-bike, bici-cross, passeio e híbrida), levando em conta diversas geometrias da seção do quadro.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Dieter, G. (editor). Metals Handbook. Volume 20, 9ª edição. ASM. 1997.
2. Smith, Cyril Stanley. Metalurgia como uma Experiência Humana. Volume 1. Sao Carlos : Univ Federal Dept Eng de Materiais, 1983.
3. Ashby, M. and Johnson, K., Materials and Design: The Art and Science. of Material Selection in Product Design, Butterworth-Heinemann, 2002.
4. Ferrante, M. Seleção de Materiais. 2ª edição. Edufscar, p. 21-25.2002.
5. Ljungberg, Lennart Y. Design, materials selection and marketing of successful products.XX. Elsevier. Materials and Design, vol.24, p. 519–529, 2003.
6. Ashby, M. Selection strategies for materials and processes. Materials and Design, vol 25, p. 51–67,2004.
7. Ashby, M. Material Selection in Mechanical Design.2th edition. Elsevier Butterworth-Heinemann, 1999.
8. Manual do software Granta CES EDUPACK 2006, Unit 5, Projects using CES.
9. Ashby, M. Material Selection in Mechanical Design. 3th edition. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
10. Ashby, M.F. (2000) Multi-objective optimization in material design and selection, Acta Mater. 48, p. 359-369.
11. Granta Design: <http://www.grantadesign.com>
12. Wikipédia: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Eco-design>
13. Ljungberg, Lennart Y. Materials selection and design for development of sustainable products. Elsevier . Materials and Design. vol28, p. 466–479 ,2007.
14. Wojcicki, Francisco Romário. PANORAMA ENERGÉTICO BRASILEIRO, Painel 01 – Diagnósticos e Perspectivas Energéticas até 2015, Porto Alegre, 18 de outubro de 2006. Ministério de Minas e Energia.
15. Holloway, Leigh. Materials selection for optimal environmental impact in mechanical design. Elsevier. Materials and Design, vol.19 , p. 133-143,1998.
16. Sharp, A. “ Bicycles and tricycles”, the MIT press, Cambridge, Mass, 1993.
17. Whitt, F.R. and Wilson. “ Bicycling Science”, the MIT press. 1995.
18. Caloi: www.caloi.com.br

19. Calfee, Craig. Bicycle Frame Materials Comparison with a Focus on Carbon Fiber Construction Methods. Technical White Paper. Originally presented in 7/94, updated in 10/02.(<http://www.calfeesign.com>)
20. Shelton, Holly. Analysis of the fatigue failure of a mountain bike front shock. Elsevier . Engineering Failure Analysis, v.11 , p. 375-386, 2004.
21. Sheldon Brown's Bicycle Technical Info:
<http://www.sheldonbrown.com/rinard/fea.htm>
22. Eco Trends & Tips: <http://ecotrendstips.wordpress.com/2007/08/05/bicicletas-de-bambu-para-esportistas-ecologicos/>
23. <http://www.calfeesign.com/bamboo.htm>