

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS – PGMAT**

Tese de Doutorado

**PRÉ-AVALIAÇÃO DA ENERGIA INCORPORADA E DA PEGADA
DE CARBONO COMO REQUISITOS PARA SELEÇÃO DE
MATERIAIS NAS FASES INICIAIS DO DESENVOLVIMENTO
DE PRODUTO**

Tese de Doutorado submetida ao
Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de
Materiais da Universidade
Federal de Santa Catarina para
obtenção do grau de Doutor em
Ciência e Engenharia de
Materiais

Doutorando: Antonio Augusto Morini

Orientadores:

Dachamir Hotza (PGMAT/UFSC)
Manuel Ribeiro (IPVC, Portugal)

Florianópolis, SC
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Morini, Antonio Augusto

Pré-Avaliação da Energia Incorporada e da Pegada de Carbono como Requisitos para Seleção de Materiais nas Fases Iniciais do Desenvolvimento de Produto / Antonio Augusto Morini; orientador, Dachamir Hotza; coorientador, Manuel Ribeiro. 2018.

189 p.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Seleção de Materiais. 2. Energia Incorporada. 3. CES-Selector. 4. Pegada de Carbono. 5. Desenvolvimento de produto. I. Hotza, Dachamir. II. Ribeiro, Manoel. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. IV. Título.

PRÉ-AVALIAÇÃO DA ENERGIA INCORPORADA E DA PEGADA DE
CARBONO COMO REQUISITOS PARA SELEÇÃO DE
MATERIAIS NAS FASES INICIAIS DO DESENVOLVIMENTO DE
PRODUTO

Florianópolis, 22 de fevereiro de 2019

Guilherme Barra, Prof. Dr.
Coordenador do Programa

Banca Examinadora:

Dachamir Hotza, Prof. Dr.
Orientador UFSC

Manuel Ribeiro, Prof. Dr.
Coorientador IPVC, Portugal

Fabiano Raupp Pereira, Prof. Dr.
UNESC

Fernanda Stafford, Dr.
Pos-Doc UNIVILLE

Ana Cláudia Dias, Prof. Dr.
Universidade de Aveiro, Portugal

Sei que há somente um Deus vivente, verdadeiro e infinito, criador e mantenedor de todas as coisas visíveis e invisíveis, cuja essência está difundida em todo o Universo e cuja mente e consciência constituem a alma do homem.

Harvey Spencer Lewis

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

A Deus por me guiar, iluminar e me dar a tranquilidade necessária para seguir em frente com os meus objetivos, não desanimando nas adversidades.

Aos meus pais, *in memoriam*, que me deram a educação e possibilitaram a formação necessária para que eu pudesse enfrentar as dificuldades e vicissitudes da vida.

À minha esposa, Sulamita Morini, que sempre esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis, compreendendo as dificuldades momentâneas, dando o apoio e o incentivo necessário para que chegasse, com êxito, ao término dessa jornada.

À minha filha, Flávia Morini, que com seu carinho e afeto me incentivou em todos os momentos dessa empreitada e, com seu conhecimento acadêmico, deu o suporte necessário nos momentos de dúvida e incertezas.

Ao meu amigo Rogério Campos, que teve papel decisivo na escolha do PGMAT como programa de doutorado e pela prontidão e auxílio nos processos administrativos sempre que necessário.

Ao Prof. Dr. Dachamir Hotza, orientador dessa tese, pela oportunidade de realização do doutorado sanduíche, além das valiosas orientações e correções no transcorrer do desenvolvimento dos trabalhos.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, especialmente ao Departamento Acadêmico de Eletrotécnica pela oportunidade que me foi dada de participar de um programa de doutorado.

À Universidade Federal de Santa Catarina, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, pela aceitação de minha pessoa como aluno dessa instituição.

À Capes pela bolsa de estudos concedida no exterior, possibilitando um doutorado sanduíche.

Ao Instituto Politécnico de Viana do Castelo, notadamente ao Prof. Dr. Manuel Ribeiro, pela oportunidade de desenvolver parte dos trabalhos nesse Instituto e pela sempre pronta colaboração.

Às pessoas e à empresa que forneceram as informações necessárias para participar no desenvolvimento de uma pá para geradores eólicos.

Aos professores do PGMAT/UFSC, em especial ao Prof. Dr. Fabiano Pereira pela oportunidade de desenvolver o primeiro trabalho prático desta tese.

Há muitos para agradecer, embora não nomeados, que me brindaram com seus inestimáveis apoios em distintos e decisivos momentos. A todos esses, o meu reconhecido e carinhoso muito obrigado!

Existe apenas um bem, o saber,
e apenas um mal, a ignorância.
Sócrates

RESUMO

Devido à grande quantidade e diversidade de materiais existentes e aos constantes novos desenvolvimentos, selecionar o material mais adequado a uma determinada função tornou-se uma tarefa complexa, devendo as propriedades relevantes e as metodologias adequadas serem definidas e servir de orientação para os engenheiros durante o processo de escolha. No campo da sustentabilidade uma das metodologias mais conhecidas e utilizadas é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), a qual avalia a carga ambiental de produtos e serviços durante todo o ciclo de vida do produto, desde a extração da matéria-prima até sua disposição final. Entretanto, um levantamento quantitativo detalhado de todas as cargas ambientais na ACV é trabalhoso e complexo, exigindo esforço e especialização dos envolvidos, o que faz com que muitas empresas a façam de forma superficial ou mesmo abandonem essa análise. Raramente, a ACV é utilizada nas fases iniciais do desenvolvimento de um produto, considerando as etapas de projeto conceitual e/ou projeto preliminar. Este estudo, desenvolvido com o software CES-Selector EcoAudit, utiliza apenas a energia incorporada e a pegada de carbono como métricas para avaliar a carga ambiental de um produto nos estágios iniciais de seu desenvolvimento. A validação dessa ferramenta é feita de forma qualitativa, através da comparação de resultados apresentados na literatura com o resultado obtido com o EcoAudit. O objetivo deste trabalho não é substituir a ACV completa, mas propor uma forma rápida e confiável de obter informações que permitam aos envolvidos no desenvolvimento de um novo produto, definirem, desde o início, materiais e processos de menor impacto ambiental durante todo o ciclo de vida do produto. Foram realizados, inicialmente, dois trabalhos com o software CES-Selector EcoAudit, um para avaliar o potencial de resíduos industriais como matéria prima para produtos cerâmicos e outro para avaliar e comparar qual material (PET ou vidro) proporciona um ciclo de vida mais sustentável para os recipientes utilizados no envase de refrigerantes. A etapa seguinte, contemplando o desenvolvimento de novos produtos, realizou-se através de dois trabalhos, o primeiro um estudo comparativo entre as usinas solares fotovoltaicas e eólicas para uma planta de 1,5 MW a ser, hipoteticamente, instalada na região de Viana do Castelo – Portugal e o segundo um estudo de caso contemplando

o desenvolvimento de uma pá eólica. Os resultados mostram que é possível utilizar o CES-Selector/EcoAudit, com seus indicadores de energia incorporada e pegada de carbono, para pré-avaliar a carga ambiental de materiais de engenharia, propiciando a diminuição na produção de CO₂, menor consumo de energia e menor carga ambiental.

Palavras Chave: Seleção de materiais, CES-Selector, EcoAudit, ACV, desenvolvimento de produto, emissão de CO₂, pegada de carbono, energia incorporada.

ABSTRACT

The large and diversified amount of materials currently on the market and new developments of products make the search for suitable materials a difficult and complex task, such that relevant properties and appropriate methodology should be defined having as purpose to give aid to engineers during the material selection process. In the field of sustainability, one of the well-known and used methodologies is the Life Cycle Assessment (LCA), which assesses the environmental burden of products and services throughout the product life cycle, from the raw materials extraction to the end of life. However, a rigorous quantitative assessment of all burdens is hard working and requires deep skills of those involved, leading many companies to do so superficially or even abandon this approach. Rarely LCA is used in the early stages of product development, considering the conceptual design and/or preliminary design steps. This study, developed with the CES-Selector EcoAudit software, uses only embodied energy and carbon footprint as metrics to assess the product's environmental burden in the early stages of its development. The comparative method was used for the validation of the estimates using Eco Audit, from the results obtained with the methodology described in detailed LCA evaluations published in the literature. The objective of this work is not to replace the complete LCA, but to propose a fast and reliable way to obtain information that enable those involved in the new product development to define, from the outset, materials and processes with the least environmental impact throughout the product life cycle. Initially two works were carried out with CES-Selector EcoAudit software, one to evaluate the potential of raw material industrial waste for ceramic products and another to evaluate and compare which material (PET or glass) provides a more sustainable life cycle for containers used in the soft drink packages. The next stage, contemplating the development of new products, was carried out through two works, the first one the development of a new product was carried out considering a comparative study between solar photovoltaic and wind power plant of 1.5 MW to be, hypothetically, installed in Viana do Castelo city – Portugal, and the second work was a case study contemplating the development of a wind turbine blade. The results show that is possible to use CES-Selector/EcoAudit with metrics of embodied energy and carbon footprint

to pre-assess the new product's environmental burden in the early stages of development and materials selection, providing decrease of CO₂ production, lower energy consumption and lower environmental burden.

Key words: Material selection, CES-Selector, EcoAudit, LCA, product development, CO₂ emission, embodied energy, carbon footprint.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tela de entrada de dados do CES-Selector para o Eco-Audit.....	31
Figura 2: Principais estágios de uma ACV – Adaptado de (GRANTA DESIGN, 2018).....	40
Figura 3: Estrutura de avaliação do ciclo de vida (Adaptado da (ABNT 14044, 2009), revisada 2016, item 4.2.3).....	41
Figura 4: Dados do inventário e respectivos impactos (STAFFORD, 2016) apud Manfred and Pant, 2011).....	42
Figura 5: Relação entre a energia primária utilizada e a emissão de CO2 para diferentes materiais (CES Selector EcoAudit 2017).	47
Figura 6: Coletor Solar Integrado: Reciclado vs. Não reciclado – energia incorporada e pegada de carbono.	58
Figura 7: Coletor Solar Integrado: Reciclado vs. Não reciclado – Redução do impacto de acordo com os três diferentes bancos de dados.	59
Figura 8: Turbina eólica de eixo vertical e de eixo horizontal: energia incorporada e pegada de carbono.	60
Figura 9: Turbina eólica de eixo vertical e de eixo horizontal: redução do impacto de acordo com o SimaPro e o EcoAudit.....	61
Figura 10: Aterro vs. reciclagem de recipientes de vidro: energia incorporada e pegada de carbono.	62
Figura 11: Aterro vs. reciclagem de recipientes de vidro: redução do impacto de acordo com o SimaPro e o EcoAudit, respectivamente.	62
Figura 12: AISI 3014 vs. Liga AZ61 Mg para monobloco: energia incorporada e pegada de carbono.	67
Figura 13: AISI 3014 vs. Liga AZ61 Mg para monobloco: redução do impacto, conforme o banco de dados do EcoAudit, versões 2008 e 2017, respectivamente.....	67
Figura 14: Fachadas construídas em TPCS vs. GCWS: energia incorporada e pegada de carbono.	69
Figura 15: Fachadas construídas em TPCS vs. GCWS: redução do impacto de acordo com o banco de dados do SimaPro e do EcoAudit.	70

Figura 16: Comparação entre 1975 vs. 1975 AdvRef: energia incorporada e pegada de carbono.....	72
Figura 17: Comparação entre 1975 vs. 1975 AdvRef: redução do impacto de acordo com o Ecoinvent e EcoAudit respectivamente.	74
Figura 18: Elétrico com reservatório vs. Gás-Solar de passagem: energia incorporada e pegada de carbono.....	78
Figura 19: Elétrico com reservatório vs. Gás-Solar de passagem: redução do impacto, de acordo com as bases de dados do Gabi 6 EcoAudit.	78
Figura 20: Materiais selecionados como produtos cerâmicos em função de percentual em massa de alumina.	83
Figura 21: Materiais selecionados como produtos cerâmicos em função de percentual em massa de sílica.	83
Figura 22: Relação composicional típica para produtos cerâmicos - sílica em função de cálcia.....	88
Figura 23: Relação composicional típica para produtos cerâmicos - alumina em função de sílica.....	89
Figura 24: Dureza (Vickers) em função do teor de alumina.	91
Figura 25: Percentual de (alumina + sílica) vs. tenacidade.....	92
Figura 26: Percentual de (alumina + sílica) vs. condutividade térmica.	92
Figura 27: Visualização da escória de alto forno e seu enquadramento no grupo cimento, considerando seus percentuais de alumina e sílica.	94
Figura 28: Visualização da escória de alto forno e seu enquadramento no grupo cimento, considerando seus percentuais de sílica e cálcia.	95
Figura 29: Estratégia de seleção e substituição de materiais com o EcoAudit (adaptado de (GRANTA DESIGN, 2018))......	98
Figura 30: Massa utilizada (kg de material por 1000 litros de refrigerante).	102
Figura 31: Massa utilizada (grama de material por recipiente).....	102
Figura 32: Energia Incorporada (MJ / 1000 litros de refrigerante).	106
Figura 33: Pegada de Carbono (kg de CO ₂ / 1000 litros de refrigerante).....	108
Figura 34: Massa de aço e concreto utilizados nas torres de coluna de aço (adaptado de (OEBELS e PACCA, 2013)).	115

Figura 35: Massa de aço e concreto utilizados nas torres de coluna de concreto. Adaptado (OEBELS e PACCA, 2013).....	116
Figura 36: Layout de instalação dos painéis solares e seus respectivos inversores.	121
Figura 37: Esquema da distância entre painéis (adaptado de (LOPES, 2013))......	122
Figura 38: Pannel fotovoltaico e suas partes (Adaptado de (FERNANDES, 2016))......	124
Figura 39: Massa dos painéis da central fotovoltaica.....	126
Figura 40: Energia Incorporada (EI – kWh/kWh) dos principais materiais utilizados nos geradores eólicos e na planta solar fotovoltaica.	130
Figura 41: Pegada de Carbono (PC – gCO ₂ /kWh) dos principais materiais utilizados nos geradores eólicos e na planta solar fotovoltaica.	130
Figura 42: Energia Incorporada (EI – kWh/kWh) do aço e concreto utilizados nos geradores eólicos e na planta fotovoltaica.....	133
Figura 43: Pegada de Carbono (PC – gCO ₂ /kWh) do aço e concreto utilizados nos geradores eólicos e na planta fotovoltaica.....	133
Figura 44: Módulo de Young das resinas avaliadas.....	142
Figura 45: Tensão de escoamento das resinas avaliadas.....	143
Figura 46: Módulo de Young vs Densidade das resinas avaliadas.....	143
Figura 47: Energia Incorporada vs Pegada de Carbono das resinas aprovadas.....	144
Figura 48: Artigos encontrados nas bases Capes, Scopus, Compendex e Web of Science entre 2000 e 2017.....	170

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Combinação das palavras de pesquisa utilizadas na busca dos artigos.....	54
Tabela 2: Publicações relevantes para o presente trabalho.....	56
Tabela 3: Material para uma unidade de turbina eólica de eixo vertical e uma de eixo horizontal.....	59
Tabela 4: Colchão de PFM vs. PSM, comparados em relação a: (a) energia incorporada e pegada de carbono; (b) redução de impacto de acordo com o Eco Indicador e o EcoAudit.....	64
Tabela 5: Monobloco de carro: energia incorporada e pegada de carbono.....	66
Tabela 6: Materiais utilizados nas diferentes propostas de reforma e reconstrução (kg).....	71
Tabela 7: Energia incorporada e pegada de carbono das construções avaliadas.....	72
Tabela 8: Material utilizado pelos diferentes aquecedores em toneladas.....	76
Tabela 9: Energia incorporada e pegada de carbono dos aquecedores domésticos.....	77
Tabela 10: Composição química típica de tijolos, cimentos e concretos, além de terracota, porcelana e revestimentos cerâmicos. (GRANTA, 2016).....	85
Tabela 11: Padrões de composição química em óxidos para os três grupos avaliados.....	88
Tabela 12: Resíduos industriais com sua respectiva composição química, possível utilização e ação de correção.....	90
Tabela 13: Quantidade de material utilizado por tipo de recipiente por 1000 litros de refrigerante.....	101
Tabela 14: Energia incorporada nos recipientes por 1000 litros de refrigerante.....	105
Tabela 15: Pegada de carbono dos recipientes por 1000 litros de refrigerante.....	107

Tabela 16: Valores médios da EI e PC para os principais materiais utilizados nos geradores eólicos e na central soar.....	113
Tabela 17: Principais materiais complementares utilizados nos geradores de energia eólica.	116
Tabela 18: Quantidade de aço e concreto na Torre Coluna de Aço. A quantidade de concreto está relacionada somente à fundação da Torre Coluna de Aço.....	117
Tabela 19: Concreto e aço, uma comparação entre a coluna de chapa de aço e a de treliça de aço, para uma torre de 150 m.	118
Tabela 20: Aço e concreto para Torre Coluna de Concreto.	119
Tabela 21: Especificações técnicas do painel fotovoltaico e do inversor.	120
Tabela 22: Quantidade de aço utilizado na estrutura de suporte dos painéis fotovoltaicos.....	123
Tabela 23: Quantidade de material utilizado nos painéis fotovoltaicos.....	125
Tabela 24: Distâncias de possíveis fornecedores de matéria prima e componentes.	127
Tabela 25: Energia Incorporada [EI – kWh/kWh] e Pegada de Carbono [PC – gCO ₂ /kWh] dos principais materiais utilizados nos geradores eólicos e na planta fotovoltaica.	129
Tabela 26: Energia Incorporada (EI – kWh/kWh) e Pegada de Carbono (PC – gCO ₂ /kWh) do aço e concreto utilizados nos geradores eólicos e na planta fotovoltaica.	132
Tabela 27: Energia Incorporada (EI), Pegada de Carbono (PC) e origem dos materiais da pá eólica de 63 m.....	137
Tabela 28: Energia Incorporada (EI) e Pegada de Carbono (PC) da pá eólica de 63 m.	138
Tabela 29: Energia Incorporada (EI) e Pegada de Carbono (PC) dos materiais da pá eólica de 63 m.	139
Tabela 30: Energia Incorporada (EI) e Pegada de Carbono dos materiais mais representativos, durante o processo de manufatura de uma pá eólica de 63 m.....	140

Tabela 31: Energia Incorporada (EI) e Pegada de Carbono dos materiais mais representativos, durante o processo de transporte de uma pá eólica de 63 m.....	141
Tabela 32: Energia Incorporada (EI) e Pegada de Carbono das resinas aprovadas e da resina padrão.....	145
Tabela 33: Quantidade de artigos encontrados na base CAPES em 23/05/2018.....	167
Tabela 34: Quantidade de artigos encontrados na base SCOPUS em 02/05/2018.....	168
Tabela 35: Quantidade de artigos encontrados na base Compendex Engineering Village em 10/05/2018.....	168
Tabela 36: Quantidade de artigos encontrados na base Web of Science em 30/05/2018.....	169
Tabela 37: Quadro comparativo de resultado entre a ACV e o CES-Selector/EcoAudit.	172

SUMÁRIO

1. Introdução e Objetivos	27
1.1. Objetivo Geral	31
1.2. Objetivos Específicos	32
1.3. Estrutura da Tese	32
1.4. Justificativa da Tese	33
2. Fundamentação Teórica	35
2.1. Projeto de Produto e EcoDesign	36
2.2. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	39
2.3. Energia Incorporada e Pegada de Carbono	43
2.4. Seleção de Materiais e CES-Selector EcoAudit	47
3. Metodologia, Resultados e Discussão	51
3.1. Avaliação de Energia Incorporada e Pegada de Carbono como um Requisito para Seleção de Materiais nos Estágios Iniciais de Desenvolvimento de Produto	51
3.1.1. Metodologia	52
3.1.1.1. Coleta de Dados em ACV	53
3.1.1.2. Seleção de Publicações em ACV	55
3.1.2. Resultados e Discussão	57
3.1.2.1. Coletor Solar Integrado: Reciclado vs. Não Reciclado	57
3.1.2.2. Turbina Eólica: Eixo Vertical vs. Eixo Horizontal	59
3.1.2.3. Recipiente de Vidro: Reciclagem vs. Aterro	61
3.1.2.4. Colchão: Espuma de Poliuretano vs. Colchão de Mola	63
3.1.2.5. Monobloco de Carro: ACV para Diferentes Materiais	64
3.1.2.6. Fachadas: TPCS vs. CGWS	68
3.1.2.7. Construções: Demolição vs. Reconstrução com Reforma	70

3.1.2.8. Aquecedor de Água Doméstico na Austrália: Elétrico, Gás ou Solar	75
3.1.3. Considerações Finais	79
3.2. Avaliação da Potencialidade do Uso de Resíduos Industriais através de Ferramenta de Seleção de Materiais para Projeto de Produtos Cerâmicos	80
3.2.1. Metodologia.....	81
3.2.2. Resultados e Discussão.....	82
3.2.3. Considerações Finais	96
3.3. Avaliação da Energia Incorporada e da Pegada de Carbono em Recipientes para Refrigerantes: PET versus Vidro	97
3.3.1. Metodologia.....	97
3.3.1.1. Ferramenta de Avaliação	98
3.3.1.2. Restrições Consideradas	99
3.3.1.3. Bases de Cálculo.....	99
3.3.2. Resultados e Discussão.....	100
3.3.2.1 Energia Incorporada	103
3.3.2.2 Pegada de Carbono	107
3.3.3. Considerações Finais	109
3.4. Energia Incorporada e Pegada de Carbono no Projeto Conceitual de Usinas Solares Fotovoltaicas e Eólicas em uma Planta de 1,5 MW	110
3.4.1. Metodologia.....	111
3.4.2. Resultados e Discussão.....	112
3.4.2.1. Principais Materiais Utilizados nas Torres de Geração Eólica.....	114
3.4.2.2. Dimensionamento da Central Solar	120
3.4.2.3. Principais Materiais Utilizados na Central de Energia Solar Fotovoltaica.....	122
3.4.2.4. Distâncias Percorridas	126

3.4.2.5. Cálculo da Energia Incorporada e Pegada de Carbono	127
3.4.3. Considerações Finais	134
3.5. Energia Incorporada e Pegada de Carbono no Projeto Conceitual de uma Pá para Geradores Eólicos.....	135
3.5.1. Metodologia.....	135
3.5.2. Resultados e Conclusões.....	136
3.5.2.1. Avaliação do Ciclo de Vida da Pá Eólica de 63 m	138
3.5.2.2. Avaliação do Material “Resina”	141
3.5.3. Considerações Finais	145
4. Conclusões	147
5. Referências.....	151
Anexo I: Complemento do procedimento metodológico utilizado na pré-avaliação da EI e PC como requisitos para a seleção de materiais nas fases iniciais do desenvolvimento de produto.....	167
Anexo II: Documento para coleta de dados do EcoAudit	177
Anexo III: Documento para diagnóstico SGA – ACV	183

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A degradação de recursos naturais é uma realidade mundial, ocorrendo em todas as áreas do planeta, sem distinção entre países ricos, emergentes ou pobres. Diante de tal quadro, a busca pela conservação dos recursos naturais tem sido tema de muitas discussões e trabalhos. Nesse sentido, iniciativas governamentais, acadêmicas e empresariais vêm sendo desenvolvidas com o intuito de reverter ou pelo menos mitigar o quadro de degradação (BORCHARDT, POLTOSI, *et al.*, 2008) (MARQUES, 2014) (CABEZA, BARRENECHE, *et al.*, 2013) (MAYYAS, QATTAWI, *et al.*, 2012).

Por esses motivos, uma proposta ambientalmente sustentável deve estar centrada na utilização de recursos renováveis, na otimização do uso de recursos não renováveis (ar, água, energia e território) e na não acumulação de resíduos que o ecossistema não seja capaz de reabsorver (MANZINI e VEZZOLI, 2002).

Projetar estruturas leves e eficientes a fim de minimizar o consumo de material, utilizar materiais e componentes reciclados ou reutilizados, assegurar que no final do ciclo de vida os materiais possam ser separados e propiciar maior durabilidade e menor manutenção aos produtos, garantirá um futuro mais sustentável (ROSSI, MARIQUE e REITER, 2012).

Algumas empresas, tais como Coca-Cola e BMW, têm desenvolvido pesquisas detalhadas a respeito da pegada de carbono de seus produtos, buscando reduzir o impacto das mudanças climáticas (ALWAN e JONES, 2014).

Para Schaltegger e Burrit (SCHALTEGGER e BURRIT, 2010), existem seis razões que podem encorajar os gestores a estabelecer um sistema contábil que proveja informações relevantes nas questões relacionadas à sustentabilidade, são elas:

- Gerir os negócios com foco na sustentabilidade.
- Melhorar a comunicação relativa à sustentabilidade;
- Implementar um sistema de autorregulação;
- Garantir a “licença para operar” e estar preparado para as pressões industriais, legais e das partes interessadas;

- Obter informações relativas a terceiros;
- Considerar as razões éticas envolvidas e a responsabilidade corporativa;

Partindo do pressuposto de que as questões ambientais devem ser consideradas pelas indústrias e que a ecologia industrial não é uma opção, mas sim uma necessidade premente, a questão de como implantá-la passa a ser o foco das discussões. Nessa perspectiva, na qual produtos e rejeitos são produzidos simultaneamente, é fundamental determinar como o sistema industrial pode ser estruturado, de forma torná-lo compatível com o meio ambiente (GIANETTI, VILLAS BOAS ALMEIDA e BONILLA, 2003) (ZAPICO, BRANDT e TURPEINEN, 2010).

Uma aplicação prática da ecologia industrial é a formação de parques industriais onde os resíduos gerados por uma unidade industrial são potenciais matérias primas para a outra e assim sucessivamente até que o resíduo final gerado seja o menor possível, o consumo de energia seja minimizado e os poluentes estejam sob controle.

O desempenho ambiental dos produtos pode ser melhorado através do uso de ferramentas baseadas em metodologias de *EcoDesign*, tanto no processo de projeto quanto no desenvolvimento do produto, não somente porque pode reduzir os custos de materiais e processos, mas também porque pode reduzir, significativamente, a sua energia incorporada e emissão de CO₂, bem como eliminar o desperdício (O'HORE, COPE e WARDE, 2016).

Apesar das crescentes preocupações relacionadas ao consumo e disponibilidade de recursos, tanto de energia como de matéria prima, o que se vê na prática são adaptações e adequações dos requisitos ambientais aos projetos e processos já definidos, provendo soluções que atendam aos requisitos legais e corporativos. Entretanto, o ideal é definir os requisitos e características ambientalmente corretas, já no projeto conceitual e nas fases iniciais, onde é feita a seleção dos materiais a serem usados no produto em desenvolvimento.

Tomando a decisão certa nas primeiras fases de projeto, é possível diminuir significativamente o impacto ambiental que o produto terá ao longo de seu ciclo de vida (PENCIUC, LE DUIGOU, *et al.*, 2016). Assim, no início do desenvolvimento de um produto é mais fácil alterar o

projeto, para melhor se adequar aos fatores ambientais, do que nas fases posteriores. Por exemplo, é mais simples e custa menos reduzir as emissões de gases tóxicos através da substituição de materiais ou processos na fase de projeto, do que construir sistemas para capturar e remover esses gases da atmosfera.

Estima-se que nas fases iniciais de projeto seja definido cerca de 80% do impacto ambiental a ser gerado pelo produto ou serviço a serem produzidos (THACKARA, 2006). Essa é a razão pela qual é importante desenvolver ferramentas que sejam capazes de dar suporte aos projetistas, para que desenvolvam produtos ambientalmente corretos de forma prática, rápida e confiável (DE BENEDETTI, TOSO, *et al.*, 2010).

Uma das questões básicas a solucionar no desenvolvimento de um projeto de produto ambientalmente correto é decidir qual o melhor material a ser utilizado. Essa decisão, fácil em alguns casos, torna-se cada vez mais difícil na medida em que os projetos se tornam mais complexos e tecnológicos e as características técnicas do material a ser utilizado e os seus possíveis processos de fabricação, devem ser condizentes com os aspectos relacionados ao consumo de energia, ao meio ambiente e ao destino final do material escolhido, após terminar o ciclo de vida do produto.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma importante ferramenta na avaliação da carga ambiental e sua utilização garante um planejamento de produto ambientalmente aceitável. No entanto, sua implantação não é simples e exige conhecimento e muito trabalho dos projetistas comprometidos com a gestão ambiental, o que limita sua aplicação às empresas de maior porte, com recursos suficientes para manter pessoal especializado.

Como discutido frequentemente ao nível internacional, um levantamento quantitativo detalhado de todas as cargas ambientais na análise do ciclo de vida representa um grande esforço dos projetistas, que, como consequência, abandonam essa análise ou apenas a fazem de forma qualitativa (DE BENEDETTI, TOSO, *et al.*, 2010).

Para se trabalhar com a ACV, existem vários softwares especialistas no mercado, tais como: SimaPro (SIMAPRO, 2018), Open LCA (GREENDELTA, 2018), GaBi (PE INTERNATIONAL, 2018),

Umberto NxT (IFU HANBURG, 2018), Quantis Suite (QUANTIS, 2018), Bousted Model (BCL - BOUSTED CONSULTING, 2018), e outros.

Contudo há uma recorrente falta de ferramentas para inserir a ACV e a consequente avaliação ambiental, nos estágios iniciais da seleção de materiais (SCHLANBUSH, JELLE, *et al.*, 2014). Trabalhando neste conceito, mas com uma proposta simplificada, o software Cambridge Engineering Selector (CES-Selector) (GRANTA DESIGN, 2018), muito usado como ferramenta de seleção de materiais em diversas áreas (desde a Engenharia até o Design de produto).

A avaliação da carga ambiental através dos parâmetros de energia incorporada e pegada de carbono é largamente utilizada na construção civil (BRIBIAN, CAPILLA e USÓN, 2011), (RALF, 2016), (ROBERTSON, FRANK e COLE, 2012), (SURAHMAN, KUBOTA e WIJAYA, 2016), (YUNG, LAM e YU, 2013). Nessa área da engenharia, a importância da energia incorporada e da pegada de carbono de materiais da construção civil, no ciclo de vida de um edifício, tem sido um tópico de grande interesse. A razão para tal movimento é a grande quantidade de energia incorporada nas edificações (YUNG, LAM e YU, 2013) e o fato de que a energia incorporada é mais representativa em construções de baixo consumo de energia ou de emissão zero, do que em construções convencionais (SCHLANBUSH, JELLE, *et al.*, 2014).

Como ferramenta de suporte para o desenvolvimento do presente trabalho, utilizou-se o software CES-Selector, o qual, em seu módulo EcoAudit, permite identificar quais os produtos e processos que implicam uma maior degradação ambiental e quais as fases mais críticas durante todo o ciclo de vida, facilitando a implantação do *EcoDesign*. O ciclo de vida é contemplado desde a fase de seleção de materiais, passando pela fabricação, transporte e uso até o término do ciclo, com sua disposição final. O resultado é mostrado através de gráficos e relatórios. A título de exemplo, a Figura 1 mostra a tela de entrada de dados do CES-Selector.

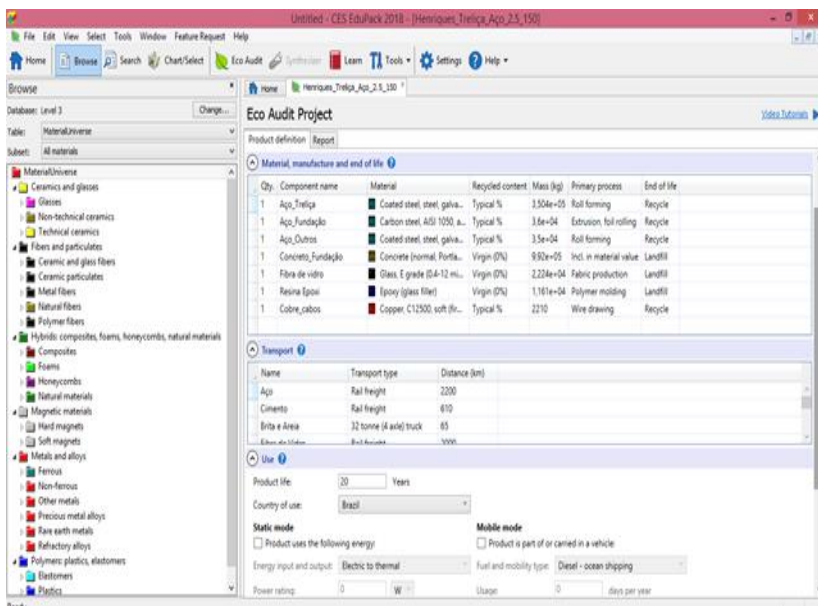


Figura 1: Tela de entrada de dados do CES-Selector para o Eco-Audit.

A tela de entrada do EcoAudit possui quatro campos principais: (i) material, processo de manufatura e disposição final; (ii) transporte, (iii) uso e (iv) relatório. Além disso, vários desmembramentos são possíveis, como no descarte, onde o destino final pode ser o aterro, a reciclagem, a queima como combustível e outros. Há, também, o transporte, que pode ser marítimo, rodoviário, aéreo e outros, completando com o uso, que pode ser estático ou móvel. Finalizando, existem dois tipos de relatório, um sumário e outro detalhado.

1.1. Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho de tese é:

Propor um processo simplificado de seleção de materiais e processos, com menor energia incorporada e pegada de carbono, nas fases iniciais do desenvolvimento de um produto, considerando seu ciclo de vida.

1.2. Objetivos Específicos

Para além do objetivo geral referido, foram posteriormente definidos aos seguintes objetivos específicos:

- Verificar o potencial do CES Selector/EcoAudit e validar sua utilização como ferramenta de pré-avaliação da carga ambiental;
- Utilizar e analisar os resultados do software CES-Selector/EcoAudit com suas ferramentas de seleção de materiais e processos produtivos na área de resíduos industriais;
- Utilizar e analisar os resultados do software CES-Selector/EcoAudit como ferramenta de avaliação do ciclo de vida de um produto através de dois parâmetros: energia incorporada e pegada de carbono;
- Selecionar alguns produtos e utilizar o EcoAudit para decidir qual deles, possui menor energia incorporada e menor pegada de carbono; e
- Elaborar um instrumento (documento) de coleta de dados que permita um diagnóstico confiável dos processos de desenvolvimento de produto e seleção de materiais;
- Avaliar os resultados e validar o processo.

1.3. Estrutura da Tese

Este documento está formatado numa estrutura de artigos, em que o capítulo 1 apresenta a introdução, o objetivo geral, os objetivos específicos, a estrutura e a justificativa da tese.

O capítulo 2 contém a fundamentação teórica pertinente e transversal a todos os artigos inseridos na tese, enquanto que os casos específicos encontram-se no próprio artigo. A fundamentação contempla 4 tópicos principais, que são: (i) Projeto de produto e o *EcoDesign*; (ii) Avaliação do Ciclo de Vida – ACV; (iii) Energia Incorporada e Pegada de Carbono e (iv) Seleção de materiais e o CES-Selector EcoAudit.

O capítulo 3 contém uma breve introdução, apresentando a metodologia, os resultados e discussão, e as considerações finais de 5 artigos submetidos ou em processo de submissão, referentes a estudos

sobre energia incorporada e pegada de carbono, sendo o primeiro a partir de dados da literatura e os demais a partir de bases de dados do software e/ou dados coletados em empresas respectivas:

- Pré-avaliação de energia incorporada e pegada de carbono como um requisito para seleção de materiais nos estágios iniciais de desenvolvimento de produto
- Avaliação da potencialidade do uso de resíduos industriais através de ferramenta de seleção de materiais para projeto de produtos cerâmicos
- Avaliação da energia incorporada e da pegada de carbono em recipientes para refrigerantes: pet versus vidro
- Energia incorporada e pegada de carbono no projeto conceitual de usinas solares fotovoltaicas e eólicas em uma planta de 1,5 MW
- Energia incorporada e pegada de carbono no projeto conceitual de uma pá para geradores eólicos

O capítulo 4 apresenta as conclusões gerais da tese, conectando as considerações finais de cada artigo, a partir do foco principal da tese.

O capítulo 5 apresenta as referências bibliográficas utilizadas em todos os capítulos da tese.

Por fim, tem-se 3 anexos: (i) O Anexo I apresenta, de forma mais detalhada, a metodologia utilizada na seleção dos artigos utilizados na validação do CES-Selector EcoAudit como ferramenta de pré-avaliação da energia incorporada e da pegada de carbono como métricas para avaliar a carga ambiental de um produto ou serviço; (ii) O Anexo II apresenta a “lista de verificação” usada na empresa para coletar os dados necessários para a utilização do EcoAudit; (iii) O Anexo III traz a “lista de verificação” utilizada na empresa para coletar os dados necessários para avaliar o grau de aderência do SGA – Sistema de Gestão Ambiental com o método ACV – Avaliação do Ciclo de Vida na empresa.

1.4. Justificativa da Tese

O presente trabalho tem potencial para melhorar a eficácia e a eficiência do sistema de gestão ambiental de empresas através da avaliação, já na etapa de projeto conceitual, da carga ambiental a ser

produzida pelos materiais utilizados em um novo produto durante todo o seu ciclo de vida, utilizando o software CES-Selector EcoAudit, cujas principais características estão demonstradas no item 2.4.

Nos primeiros estágios do desenvolvimento de um produto é mais fácil e econômico projetá-lo com as características ambientais adequadas, do que nos estágios finais. O desafio é conseguir definir requisitos e materiais ambientalmente corretos nas fases iniciais do projeto conceitual, onde a seleção de materiais para o novo produto é feita. Essa tarefa se torna cada vez mais difícil, na medida em que os produtos se tornam tecnologicamente mais complexos.

A proposta para solucionar esse problema está na realização de uma avaliação simplificada da carga ambiental em produtos industriais, considerando apenas dois parâmetros, cujas definições, dentre outras, podem ser:

- Energia incorporada – energia do combustível fóssil consumida para fazer um quilo de material (ASHBY, MILLER, *et al.*, 2012) e;
- Pegada de carbono – quantidade total de CO₂ emitida direta ou indiretamente, por uma atividade ou acumulada pelos diversos estágios de vida do produto (WIEDMANN e MINX, 2008).

Definidos o objetivo e a ferramenta a serem utilizados e, considerando a seleção de materiais, a pergunta que se coloca é: como as empresas industriais podem avaliar a carga ambiental de seus produtos de forma rápida, técnica e economicamente viável, logo na fase inicial de desenvolvimento de produto?

Essa é a motivação desse trabalho.

É importante ressaltar que esse procedimento não pretende substituir a completa ACV, mas sim dar subsídios suficientes para que os projetistas, ainda na fase conceitual e preliminar de projeto possam fazer as escolhas corretas, definindo materiais e processos que tragam o menor impacto ambiental possível, durante todo o ciclo de vida do produto.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Devido ao crescimento exponencial do desenvolvimento tecnológico e da população humana, a disponibilidade de energia e a ameaça ambiental, devido à combustão de combustíveis fósseis, são assuntos importantes em todo o mundo (NABAVI-PELESARAEI, HOSSEINZADEH-BANDBAFHA e BERRADA, 2017).

No âmbito governamental essa contribuição ocorre, principalmente, através da elaboração e implantação de uma legislação abrangente e cada vez mais rigorosa. No Brasil, a Constituição Federal define, no seu capítulo VI artigo 225, as diretrizes gerais relacionadas com o meio ambiente, assegurando a todos os brasileiros o direito a um ambiente ecologicamente equilibrado e impondo ao poder público e à coletividade o dever de preservá-lo para as futuras gerações.

Inúmeras legislações complementares, tanto em nível federal, estadual ou municipal, têm sido elaboradas no sentido de garantir a preservação do meio ambiente. Por exemplo, a resolução CONAMA 001/86 traz a obrigatoriedade do levantamento de aspectos ambientais e a elaboração de laudos de impacto ambiental (EIA-RIMA), os quais visam estabelecer e manter os danos ambientais dentro de limites aceitáveis. Este procedimento deve ser implantado sempre que ocorrer qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: I - a saúde, a segurança e o bem-estar da população; II - as atividades sociais e econômicas; III - a biota; IV - as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; V - a qualidade dos recursos ambientais.

Na Europa, em abril de 2011, a Comissão Europeia anunciou estar trabalhando em uma nova regra de taxaço de energia, visando favorecer as energias alternativas de menor emissão de gás carbônico (BORDIGONI, HITA e LE BLANC, 2012).

No meio acadêmico, conceitos como análise do ciclo de vida (ACV) e projeto para o meio ambiente (PMA) ou *EcoDesign* têm promovido discussões e alterações nas metodologias de desenvolvimento de produto, as quais, tradicionalmente não contém, de forma clara, os requisitos ambientais e de sustentabilidade exigíveis.

No que se refere às iniciativas empresariais, é necessário ressaltar a relação entre negócios e natureza, uma vez que todas as atividades empresariais, de forma direta ou indireta interagem com o meio ambiente. Atualmente, não se questiona a necessidade de implantação ou não da gestão ambiental, a questão é como implementá-la (SOLINTANDER e KOVACS, 2002).

No Brasil, dados disponibilizados pelo (INMETRO) apresentam um total de 1519 empresas certificadas na norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT 14001, 2015), sendo 835 inseridas nos códigos IAF C e D, referentes às indústrias transformadoras. No estado de Santa Catarina, estão certificadas 73 empresas nessa norma, das quais 47 pertencem ao grupo das empresas transformadoras.

Uma forma promissora de desenvolvimento sustentável é a constituição de um sistema de ciclo de vida do produto que reduza drasticamente a carga ambiental, o consumo de recursos e a geração de resíduos, enquanto aumenta a qualidade de vida e o lucro das empresas (UMEDA, FUKUSHIGE, *et al.*, 2012). Diante dessa nova realidade, a necessidade de metodologias de desenvolvimento de produto que levem em consideração, de forma efetiva, requisitos ambientais, foram desenvolvidas, dentre as quais cabe ressaltar o *EcoDesign* (Europa) ou PMA (Estados Unidos) e a Análise do Ciclo de Vida (ACV).

2.1. Projeto de Produto e EcoDesign

Produtos são feitos para satisfazer as necessidades de mercado, existente ou a ser criado, e sua eficácia será maior quanto melhor for o entendimento dessas necessidades e sua conseqüente transformação em especificações / requisitos de produto, os quais são o ponto de partida do sistemático processo de projeto de produto.

Projetistas responsáveis têm por objetivo desenvolver produtos seguros com serviços acessíveis, além de minimizar o consumo de recursos e o lançamento de emissões indesejáveis. Esse conceito deve permear todas as fases do projeto (ERTEKIN, HUSANU e CHIOU, 2014).

Romeiro (ROMEIRO FILHO, 1997) apresenta um levantamento dos principais modelos tradicionais de projeto de produto e mostra que

nas fases iniciais desse processo passa necessariamente pelo desenvolvimento conceitual (Clark e Fujimoto, 1991; Krishnan e Ulrich, 2001; Pahl e Beitz, 1996; Crawford, 2000) e pelo projeto preliminar (Pahl e Beitz, 1996; Kaminski, 2000; Crawford, 2000). Nessas etapas, ocorrem as principais decisões de projeto, incluindo a seleção de materiais, as quais influenciarão no desempenho do produto em todo o seu ciclo de vida.

O projeto conceitual transforma a linguagem formal em geométrica, definindo a estrutura funcional do produto após análise das diversas soluções idealizadas, principalmente a análise arquitetônica do produto, a seleção de materiais, os processos de fabricação, a execução dos desenhos de conjunto e a avaliação da montagem e fabricação (ROZENFELD, FORCELLINI, *et al.*, 2006).

Usualmente, somente os aspectos técnicos e econômicos são considerados no início do desenvolvimento de um produto. Contudo, aspectos ambientais deveriam ser incluídos, pois as escolhas feitas durante os primeiros estágios de desenvolvimento têm uma grande influência nos impactos ambientais causados pelo produto (SHELDRICK e RAHIMIFARD, 2013).

Esses modelos tradicionais não contemplam em suas fases iniciais de desenvolvimento a necessidade de se considerar os requisitos ambientais e de segurança atualmente necessários durante todo o ciclo de vida do produto. Com o intuito de preencher essa lacuna, o *EcoDesign* e o Projeto para o Meio Ambiente (PMA), têm conquistado seu espaço.

Os termos *EcoDesign*, *Green Design* e *Environmental Design* são frequentemente utilizados para descrever a interação de conceitos ambientais no desenvolvimento de produto (JESWIET e HAUSCHILD, 2005). O *EcoDesign* pode ser definido como sendo um projeto para o meio ambiente, onde considerações sistemáticas de desempenho do produto ou dos processos são feitas ao longo de todo o ciclo de vida, respeitando-se os objetivos ambientais e de saúde e segurança, tornando-os eco eficientes (FIKSEL e WAPMAN, 1994) e (VENZKE, 2002).

Projeto para o Meio Ambiente (PMA) é “a consideração sistemática, durante o desenvolvimento de um novo processo e produção, das preocupações de projeto associadas à saúde e à segurança ambiental

sobre todo o ciclo de vida do produto” (FIKSEL e WAPMAN, 1994) (VENZKE, 2002).

No *EcoDesign*, o projetista apresenta propostas de projeto que consideram o impacto ambiental em todo ciclo de vida do produto, considerando: processamento da matéria prima ou do mineral, manufatura, embalagem, transporte, distribuição, uso, manutenção e disposição final (PENCIUC, LE DUIGOU, *et al.*, 2016).

O *EcoDesign* contempla a integração dos aspectos ambientais com o desenvolvimento da tecnologia e *design* do produto. O objetivo geral é a redução de impactos ambientais adversos ao longo do ciclo de vida do produto. De acordo com as diretivas da *European Union's EcoDesign*, o foco principal desta metodologia é a energia incorporada pelos produtos e outros aspectos ambientais, durante o seu completo ciclo de vida. As diretrizes enfatizam ainda o importante papel das fases de concepção e projeto, antes do produto ser manufaturado e introduzido no mercado (VAN DER VELDEN, KUUSK e KOHLER, 2015).

Analisando-se de forma abrangente é possível considerar que o *EcoDesign* herdou a visão holística da ecologia industrial, pois considera o reaproveitamento de resíduos industriais, a extração de matéria prima, o consumo de energia e a geração de resíduos em toda a cadeia de produção, distribuição, uso e disposição final do produto.

Venzke (VENZKE, 2002) apresenta 10 boas práticas para o *EcoDesign*, que são:

- Escolha de materiais de baixo impacto ambiental;
- Projetos voltados à simplicidade / modularidade;
- Incineração de resíduos;
- Redução do uso de energia;
- Uso de formas de energia renovável;
- Produtos multifuncionais;
- Produtos com maior durabilidade;
- Recuperação de embalagens;
- Não utilização de substâncias perigosas; e
- Prevenção de acidentes.

Tanto do ponto de vista técnico como dos requisitos ambientais e de consumo de energia, a evolução constante no desenvolvimento dos

materiais tem permitido desenvolver métodos de trabalho que resultam em escolhas mais efetivas.

Boas oportunidades de inovação são captadas e apresentadas por empresas que se preocupam em minimizar o potencial impacto ambiental de seus produtos. Por exemplo, produtos desenvolvidos com materiais mais leves, consomem menos energia ao serem transportados, resultando numa menor produção e emissão de CO₂ dos meios de transporte (O'HORE, COPE e WARDE, 2016).

Em um produto manufaturado, parte da energia consumida e do carbono emitido provém da cadeia de fornecedores a montante. Devido à complexidade do inventário dessa cadeia, em termos de tempo e trabalho consumidos, são utilizadas bases de dados comerciais, tais como: Ecoinvent, GaBi, SimaPro, Athena, CES e outros (WAN OMAR, DOH e PANUWATWANICH, 2014).

2.2. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

Todo material de engenharia tem tempo de vida finito e um determinado ciclo de vida expeável, cujo início ocorre com a extração de matéria prima e o término com sua disposição final, podendo ser reciclado, descartado, reutilizado ou ter outro destino possível.

A ACV proporciona uma estrutura de avaliação de entradas e saídas para cada estágio do ciclo de vida de um produto. Usualmente inclui os seguintes estágios: (i) extração de matéria prima, (ii) produção dos componentes, (iii) manufatura e montagem, (iv) uso e (v) disposição final. O transporte também deve ser sempre considerado em todas as fases (ZAMBRANA-VASQUEZ, ARANDA-US, *et al.*, 2015), (ABNT 14040, 2009). A Figura 2 apresenta os principais estágios de uma ACV.

A Avaliação do Ciclo de Vida é a metodologia mais conhecida para avaliar a carga ambiental relacionada aos produtos e serviços, durante todo o seu ciclo de vida. Requer a coleta de dados consistentes durante todo o ciclo do produto, de tal forma que fique documentado quais recursos foram consumidos e quais emissões foram geradas, durante cada etapa de vida do produto. Uma vez que os dados tenham sido registrados, esse documento relata o caminho percorrido pelo produto, as

transformações sofridas e as consequentes emissões associadas a todo processo (ASHBY e JOHNSON, 2013).

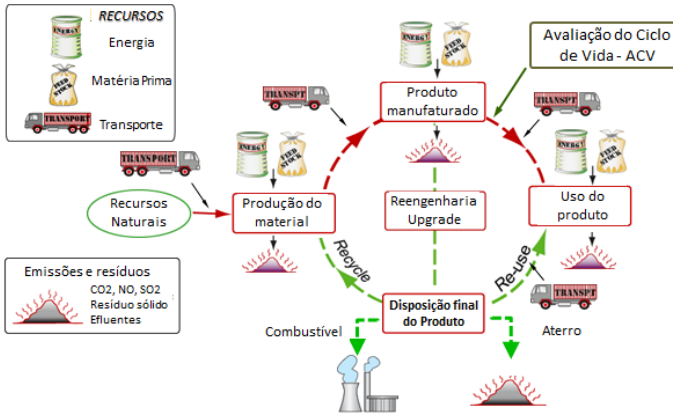


Figura 2: Principais estágios de uma ACV – Adaptado de (GRANTA DESIGN, 2018).

A eficácia na utilização do método ACV depende da experiência e habilidade de seu aplicador, pois não existe um único método para a coleta de dados e a condução dos trabalhos. A Figura 3 apresenta a estrutura de avaliação do ciclo de vida com suas respectivas relações e possíveis aplicações, através da definição de objetivos e escopo do trabalho, análise do inventário, avaliação do impacto ambiental e interpretação dos resultados.

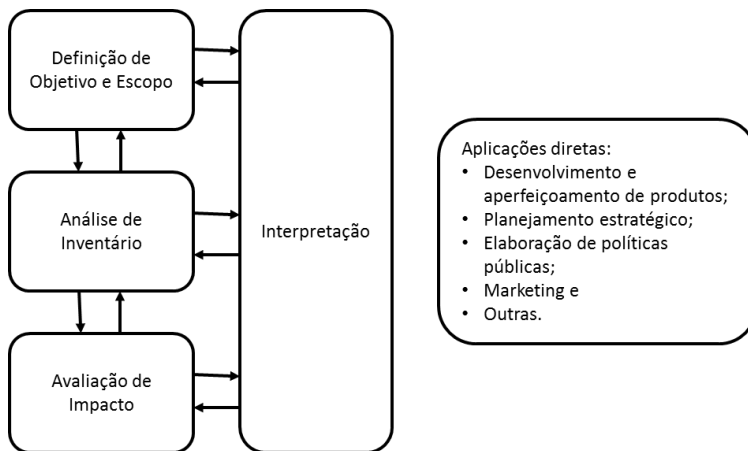


Figura 3: Estrutura de avaliação do ciclo de vida (Adaptado da (ABNT 14044, 2009), revisada 2016, item 4.2.3).

Considerando as principais etapas da Figura 3, é preciso que na definição do objetivo e escopo fiquem claras as fronteiras do trabalho, determinando se a extração de recursos naturais e seus impactos, a produção do bem material, o seu uso ou consumo, a sua disposição final e outros eventuais requisitos serão avaliadas individualmente ou em conjunto. Um trabalho completo requer que essas análises sejam feitas de forma conjunta, considerando todas as etapas do ciclo de vida.

A coleta de dados é o início da etapa de análise de inventário, etapa em que a indisponibilidade de dados, ou a baixa qualidade dos mesmos, pode levar à necessidade de realizar estimativas, tornando essa tarefa bastante complexa. A qualidade e a consistência dos dados são questões chave, portanto, essa pode ser a etapa mais trabalhosa do desenvolvimento de uma ACV (FINNVEDEN, HAUSCHILD, *et al.*, 2009). Os resultados serão eficazes somente se os dados utilizados forem confiáveis e compatíveis com a realidade do local de aplicação (CHEHEBE, 2002). Um possível resultado do inventário e os seus principais impactos estão representados na Figura 4.

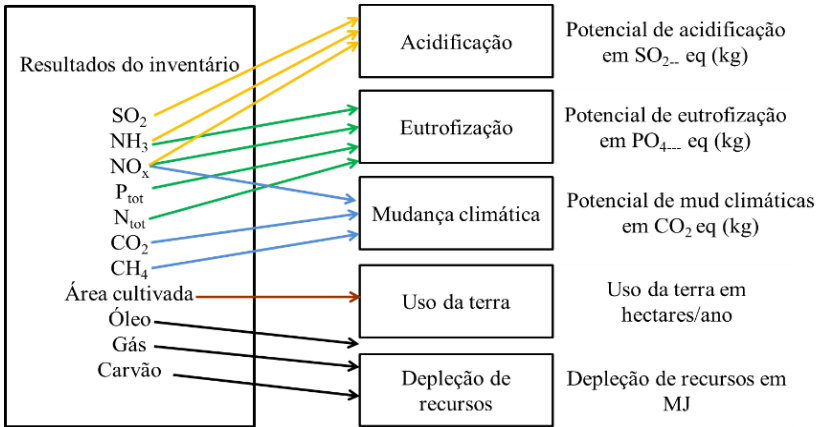


Figura 4: Dados do inventário e respectivos impactos (STAFFORD, 2016) apud Manfred and Pant, 2011).

A avaliação de impacto ocorre com base na lista de recursos consumidos e emissões geradas, apresentadas no inventário. Com esses dados é possível verificar a significância dos possíveis impactos ambientais, através de vários indicadores de qualidade ambiental, tais como: potencial de acidificação, potencial de mudanças climáticas, uso da terra, depleção de recursos e potencial de eutrofização (presença excessiva de nutrientes, sobretudo fosfatos e nitratos, em massas de água como mares, lagos, etc., que origina um desenvolvimento excessivo de matéria orgânica).

A etapa de interpretação irá confirmar se as hipóteses desenvolvidas durante todo o processo de coleta de dados e elaboração do inventário são consistentes e coerentes. Aqui deve ser possível ter informações suficientes para tomar as decisões necessárias para reduzir os impactos a serem gerados. O desenvolvimento da interpretação deve ser realizado conforme os tópicos apresentados na (ABNT 14044, 2009), revisão 2016, item 4.5.1.1., que são:

- Identificação das questões significativas com base nos resultados das fases de inventário, avaliação de inventário e avaliação do ciclo de vida;
- Uma avaliação do estudo, considerando verificações de completude, sensibilidade e consistência;
- Conclusões, limitações e recomendações.

Outro método utilizado para avaliar o ciclo de vida de um produto é o *Life Cycle Design* (LCD), cujo diferencial é considerar o comportamento de um produto tanto no curto como no longo prazo, tendo como objetivos de curto prazo o desempenho estrutural, o uso e o retorno financeiro e de longo prazo os impactos ambientais locais, os impactos sociais e os impactos globais (WANG, JIN, *et al.*, 2018).

2.3. Energia Incorporada e Pegada de Carbono

O termo energia incorporada (*embodied energy*) foi utilizado pela primeira vez no final dos anos 70 com diferentes propósitos e, mesmo atualmente, o termo está sujeito a várias interpretações, provenientes de autores diversos, os quais não deixam claro a metodologia utilizada para conseguir os valores publicados (MILLER, 2001).

Analisando as definições de “energia incorporada” descrita nos trabalhos desenvolvidos por Cabeza (CABEZA, BARRENECHE, *et al.*, 2013) e Dixit (DIXIT, FERNÁNDEZ-SOLIZ, *et al.*, 2010), é possível verificar que na literatura, ambos encontraram algumas diferenças conceituais na interpretação desse termo, sendo elas:

- Koskela (KOSKELA, 1992) argumenta que é a energia consumida na produção de um material;
- Crowther (CROWTHER, 1999) a define como a energia requerida na construção de um prédio, incluindo a energia direta utilizada nos processos de construção e montagem, mais a energia indireta requerida para a manufatura dos materiais e componentes utilizados na construção do edifício;
- Treloar (TRELOAR, 1998) descreve que é a energia requerida (direta e indireta) para produzir um produto, considerando os processos a montante (*upstream*) – rastreabilidade do produto acabado até a matéria prima;
- Bousted e Hancock citado por Langston e Langston (LANGSTON e LANGSTON, 2008) a define como sendo a energia necessária para a construção, mais toda a energia utilizada no processo de fabricação dos produtos utilizados, tais como mineração, refino, manufatura, transporte e montagem.

Na continuidade do levantamento das definições, ambos concordam que a melhor definição veio com Ding (DING, 2004), o qual descreve a energia incorporada como sendo “a energia consumida durante a extração, processamento da matéria prima, manufatura dos materiais de construção e componentes, mais a energia utilizada nos vários processos durante a construção e a demolição dos prédios.”

Nas definições mostradas anteriormente, o bem avaliado é o da construção civil, ou seja, um edifício, entretanto o conceito pode ser expandido para qualquer bem ou serviço. De acordo com a *IFIAS – International Federation of Institutes for Advanced Study* (IFIAS, 1974), a definição de energia incorporada é a quantidade de “energia comercial” (combustíveis fósseis) requerida, direta e indiretamente, pelo sistema ou processo, para produzir um determinado bem ou serviço, nesse caso, contabilizando a demanda equivalente de óleo fóssil.

O resultado mais importante da avaliação da energia incorporada é a quantidade total de óleo equivalente que entra pelas fronteiras do sistema (entradas ou *inputs*) em relação ao bem produzido, expresso em energia (saídas ou *outputs*). Esta relação entrada/saída é chamada de retorno de investimento (EROI ou “*Energy Return of Investment*”). Este resultado também pode ser alcançado dividindo-se o óleo total equivalente consumido pela massa ou serviço produzido (AGOSTINHO e SICHE, 2014).

Ashby et al. (ASHBY, MILLER, *et al.*, 2012) deixam clara a diferença entre a “energia incorporada” e a “energia intrínseca” de um material, sendo a energia incorporada (*embodied energy*) a energia do combustível fóssil consumida para fazer um quilo de material. Essa definição está presente nos valores de energia incorporada dos materiais presentes no banco de dados do CES-Selector. Materiais naturais, tais como a madeira, contém energia intrínseca (*intrinsic energy*), ou energia contida (*contained energy*), as quais são provenientes da radiação solar absorvida durante seu crescimento. Divergentes opiniões convergem para a inclusão ou não da energia intrínseca na energia incorporada.

A pegada de carbono é calculada somando as emissões diretas e indiretas de CO₂, mais a emissão de outros gases efeito estufa de um dado produto, processo ou atividade relacionada ao ciclo de vida. O conceito “pegada de carbono” é bem conhecido e utilizado, no entanto há poucos

bons modelos de avaliação que consideram todos os efeitos, em todos os processos e em todo o ciclo de vida de um produto (WU, HU e MO, 2013). Segundo Lin, o termo “*ecological footprint*” é o precursor do termo “pegada de carbono” (*carbon footprint*) (LIN, LIU, *et al.*, 2013).

O termo *ecological footprint* tem sido utilizado como indicador do ativo ecológico que uma dada população necessita para produzir os recursos naturais que ela consome e absorver os resíduos que produz, medido em área de terra produtiva (Gha – global hectare) requerida *per capita* com a tecnologia predominante (HAMMOND e SETH, 2013).

Em contraste, a pegada de carbono (CO₂.) considera as emissões diretas e indiretas de carbono e tem-se tornado em um assunto sempre presente nos debates sobre alterações climáticas, tornando-se o mais popular indicador ecológico e, frequentemente, adotado por: ONGs, companhias, governos e outros.

A pegada de carbono está sendo largamente utilizada para medir a emissão de carbono em diferentes meios e escalas, tais como: famílias (WEBER e MATTHEUWS, 2008) (DRUCKMAN e JACKSON, 2009), organizações (CAHILL e GALLACHÓIR, 2010) (WU, HU e MO, 2013), cidades e edificações (SINHA, LENNARTSSON e FROSTELL, 2016), (BAKSHI e DEMONSABERT, 2012), (SEDLÁKOVÁ, VILCEKOVÁ e BURDOVÁB, 2015) (CULÁKOVA, VILCEKOVÁ, *et al.*, 2012), países (BISWAS, 2014) (HAMMOND e LI, 2016) e corporações (HASSARD, COUCH, *et al.*, 2014) (BALDO, MARINO, *et al.*, 2009). Contudo, há poucos estudos focados nos bens de consumo produzidos nas indústrias transformadoras, principalmente devido às complexas características dos processos e produtos e à indisponibilidade de dados confiáveis (DONG, GENG, *et al.*, 2013).

Do ponto de vista metodológico, em geral, os métodos de análise relacionados com a pegada de carbono podem ser categorizados em três tipos principais:

- IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Disponibiliza cálculos detalhados e princípios para os vários tipos de emissões, porém é apropriado somente para ambientes fechados, com as fronteiras bem definidos. Não pode ser

utilizado para calcular emissões indiretas (GENG, TSUYOSHI e CHEN, 2010).

- LCA – *Life Cycle Assessment*. É um método de “baixo para cima” (*bottom-up*) e pode dar informações mais específicas para a tomada de decisão. No entanto, é mais trabalhoso, visto requerer uma quantidade grande de dados detalhados (FINNVEDEN, HAUSCHILD, *et al.*, 2009).
- IOA – *Input – Output Analysis*. Trabalha de “cima para baixo” (*top-down*) e tem o potencial de resolver os maiores inconvenientes do método LCA (CRAWFORD, 2008). Utiliza uma matriz macroeconômica para especificar como a demanda de bens ou serviços em um determinado setor cria atividade em outros. É utilizada para quantificar impactos ambientais, identifica como a demanda por um bem ou serviço de um setor resulta no impacto ambiental em outros setores (MO, NASIRI, *et al.*, 2010).

No IOA, o método utiliza dados referentes a um país ou região. Quando há deslocamento do produto, assume-se, tanto para a energia como para o carbono incorporado, que a tecnologia de produção é a mesma em todas as partes, o que é uma aproximação de valores, uma vez que o sistema de produção e a emissão de gás carbônico variam de país para país (BORDIGONI, HITA e LE BLANC, 2012).

O método híbrido, LCA – IOA, pode superar as deficiências individuais de cada um, sendo, por esse motivo, o mais indicado para as indústrias transformadoras montadas em parques industriais, no qual ambos, sistemas industriais e empresas individuais, podem ser analisadas. Essa junção pode preservar a robustez do modelo IOA e ao mesmo tempo propiciar a exatidão do LCA, aumentando a integridade, flexibilidade e confiabilidade dos dados (DONG, GENG, *et al.*, 2013).

Devido ao recente impacto das mudanças climáticas, algumas companhias, tais como, Coca Cola e a BMW, têm elaborado um detalhado levantamento da pegada de carbono dos seus produtos, como uma maneira de reduzir os impactos das mudanças climáticas (ALWAN e JONES, 2014).

Por outro lado, a quantidade de emissões depende da eficiência na conversão de energia e da quantidade de carbono dos diferentes

combustíveis. Rydh e Sun (RYDH e SUN, 2005) analisaram 214 materiais, com o mesmo sistema energético, e concluíram que a relação entre a energia consumida e a emissão de carbono pode ser representada por uma equação linear, exatamente como se encontra demonstrado na Figura 5. A mesma tendência foi observada por Ashby et Johnson (ASHBY e JOHNSON, 2013), e aplicado no CES-Selector (ASHBY, MILLER, *et al.*, 2012) para um universo de mais de 3000 materiais, como demonstrado na Figura 5.

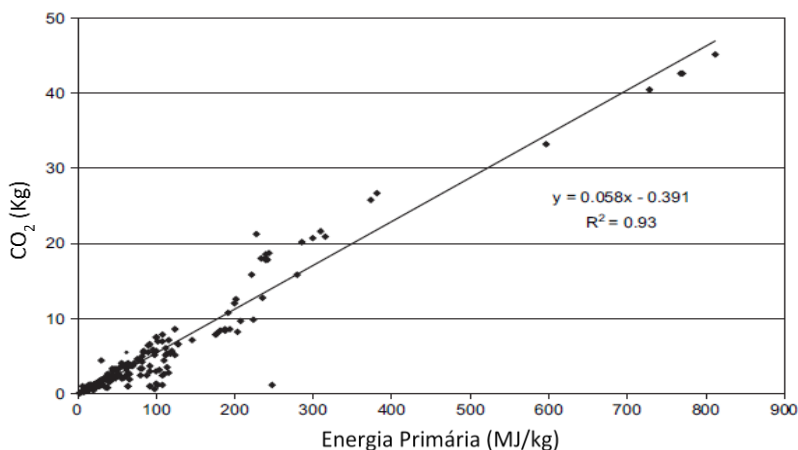


Figura 5: Relação entre a energia primária utilizada e a emissão de CO₂ para diferentes materiais (n=214). (Adaptado de (Rydh, et al., 2005))

2.4. Seleção de Materiais e CES-Selector EcoAudit

Historicamente, os materiais fazem parte do desenvolvimento da humanidade, sendo possível correlacionar o avanço de uma sociedade com sua capacidade de processar materiais e desenvolver produtos que satisfaçam suas necessidades. O desenvolvimento de muitas das tecnologias que tornam nossa existência tão confortável está intimamente associado ao acesso a novos e adequados materiais (CALLISTER, 2008).

Devido à grande e diversificada quantidade de materiais atualmente existente (estima-se por volta de 100.000 diferentes materiais) e aos constantes novos desenvolvimentos, selecionar o material mais adequado tornou-se uma tarefa complexa, onde as características

relevantes e a metodologia mais adequada devem ser definidas e servir de orientação para os engenheiros durante o processo de escolha.

Selecionar um material com as propriedades necessárias e com potencial para ser convertido em um produto útil, de modo econômico e seguro, é um processo complexo, que requer conhecimento sobre a correlação estrutura-propriedades-processamento-composição (ASKELAND e PHULÉ, 2008).

Existem duas decisões principais a serem feitas, a primeira é decidir qual o tipo de material a ser utilizado, (p. ex. metal ou cerâmica ou compósito) e a segunda é escolher qual o material mais adequado dentro dessa categoria. Seleção de materiais, é a decisão final, prática, no processo de projeto de engenharia e pode determinar seu sucesso ou fracasso (SHACKELFORD, 2008).

A American Society for Metals (ASM INTERNATIONAL, 1997), afirma que na escolha do material mais adequado deve-se: (1) selecionar um material que possua as propriedades necessárias para suprir os requisitos de desempenho do produto; (2) selecionar um processo que não afete o desempenho do material; (3) ter custo adequado.

Callister (CALLISTER, 2008), cita quatro requisitos essenciais à seleção de materiais, são elas: (1) condições de serviço; (2) deterioração das propriedades em serviço; (3) fatores econômicos; (4) fatores ambientais e sociais.

Durante a seleção de materiais para o projeto de produtos sustentáveis, as decisões são tomadas com base no custo, aspectos ambientais e outros. Porém, essa decisão não é simples e geralmente os diversos objetivos estão em conflito (LJUNGBERG, 2007).

A escolha do material é fundamental para o processo de manufatura e desempenha um importante papel no ciclo de vida do produto. Na seleção de materiais, os projetistas devem considerar um vasto número de fatores. Independente do objetivo do projeto, nos últimos anos os fatores ambientais têm aumentado em importância, tornando a seleção de materiais uma decisão multicritério (HENRIQUES, 2012).

Atualmente, os requisitos para a seleção de materiais incluem não somente os requisitos técnicos, mas também os fatores econômicos e

ambientais. Em geral, a seleção de materiais mais adequada depende mais da experiência do projetista do que de decisões numéricas. Entretanto, novos materiais são acrescentados ao mercado, numa velocidade cada vez maior, obrigando, mesmo os projetistas mais experientes, a utilizarem sofisticadas ferramentas computacionais. Dentre as opções existentes, Ashby (ASHBY, MILLER, *et al.*, 2012) e sua equipe desenvolveram o CES-Selector como ferramenta para obter a “melhor escolha” possível, em termos de seleção de materiais (ZARANDI, MANSOUR, *et al.*, 2011).

O software CES-Selector atualmente possui um banco de dados com quase 4000 materiais catalogados. Este software é capaz de relacionar os requisitos de projeto (resistência mecânica, dureza, etc.), as funções de produto (carga sofrida, calor, ruído, etc.), as restrições de uso (dimensão, poluição, etc.) e as de concepção (custo, durabilidade, etc.) com a energia incorporada e a pegada de carbono de cada material durante todo o seu ciclo de vida.

A seleção de materiais através de softwares dedicados, como, por exemplo, o banco de dados do CES, pode auxiliar na obtenção de informações relevantes para as fases de projeto e concepção de produto. Utilizando o CES, a avaliação comparativa de diferentes materiais é possível pela adoção de uma metodologia de seleção baseada nas diversas propriedades dos materiais (KHARE, DELL'AMICO, *et al.*, 2012).

No CES, os materiais previamente selecionados, por terem o melhor desempenho dentro dos requisitos especificados, são sistematicamente comparados de forma progressiva, através de duas ou mais das propriedades requeridas, desde propriedades mecânicas até energia incorporada.

No entanto, o CES não é a única ferramenta desenvolvida e disponível para a seleção de materiais, porém é mais simples do que as ferramentas CAD, as quais combinam propriedades técnicas, análise de tensões, seleção de materiais e ACV (ex. Solid Works), (BROEREN, MOLENVELD, *et al.*, 2016).

Tendo como foco a necessidade de inserir requisitos ambientais, o mais cedo possível, no desenvolvimento de um produto, o CES permite sua integração com alguns dos sistemas *Computer Aided Design* (CAD)

e *Product Lifecycle Management* (PLM, tais como: Inventor, CATIA, NX, Creo, TeamCenter e WindChill (GRANTA DESIGN, 2018).

Aumentando as possibilidades de análise o CES-Selector possui o módulo EcoAudit, o qual permite realizar uma análise sobre o consumo de energia e a produção de CO₂ de cada material, durante todo o seu ciclo de vida. Esse módulo utiliza um conjunto customizado de indicadores de impacto ambiental (energia incorporada e pegada de CO₂) sem explorar todos os parâmetros que são usualmente utilizados no estudo do ciclo de vida do produto (ASHBY, MILLER, *et al.*, 2012).

O módulo EcoAudit tem por meta otimizar os esforços referentes ao objetivo e escopo ambiental, através de um conjunto limitado de indicadores de impacto ambiental, desta forma, é importante ressaltar que esse procedimento não pretende substituir a ACV completa, mas sim dar subsídios suficientes para que seja feita uma análise rápida do impacto ambiental produzido pelo produto em análise, durante todo o seu ciclo de vida. (DE BENEDETTI, TOSO, *et al.*, 2010).

O relatório final do módulo EcoAudit está alinhado com os objetivos do Sistema de Gestão Ambiental apresentados na norma NBR ISO 14001:2015, que em seus itens descreve a necessidade da empresa controlar o modo como os produtos e serviços são projetados, fabricados, distribuídos, consumidos e descartados em todo o seu ciclo de vida (ABNT 14001, 2015).

3. METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cada seção deste capítulo corresponde a um artigo, já submetido ou em fase de submissão para publicação, que inclui, respectivamente, sua própria metodologia, resultados e discussão, além de considerações finais.

O primeiro deles trata de uma avaliação inicial da potencialidade do uso da metodologia proposta nesta tese, com base em dados da literatura, referentes à avaliação simplificada do ciclo de vida de produtos ou processos.

As demais seções correspondem a 4 estudos de caso específicos utilizando a metodologia desenvolvida, a partir da estimativa da energia incorporada e da pegada de carbono, referentes a:

- Seleção de matérias-primas para o projeto de produtos cerâmicos a partir de resíduos industriais
- Comparação do uso de materiais para recipientes de refrigerantes (PET e vidro)
- Comparação entre usinas solares fotovoltaicas e eólicas considerando uma planta de 1,5 MW
- Projeto conceitual comparativo entre usinas solares fotovoltaicas e eólicas
- Projeto conceitual de uma pá para gerador eólico

3.1. Avaliação de Energia Incorporada e Pegada de Carbono como um Requisito para Seleção de Materiais nos Estágios Iniciais de Desenvolvimento de Produto¹

Apesar das crescentes preocupações relacionadas com o meio ambiente, o que se vê na prática são adaptações dos requisitos ambientais aos projetos e processos já definidos ao invés da inserção dos requisitos ambientais já no projeto conceitual e fases iniciais de desenvolvimento, etapas em que os materiais a serem utilizados são definidos. Dentre as metodologias existentes, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é a mais conhecida para avaliar a carga ambiental relacionada aos produtos e

¹ Artigo submetido para publicação

serviços durante seu ciclo de vida, desde a extração da matéria-prima até sua disposição final. Entretanto, um levantamento quantitativo detalhado de todas as cargas ambientais na ACV é normalmente trabalhoso e complexo, exigindo esforço e especialização dos envolvidos, o que faz com que muitas empresas abandonem essa análise.

3.1.1. Metodologia

O processo de validação foi utilizado nessa tese para dar suporte à tomada de decisão na seleção de materiais e processos com baixa carga ambiental. Neste trabalho a comparação foi feita entre os resultados da ACV (Avaliação do Ciclo de Vida) obtidos e publicados em diversos artigos, com os valores obtidos com o software CES Selector EcoAudit 2017, utilizando-se as métricas de energia incorporada e pegada de carbono. O principal objetivo deste estudo é validar uma ferramenta que possa ajudar os projetistas e pesquisadores a conseguirem informações confiáveis a respeito da carga ambiental dos produtos ou serviços desenvolvidos nos estágios iniciais de projeto, i.e., na seleção de materiais ainda nas fases iniciais do projeto conceitual.

A validação pode ser feita através de três métodos diferentes (JUDKOFF e NEYMARK, 1995)

- Validação analítica: os resultados são comparados a uma solução analítica ou uma solução numérica conhecida ou aceita.
- Validação empírica: os resultados são comparados com resultados obtidos em células de teste ou testes feitos em laboratórios.
- Validação comparativa: os resultados são comparados com versões diferentes de softwares ou outros programas de simulação, que são considerados já validados.

Para a validação dos resultados deste trabalho, foi utilizado o método analítico. Foram assim, comparados os resultados obtidos com a metodologia ACV em 8 artigos já publicados, com os resultados obtidos através do EcoAudit. Foram selecionados os oito artigos que disponibilizam dados suficientes para calcular a energia incorporada e a pegada de carbono através do EcoAudit. Os artigos foram previamente

selecionados partindo de uma base de mais de mil artigos recuperados de banco de dados bem conhecidos através de palavras chave relevantes.

A seleção de materiais pode ser considerada como um problema de multiescolha, onde um sistema especialista de seleção de materiais é necessário (ZARANDI, MANSOUR, *et al.*, 2011). O CES-Selector EcoAudit é um deles. Esse software permite tomar decisões durante os estágios iniciais de projeto, ajudando os projetistas a tomarem as melhores decisões na seleção de materiais, para uma dada aplicação.

3.1.1.1. Coleta de Dados em ACV

O primeiro passo foi a definição das palavras chave com a consequente busca, organização e seleção de trabalhos publicados em bancos de dados de resumos e citações conhecidos. Na sequência, cada ACV descrita nos artigos selecionados, foi comparada com os valores estimados de energia incorporada e pegada de carbono obtidos a partir do CES EcoAudit 2017.

A diferença numérica absoluta entre os valores dos métodos comparativos não é relevante, uma vez que o objetivo do trabalho é avaliar, de forma qualitativa, a tomada de decisão. Essa diferença quantitativa pode ser causada pelo uso de diferentes bancos de dados, pela indisponibilidade de dados mais precisos nos trabalhos, pela falta de informações relacionadas a todo o ciclo de vida do produto, ou pelo método de coleta de dados, entre outras fontes de incerteza.

A literatura consultada utiliza diferentes termos para identificar a emissão de carbono equivalente, sendo elas: “carbono incorporado” (LAMNATOU, NOTTON, *et al.*, 2014), “emissão de carbono” (UDDIN e KUMAR, 2014) (KIM, 2011), “Potencial de Aquecimento Global (GWP)” (VOSSBERG, MASON-JONES e COHEN, 2014) ou “emissão de CO₂” (LANOE, SIMÕES e SIMÕES, 2013) (MAYYAS, QATTAWI, *et al.*, 2012). Entretanto, o termo mais utilizado na literatura é “pegada de carbono” (DONG, GENG, *et al.*, 2013), (LIN, LIU, *et al.*, 2013), (WU, HU e MO, 2013) e será o termo utilizado ao longo deste trabalho.

Como primeiro passo, a informação foi coletada a partir de banco de dados conhecidos e organizada de forma sistemática, tendo como primeiro passo a seleção desses bancos de dados e a seguir a definição

das palavras chave de pesquisa. A Tabela 1 mostra a combinação das palavras de pesquisa utilizadas na busca dos artigos.

- a) Os bancos de dados utilizados foram: Scopus (ELSEVIER, 2018), Scielo (SCIELO, 2018), Compendex Engineering Village (EI COMPENDEX, 2018), Web of Science (CLARIVATE, 2018) e CAPES web portal (CAPES/MEC, 2018).
- b) As três palavras chave de pesquisa foram: “*material* selection*”, “*carbon footprint*” and “*embodied energy*”.
- c) Os termos adicionais correlacionados foram: “*eco-design*”, “*sustainability*”, “*eco-audit*”, “*life cycle assessment*” e suas derivações.
- d) Os termos principais e adicionais foram combinados com o objetivo de fazer uma busca o mais abrangente possível, sem perder o foco, como listado na Tabela 17.
- e) Os termos foram pesquisados no resumo (*abstract*), título (*title*), palavras-chave (*keywords*) e assunto (*subject*).

O Anexo I descreve, de forma mais detalhada, o procedimento utilizado para alcançar os resultados parciais e finais da pesquisa, mostrando a importância do tema, a quantidade de artigos encontrados em cada base de dados e o modelo utilizado para validar o software CES-Selector EcoAudit.

Tabela 1: Combinação das palavras de pesquisa utilizadas na busca dos artigos.

#	Operadores Booleanos de busca
1	“ <i>material* selection</i> ” AND “ <i>embodied energy</i> ” AND (“ <i>carbon footprint</i> ” OR CO ₂)
2	“ <i>material* selection</i> ” AND (“ <i>eco-design</i> ” OR “ <i>eco-design</i> ”) OR (“ <i>DfE</i> ” OR “ <i>design for environment*</i> ”)
3	“ <i>material* selection</i> ” AND “ <i>sustainability</i> ”
4	“ <i>material* selection</i> ” AND (“ <i>LCA</i> ” OR “ <i>life cycle assessment</i> ”)
5	“ <i>material* selection</i> ” and (“ <i>ecoaudit</i> ” OR “ <i>EcoAudit</i> ” OR “ <i>eco-audit</i> ”)

6	<i>“embodied energy” AND (“carbon footprint” OR “CO2”) AND (“LCA” OR “life cycle assessment”)</i>
7	<i>“embodied energy” AND (“carbon footprint” OR “CO2”) AND (“eco-design” OR “eco-design”) OR (“DfE” OR “design for environment*”)</i>
8	<i>“embodied energy” AND (“carbon footprint” OR “CO2”) AND “sustainability”</i>

A seleção de documentos foi realizada obedecendo à seguinte sequência

- Leitura do título, palavras-chave e resumo de cada artigo selecionado;
- Rápida leitura do texto;
- Seleção dos textos mais adequados aos propósitos deste trabalho
- Leitura completa do artigo; e
- Análise detalhada do artigo relacionado aos propósitos desse trabalho.

3.1.1.2. Seleção de Publicações em ACV

Como resultado dessa busca, foram obtidas 1321 publicações entre 2010 e 2017, conforme apresentado na Tabela 2. O período anterior a 2010 não foi considerado, pois o número de artigos encontrados nesse campo é relativamente pequeno nesse período. No entanto, mais 32 artigos relevantes, fora do período 2010-2017, foram encontrados e nomeados como “complementares”. Nesta fase de pesquisa, as publicações mais relevantes foram selecionadas para dar suporte ao presente estudo. Por outro lado, durante a busca, vários trabalhos foram descartados, sendo que os principais motivos foram: duplicidade, atas de conferência e simpósios, documentos não disponíveis e trabalhos cujo assunto principal não agrega valor ao conteúdo selecionado.

Tabela 2: Publicações relevantes para o presente trabalho.

Banco de dados	<u>Weblink</u>	Qualidade total	Duplicadas	Não disponível	Título, Abstract e Introdução	Selecionadas
CAPEs*	www.periodicos.capes.gov.br	361	114	9	194	74
Compendex	www.engineeringvillage.com	213	96	37	56	24
Scielo	www.scielo.org	6	1	0	4	1
Scopus	www.scopus.com	281	59	55	79	88
Web of Science	webofscience.com	460	143	114	150	53
PARCIAL		1321	413	215	453	240
Complementar		32	0	0	0	32
TOTAL		1353	413	215	453	272

* CAPEs *web portal* permite o acesso a 250 bancos de dados originais.

Após essa busca, 272 publicações foram pré-selecionadas e analisadas. Como resultado final, somente oito delas continham os requisitos necessários para o presente trabalho, sendo as selecionadas.

3.1.2. Resultados e Discussão

Os oito estudos de caso apresentados a seguir, são os selecionados para o trabalho, pois possuem as informações necessárias para alimentar o EcoAudit 2017 e prover as respostas necessárias para posterior comparação com os resultados apresentados nos artigos, os quais foram obtidos através da utilização das ferramentas tradicionais de ACV.

Em cada caso foi calculada a redução do impacto relativo entre os produtos comparados (em %), dividindo-se a diferença entre os valores máximo e mínimo pela energia máxima incorporada e/ou pela pegada de carbono, respectivamente

3.1.2.1. Coletor Solar Integrado: Reciclado vs. Não Reciclado

Este trabalho trata da análise do ciclo de vida de um coletor solar integrado desenvolvida na Universidade da Córsega, na França (LAMNATOU, NOTTON, *et al.*, 2014). Duas bases de dados de materiais (ICE e Alcorn) foram adotadas para a metodologia de avaliação do ciclo de vida, de modo que vários e diferentes cenários foram construídos.

Os principais materiais inseridos no Inventário de Ciclo de Vida (ICV) do CES EcoAudit, classificados por massa foram: aço inoxidável (1,5479 kg), cobre (6,143 kg), lâ de rocha (4,312 kg), poliuretano (1,804 kg), alumínio (1,539 kg), vidro (1,417 kg), propilenoglicol (1,400 kg), policarbonato (0,048 kg) e poliéster (0,017 kg).

Nesse trabalho, os autores calcularam a energia incorporada e a pegada de carbono do sistema, considerando ou não a reciclagem do material, como mostra a Figura 6, que apresenta os dados da literatura (LAMNATOU, NOTTON, *et al.*, 2014). Esses dados foram comparados com os obtidos pelo CES EcoAudit, o qual possui sua própria base de dados de materiais. Os valores calculados com o EcoAudit são mais baixos, tanto para material reciclado como para material não reciclado.

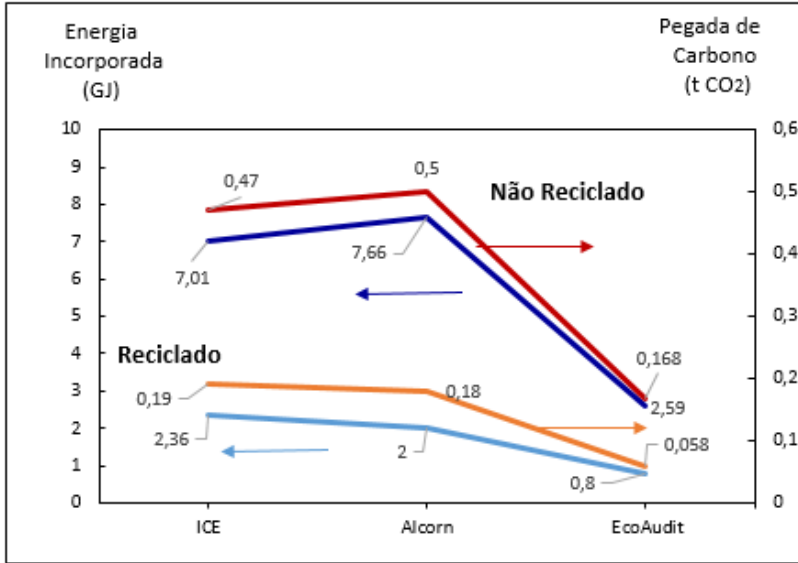


Figura 6: Coletor Solar Integrado: Reciclado vs. Não reciclado – energia incorporada e pegada de carbono.

Os valores finais mostram que, apesar das diferenças numéricas encontradas com as bases de dados ICE, Alcorn ou EcoAudit, a conclusão é a mesma, ou seja, os materiais reciclados têm um impacto ambiental menor do que os não reciclados. Além disso, a redução percentual do impacto da energia incorporada e da pegada de carbono (Figura 7) encontra-se na mesma ordem de magnitude, respectivamente, entre 66-74% e 60-65%, para todas as bases de dados.

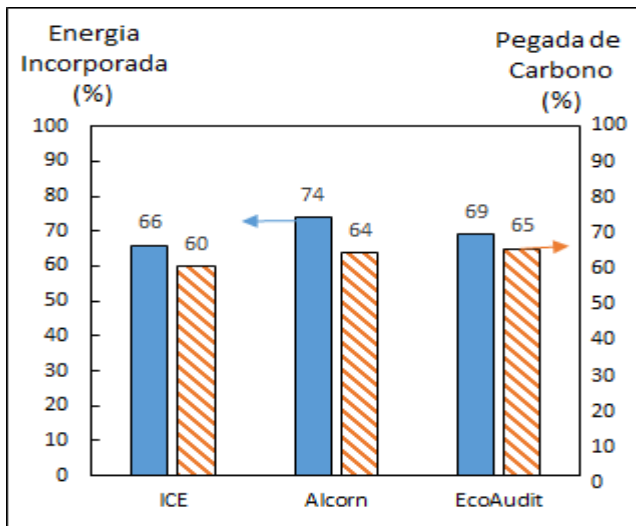


Figura 7: Coletor Solar Integrado: Reciclado vs. Não reciclado – Redução do impacto relativo, de acordo com os três diferentes bancos de dados.

3.1.2.2. Turbina Eólica: Eixo Vertical vs. Eixo Horizontal

O consumo de energia e a emissão de gases efeito estufa, durante todo ciclo de vida de dois modelos de turbina eólica, eixo horizontal e eixo vertical, foram analisados (UDDIN e KUMAR, 2014). O SimaPro 7.3.3 foi usado para estimar a energia incorporada, a emissão de gases efeito estufa e o impacto ambiental. A Tabela 3 apresenta os principais materiais utilizados na fabricação de uma turbina eólica de eixo vertical e uma unidade de eixo horizontal.

Tabela 3: Material para uma unidade de turbina eólica de eixo vertical e uma de eixo horizontal.

Material	Massa da turbina de eixo horizontal (kg)	Massa da turbina de eixo vertical (kg)
Plástico	1,2	-----
Ímã permanente	1,6	-----
Cobre	0,9	-----
Alumínio	12	13,5
Aço galvanizado	42,1	12,5

Adaptado (UDDIN e KUMAR, 2014).

As emissões totais de gases efeito estufa e a energia incorporada durante todo o ciclo de vida do produto (extração, transporte, fabricação, instalação, uso e descarte) para dois tipos de turbinas eólicas são mostradas na Figura 8, comparando o SimaPro 7.3.3 com o CES EcoAudit.

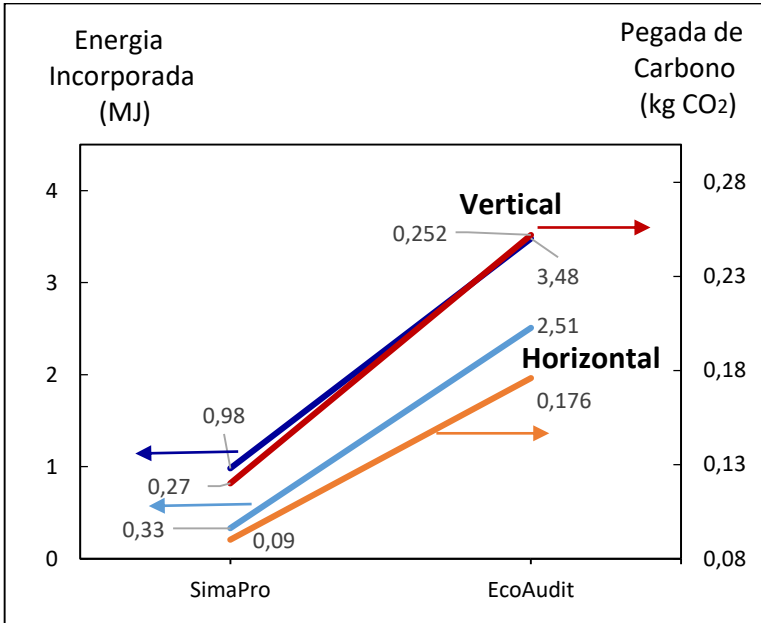


Figura 8: Turbina eólica de eixo vertical e de eixo horizontal: energia incorporada e pegada de carbono.

Apesar dos valores discrepantes encontrados, particularmente para a energia incorporada, esta diferença não invalida a tomada de decisão, isto é, a turbina eólica de eixo horizontal é menos intensiva em energia, em comparação com a turbina eólica de eixo vertical. No entanto, a redução percentual do impacto da energia incorporada e da pegada de carbono (Figura 9) é relativamente menor quando estimada pelo CES EcoAudit, respectivamente, 28% e 30%, quando comparada aos resultados do SimaPro 7.3.3, 66% e 67%.

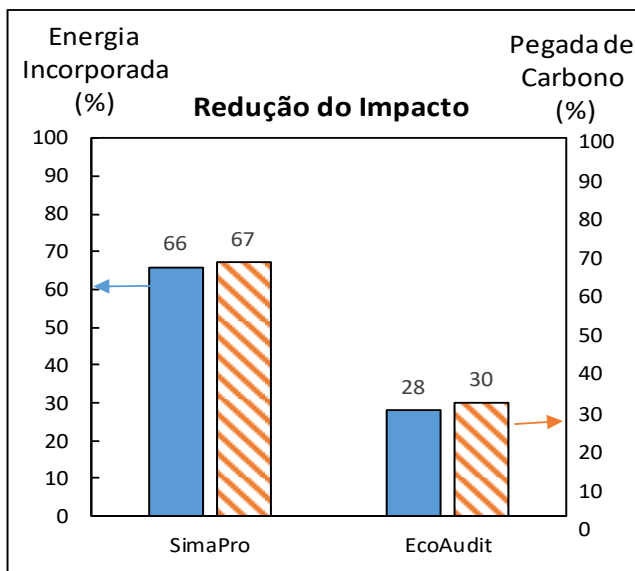


Figura 9: Turbina eólica de eixo vertical e de eixo horizontal: redução do impacto relativo, de acordo com o SimaPro e o EcoAudit.

3.1.2.3. Recipiente de Vidro: Reciclagem vs. Aterro

Este trabalho apresenta uma ACV realizada com o SimaPro 7.1, comparando dois processos relacionados aos recipientes de vidro: reciclagem vs. aterro, tendo como métricas a demanda de energia e a emissão de gases de efeito estufa (GEE), realizada na Cidade do Cabo, África do Sul (VOSSBERG, MASON-JONES e COHEN, 2014).

Neste caso, a energia incorporada e a pegada de carbono são expressas, respectivamente, como a demanda acumulada de energia (DAE) e o potencial de aquecimento global (PAG) do recipiente de vidro, descartado em aterro ou reciclado, considerando uma tonelada de matéria-prima.

A Figura 10 apresenta os valores de energia incorporada e pegada de carbono dos recipientes descartados em aterros versus reciclados, considerando os valores quantitativos fornecidos pelo SimaPro 7.1 e pelo CES EcoAudit.

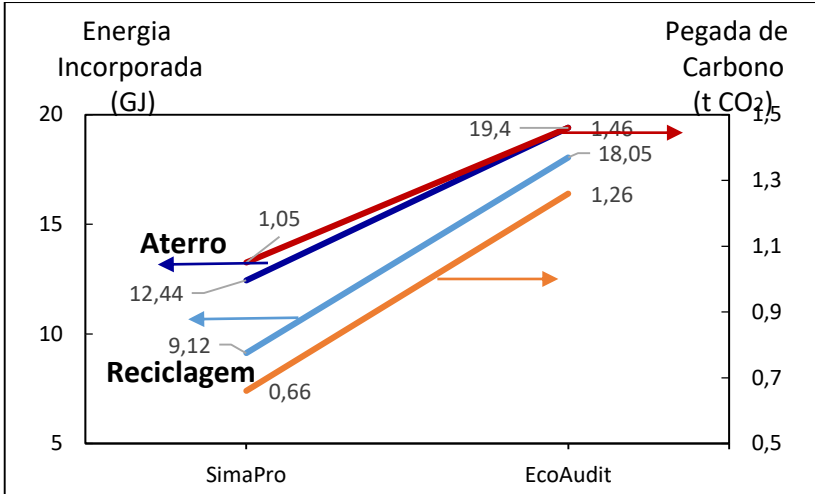


Figura 10: Aterro vs. reciclagem de recipientes de vidro: energia incorporada e pegada de carbono.

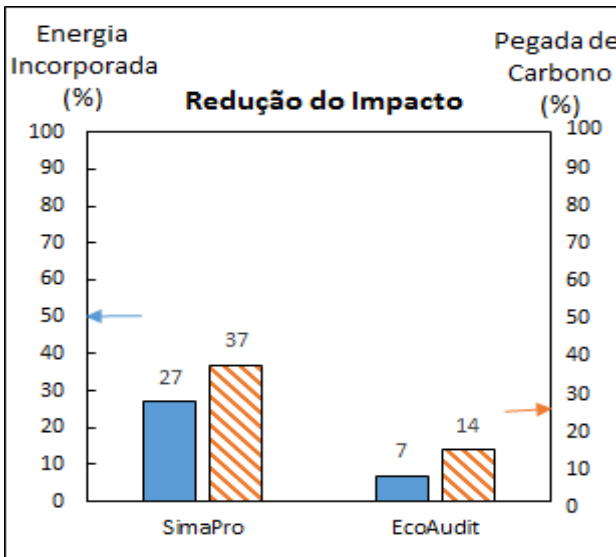


Figura 11: Aterro vs. reciclagem de recipientes de vidro: redução do impacto relativo, de acordo com o SimaPro e o EcoAudit, respectivamente.

Tanto no SimaPro 7.1 como no CES EcoAudit, a conclusão é favorável ao recipiente reciclado, desconsiderando os valores absolutos estimados. Aqui, também, a redução percentual do impacto da energia incorporada e da pegada de carbono (Figura 11) é relativamente menor quando estimada pelo CES EcoAudit, respectivamente, 7% e 14%, quando comparada aos resultados do SimaPro, 27% e 37%.

3.1.2.4. Colchão: Espuma de Poliuretano vs. Colchão de Mola

Neste trabalho, analisou-se o impacto ambiental de dois produtos, um colchão de espuma de poliuretano (PFM) e um colchão de molas (PSM) (LANOE, SIMÕES e SIMÕES, 2013). Este estudo foi realizado durante a fase de pesquisa e desenvolvimento (P & D) do produto. As bases de dados utilizadas foram EcoInvent e Idemat 2001. Os dados sobre a produção de colchões, transporte e fim de vida estavam disponíveis; no entanto, eles não foram inseridos no presente trabalho. Apenas os valores dos materiais relacionados ao Inventário do Ciclo de Vida (ICV) foram considerados. Os principais materiais inseridos no CES EcoAudit e classificados por massa foram os seguintes:

- PFM (kg): espuma de poliuretano (PUR) (24,44), poliéster (3,21), polipropileno (1,86), filme de polietileno de baixa densidade (LDPE) (1,385), aço carbono (0,112) e couro (0,006);
- PSM (kg): aço carbono (12,00), espuma de poliuretano PUR (4,71), acetato de vinil etileno (EVA) (2,0), filme de polietileno de baixa densidade (LDPE) (1,385), poliéster (0,9404), polipropileno (0,631), têxtil não tecido (0,1674), acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) (0,012) e latão (0,006).

Considerando os principais materiais e utilizando o método das hierarquias EcoIndicador 99 (conjunto de pesagem média), os resultados da pontuação única são expressos através de Pontos EcoIndicador (Pt) apresentados na Tabela 4, os quais são comparados com a energia incorporada e a pegada de carbono calculados com o CES EcoAudit 2017.

Tabela 4: Colchão de PFM vs. PSM, comparados em relação a: (a) energia incorporada e pegada de carbono; (b) redução de impacto de acordo com o Eco Indicador e o EcoAudit.

Processo	Banco de dados	Energia Incorporada (GJ)	Pegada de Carbono (t CO ₂)	EI99 Pontos
PFM	Pontos EcoIndicador	-----	-----	39,1
	CES EcoAudit 2017	3,38	0,166	-----
PSM	Pontos EcoIndicador	-----	-----	9,3
	CES EcoAudit 2017	1,41	0,0734	-----
Redução do impacto	Pontos EcoIndicador	-----	-----	76%
	CES EcoAudit 2017	58%	56%	-----

Adaptado (LANOE, SIMÕES e SIMÕES, 2013).

Apesar da diferença de unidades usadas na avaliação da energia incorporada e da pegada de carbono, na comparação dos colchões de espuma de poliuretano e mola, a conclusão é a mesma, ou seja, o PSM tem um impacto ambiental menor do que o PFM. As reduções de impacto (%), considerando a energia incorporada e a pegada de carbono, são ligeiramente inferiores nos valores obtidos com o CES Selector EcoAudit, 56% e 58% respetivamente, quando comparadas com a pontuação EI99, a qual resulta uma diminuição de 76%.

3.1.2.5. Monobloco de Carro: ACV para Diferentes Materiais

O projeto a seguir desenvolvido, baseado na ACV, avalia o desempenho ambiental do monobloco de um carro (BIW) (MAYYAS, QATTAWI, *et al.*, 2012). BIW refere-se ao estágio de fabricação de automóveis em que os componentes de chapa metálica do corpo do carro são unidos por solda, antes da pintura e antes que outras partes tenham

sido montadas na estrutura do chassi, nessa fase denominada de monobloco.

O CES-Selector 2008 forneceu tanto os dados utilizados para estimar a energia incorporada e a pegada de carbono como também os valores relacionados à reciclagem dos materiais, sendo eles de: 95% para o alumínio e magnésio, 90% para o aço, 80% para o titânio e menos de 1% para o compósito. O tempo de vida esperado para um veículo de passageiros foi adotado como 200.000 milhas (321.800 km). Este trabalho apresenta os dados de 12 materiais diferentes, mas para a presente comparação, são utilizados apenas quatro materiais, sendo eles: AISI 3140, aço inoxidável ferrítico AISI 405 forjado e recozido, liga AA6060 e Liga AZ61 Mg.

A Tabela 5 e a Figura 12 contêm dados relacionados ao BIW e seus respectivos valores de energia incorporada e emissões de CO₂, comparando o CES EcoAudit 2008 com o EcoAudit 2017, os quais apresentam valores diferentes devido às atualizações dos valores disponibilizados em seu banco de dados.

O material base para avaliar a redução de impacto é o AISI 314 (Tabela 5 e Figura 13), considerando que apresenta os maiores valores de energia incorporada e pegada de carbono, dentre os quatro materiais considerados.

Tabela 5: Monobloco de carro: energia incorporada e pegada de carbono.

Material	BIW massa (kg)	Banco de dados do material	Energia Incorporada (GJ)	Pegada de Carbono (tCO₂)
AISI 314	270	CES 2008	255	17,72
		CES EcoAudit 2017	189	13,5
Aço inoxidável AISI 405	203	CES 2008	194	13,24
		CES EcoAudit 2017	145	10,3
AA 6060	135	CES 2008	119	8,45
		CES EcoAudit 2017	109	7,7
Liga AZ61 Mg	100	CES 2008	88,6	6,41
		CES EcoAudit 2017	72,9	7,14
Redução do impacto SS AISI 405	-----	CES 2008	24%	25%
		CES EcoAudit 2017	23%	23%
Redução do impacto AA 6060	-----	CES 2008	53%	52%
		CES EcoAudit 2017	42%	43%
Redução do impacto liga AZ61 Mg	-----	CES 2008	65%	64%
		CES EcoAudit 2017	61%	47%

Adaptado (Mayyas, A.T. et al., 2012)

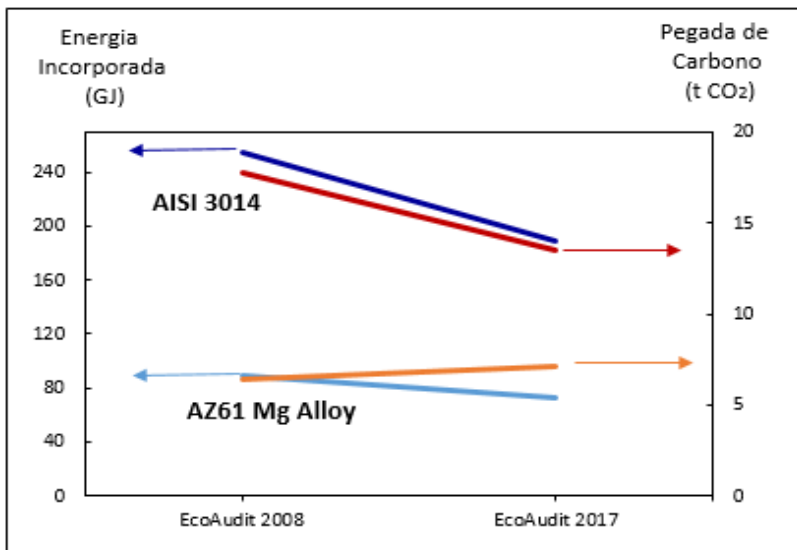


Figura 12: AISI 3014 vs. Liga AZ61 Mg para monobloco: energia incorporada e pegada de carbono.

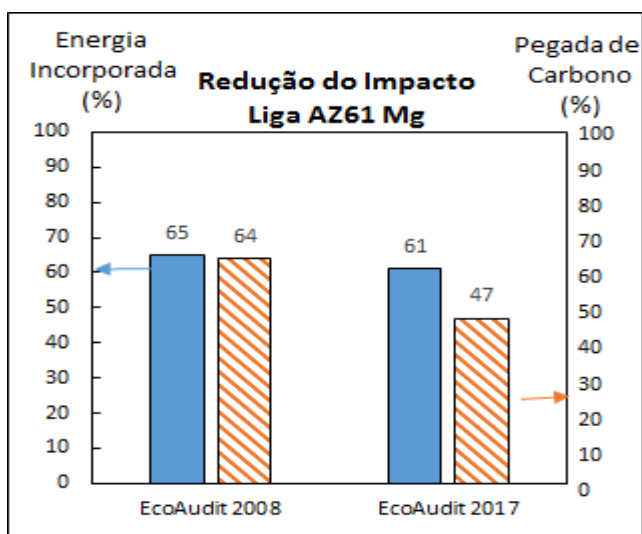


Figura 13: AISI 3014 vs. Liga AZ61 Mg para monobloco: redução do impacto relativo, conforme o banco de dados do EcoAudit, versões 2008 e 2017, respectivamente.

A percentagem de redução de impacto da energia incorporada e da pegada de carbono é a seguinte:

- O AISI 405 tem quase o mesmo valor para ambos, respectivamente, 24% e 25% estimados pelo CES 2008, 23% e 23% estimados pelo CES EcoAudit 2017;
- A liga AA 6060 tem valor menor para o CES EcoAudit 2017, respectivamente 42% e 43%, quando comparado ao CES 2008, 52% e 53%;
- A Liga AZ 61 Mg, de acordo com o CES EcoAudit 2017 tem um valor menor, respectivamente, 61% e 47%, em comparação com a CES 2008, 65% e 64%.

É perceptível que para um veículo de passageiros com o tempo de vida esperado de 200000 milhas, o BIW com menor massa (Liga AZ61 Mg) tenha o melhor resultado. Em ambas as avaliações é esse o material escolhido.

3.1.2.6. Fachadas: TPCS vs. GCWS

Neste caso realiza-se uma avaliação comparativa do ciclo de vida de duas fachadas, uma construída de material compósito transparente (TPCS) e outra construída com cortina de vidro (GCWS). O objetivo principal é avaliar os respectivos impactos ambientais (KIM, 2011).

O processo analisado neste estudo considerou três fases do ciclo de vida: pré-uso, uso e pós-uso, desde a extração da matéria-prima até o descarte final, completando o ciclo de vida. A distância total percorrida foi de 1600 km, usando um caminhão de 16 toneladas. Os dados relativos à energia primária consumida (combustível utilizado nos transportes a montante, produção e entrega do material) foram obtidos da base de dados SimaPro 7.1. Os principais materiais, classificados por massa, usados respectivamente no TPCS e no GCWS, são:

- TPCS (kg): constituído por PMMA (876), compósitos de biofibras (185), alumínio (53), silício / EPDM (borracha de monómero de etileno-propileno-termopolimero classe M (52) e epóxi (4);
- GCWS (kg): compreendendo vidro (1899), alumínio (164) e silício / EPDM (49).

A análise mostra que a produção de um painel TPCS consome mais energia do que o GCWS, quase duas vezes mais, por outro lado, o transporte tem maior impacto para o GCWS. A Figura 14 mostra os valores de energia incorporada e emissão de carbono da energia primária, incluindo material e transporte, comparando o SimaPro 7.1 e o CES EcoAudit 2017. Novamente, independentemente de os valores quantitativos serem diferentes, a decisão final é a mesma. Nesse caso, a fachada de vidro também tem uma carga ambiental menor do que a fachada de material compósito.

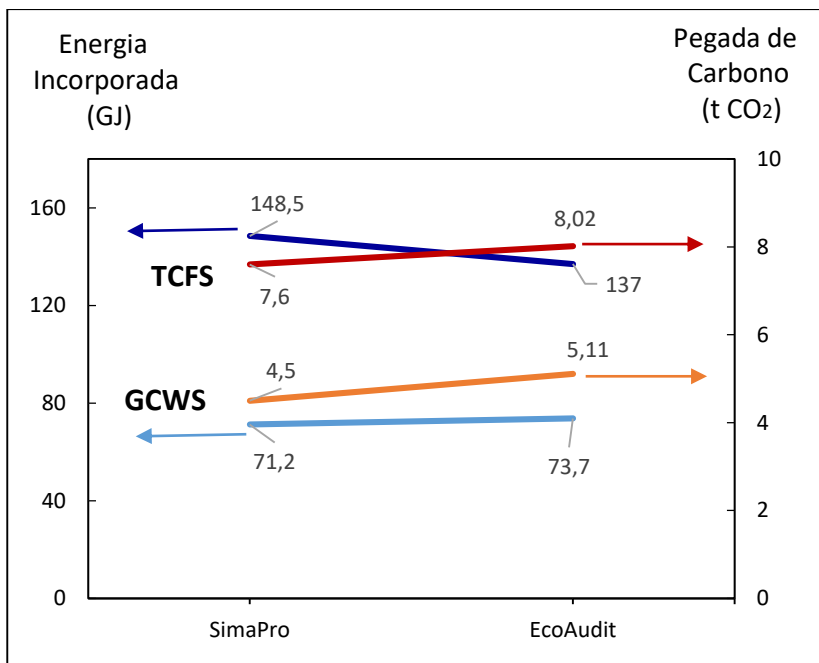


Figura 14: Fachadas construídas em TPCS vs. GCWS: energia incorporada e pegada de carbono.

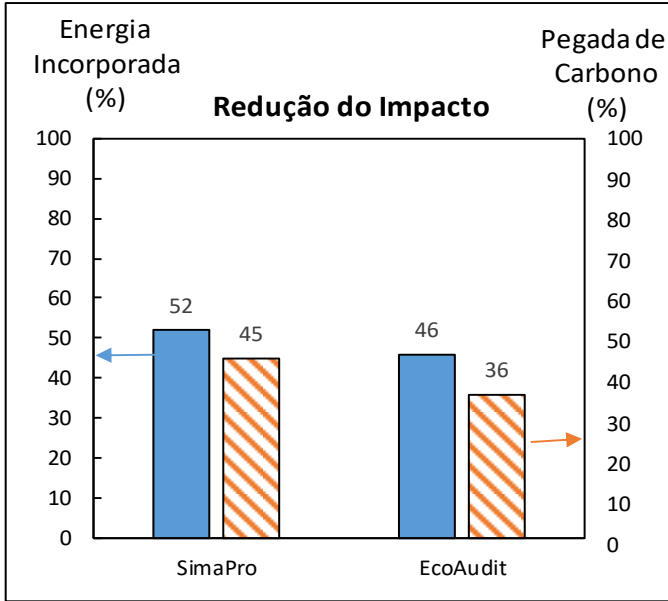


Figura 15: Fachadas construídas em TPCS vs. GCWS: redução do impacto relativo, de acordo com o banco de dados do SimaPro e do EcoAudit.

Além disso, a redução do impacto obtida (Figura 15) em ambos os casos (energia incorporada e pegada de carbono) é menor no CES EcoAudit 2017, respectivamente, 46% e 36%, do que no SimaPro 7.1 (52% e 45%).

3.1.2.7. Construções: Demolição vs. Reconstrução com Reforma

Realizou-se uma avaliação comparativa do ciclo de vida de quatro diferentes padrões de edifícios, considerando reforma do edifício ou demolição e uma nova construção. Nessa avaliação, foi utilizada como parâmetro uma residência multifamiliar construída em 1975, a qual tem quatro opções de reforma: (i) 1975: com reforma sem alteração, (ii) 1975_MedRef: com reforma e alteração média, (iii) 1975_AdvRef: com reforma e grande alteração (iv) 2016_KfW70: demolição e construção de uma nova residência multifamiliar, em 2016 (WEILER, HARTER e EICKER, 2017). Os materiais e seus respectivos quantitativos usados nos diferentes casos de construção e reforma são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6: Materiais utilizados nas diferentes propostas de reforma e reconstrução (kg)

Material	2016_KfW70	1975	1975_MedRef	1975_AdvRef
Cimento	19026	19026	19026	19026
EPS 035/040	4304	142	3410	6792
Espuma de vidro	-----	1699	1699	1699
Placa de gesso	6764	6764	6764	6764
Tijolo colmeia	-----	175437	175437	175437
Concreto reforçado	540053	157282	157282	157282
Massa rápida	9462	9462	18925	18925
EBA	4329	4329	10872	10872
Janela	10750	11574	9032	10750
TOTAL	594708	385734	402446	407546

Adaptado (Weiler, V., 2017)

Os materiais utilizados nesta avaliação com sua respectiva energia incorporada (GJ) e pegada de carbono, (tCO₂-eq) encontram-se na Tabela 7 e na Figura 16.

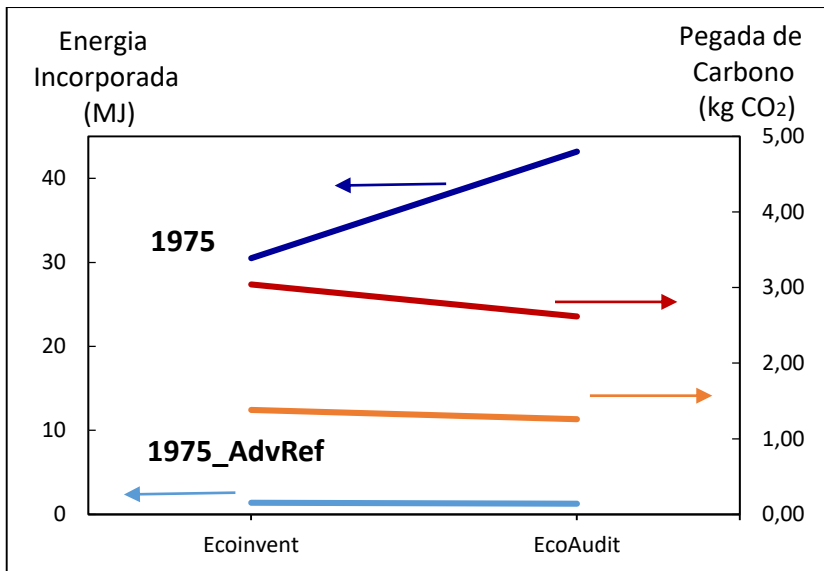


Figura 16: Comparação entre 1975 vs. 1975 AdvRef: energia incorporada e pegada de carbono.

Tabela 7: Energia incorporada e pegada de carbono das construções avaliadas.

Material	Banco de dados dos materiais	Energia Incorporada (GJ)	Pegada de Carbono (tCO ₂)
1975	Ecoinvent 3.2 and Umberto	30,5	3,042
	CES EcoAudit 2017	43,2	2,62
1975_MedRef	Ecoinvent 3.2 and Umberto	22,3	1,659
	CES EcoAudit 2017	24,6	1,49
1975_AdvRef	Ecoinvent 3.2 and Umberto	18,9	1,381
	CES EcoAudit 2017	20,9	1,26

2016_KfW 70	Ecoinvent 3.2 and Umberto	20,4	1,558
	CES EcoAudit 2017	21,7	1,34
Redução do impacto 1975_MedRef	Ecoinvent 3.2 and Umberto	26%	45%
	CES EcoAudit 2017	43%	43%
Redução do impacto 1975_AdvRef	Ecoinvent 3.2 and Umberto	38%	55%
	CES EcoAudit 2017	52%	52%
Redução do impacto 2016_KfW 70	Ecoinvent 3.2 and Umberto	33%	44%
	CES EcoAudit 2017	50%	49%

Adaptado (Weiler, V., 2017)

A vida útil dos edifícios foi fixada em 50 anos, a distância percorrida tem o mesmo valor médio (50 km) para todos os materiais e a avaliação foi feita do “berço ao túmulo”, isto é, abrangendo a extração dos materiais, produção, transporte, uso e disposição final.

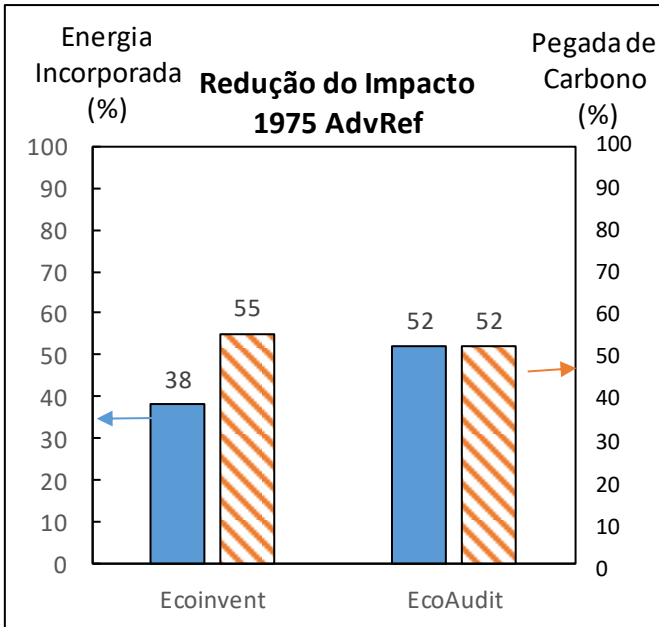


Figura 17: Comparação entre 1975 vs. 1975 AdvRef: redução do impacto relativo, de acordo com o Ecoinvent e EcoAudit respectivamente.

Foram utilizados o software Umberto e o banco de dados Ecoinvent para avaliação do ciclo de vida e elaboração dos modelos para os diferentes materiais de construção. O SimStadt com os arquivos City GML foram utilizados para calcular a composição do material, a modelagem 3D e o ano de construção (WEILER, HARTER e EICKER, 2017).

A casa multifamiliar construída em 1975, sem reforma, é escolhida como base para a redução do impacto. Considerando as quatro residências, este tipo de reforma tem os maiores valores de energia incorporada e pegada de carbono. A porcentagem de redução de impacto para os demais modelos (Tabela 7 e Figura 17), é a seguinte:

- Para 1975_MedRef, a energia incorporada é relativamente menor quando estimada pela Eco Invent e SimStadt, 26% e 43%, respectivamente; no entanto, a pegada de carbono tem a mesma ordem de grandeza, 45% e 43%;

- Para 1975_AdvRef, a energia incorporada também é relativamente menor quando estimada pela Eco Invent e SimStadt, 38% e 52%, respectivamente, enquanto a pegada de carbono é semelhante, 55% e 52%;
- Para 2016_KfW 70, o valor da energia incorporada também é menor quando estimado pela Eco Invent e SimStadt, 33% e 50%, respectivamente, mas com valores próximos, 44% e 49%, se calculado pela pegada de carbono.

Em ambos os casos, usando o Eco Invent / SimStadt ou o Seletor CES, fica claro que o edifício com reforma avançada (1975_AdvRef) tem o melhor resultado, seguido pelo edifício novo (2016_KfW).

3.1.2.8. Aquecedor de Água Doméstico na Austrália: Elétrico, Gás ou Solar

O objetivo deste estudo é investigar o potencial de aquecimento global (GWP) e a demanda de energia primária (PED) para aquecedores residenciais de água, instalados na Austrália, também, nesse caso, do “berço ao túmulo”. Cinco aquecedores residenciais foram avaliados neste trabalho, no entanto, para efeito de comparação com o CES foram escolhidos quatro sistemas: (i) elétrico com reservatório, (ii) gás com reservatório, (iii) gás de passagem e (iv) gás-solar de passagem.

A demanda de água quente foi modelada utilizando-se dados de inventários calculados a partir das especificações técnicas dos fabricantes australianos. O valor referência de consumo de energia considerado, corresponde a uma perda de calor padrão de 2,05 kWh/d. Os outros dados de consumo de energia, foram modelados segundo a norma AS/NZS 4234: 2011 (MOORE, URMEE, *et al.*, 2017).

A avaliação do ciclo de vida foi realizada utilizando-se a versão mais recente do software GaBi 6 e a vida útil de cada aquecedor doméstico foi considerada como sendo de 10 anos. A distância percorrida pelas matérias-primas até o ponto de fabricação dos equipamentos foi considerada de 2500 km, em um caminhão-reboque de 40 toneladas. O transporte dos aquecedores domésticos, desde a fabricação até o armazém, foi considerado como sendo de 100 km em um caminhão de 20 toneladas. Finalmente, o transporte desde o armazém até ao local de instalação foi considerado como sendo de 100 km em um caminhão de

3,5 toneladas. Todos os resíduos de produção foram descartados em aterros sanitários.

Os principais materiais inseridos no CES EcoAudit e utilizados para calcular a energia incorporada e a pegada de carbono dos aquecedores domésticos selecionados (elétrico com reservatório, gás com reservatório, gás de passagem e gás-solar de passagem) são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Material utilizado pelos diferentes aquecedores em toneladas.

Material	Elétrico com reservatório	Gás com reservatório	Gás de passagem	Gás-Solar de passagem
Aço carbono	70,3	58,5	11	-----
Aço galvanizado	13,4	9,2	-----	-----
Ferro cerâmico	2,5	2,2	-----	2,8
Poliuretano	5,7	2,4	-----	7,9
Magnésio	1,8	1,4	-----	1,8
Cobre	0,3	-----	6,1	17,5
Alumínio	-----	-----	1,3	22,2
Polipropileno	-----	-----	0,5	-----
Vidro	-----	-----	-----	34,8
Poliéster	-----	-----	-----	2,2

Adaptado (Moore, A. D., 2017)

A Tabela 9 e a Figura 18 mostram a pegada de carbono (t CO₂-eq) e a energia incorporada (GJ) dos quatro aquecedores domésticos, comparando os resultados coletados de artigos com os resultados obtidos no CES EcoAudit. A Figura 43 mostra a redução de impacto ocorrida com o sistema de aquecimento tipo Gás-Solar, quando comparado com o aquecedor elétrico com reservatório.

Tabela 9: Energia incorporada e pegada de carbono dos aquecedores domésticos.

Material	Banco de dados dos materiais	Energia Incorporada (GJ)	Pegada de Carbono (tCO₂)
Elétrico com reservatório	Gabi 6	484,5	40,2
	CES EcoAudit 2017	441	30,5
Gás com reservatório	Gabi 6	254,7	13,6
	CES EcoAudit 2017	230	16,4
Gás de passagem	Gabi 6	209,2	11,1
	CES EcoAudit 2017	189	13,4
Gás-Solar de passagem	Gabi 6	91,4	5,1
	CES EcoAudit 2017	146	7,0
Redução do impacto Gás com reservatório	Gabi 6	47%	66%
	CES EcoAudit 2017	48%	46%
Redução do impacto Gás de passagem	Gabi 6	57%	72%
	CES EcoAudit 2017	57%	56%
Redução do impacto Gás-Solar de passagem	Gabi 6	81%	87%
	CES EcoAudit 2017	67%	77%

Adaptado (MOORE, URMEE, *et al.*, 2017).

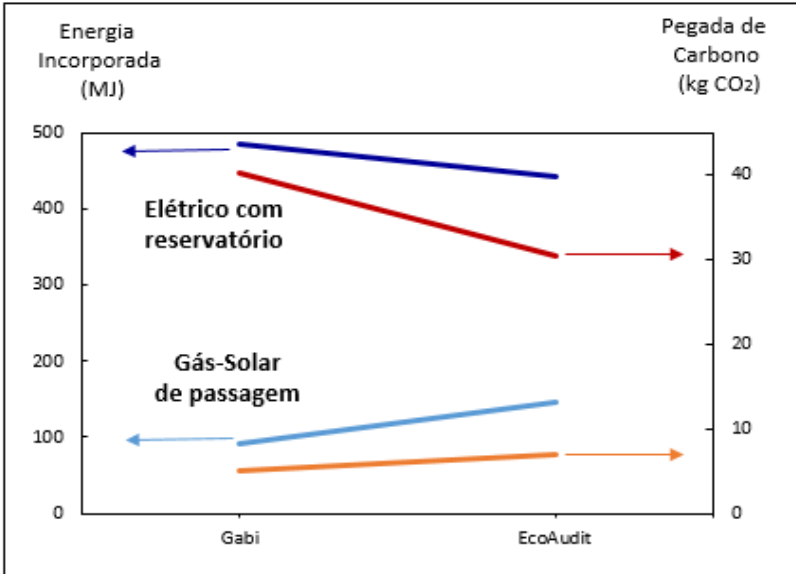


Figura 18: Elétrico com reservatório vs. Gás-Solar de passagem: energia incorporada e pegada de carbono.

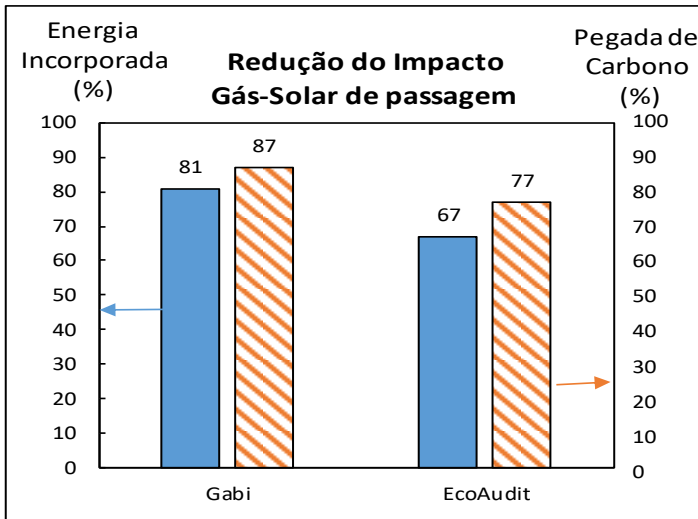


Figura 19: Elétrico com reservatório vs. Gás-Solar de passagem: redução do impacto relativo, de acordo com as bases de dados do Gabi 6 EcoAudit.

Devido aos resultados, o aquecedor elétrico com reservatório de água quente foi o escolhido como base dos cálculos de redução de impacto. Esse aquecedor de água tem os maiores valores de energia incorporada e pegada de carbono dentre os quatro diferentes sistemas de aquecedores domésticos considerados. A porcentagem de redução de impacto de ambos os parâmetros (Tabela 9 e Figura 19) é descrita a seguir:

- Para o aquecedor a gás com reservatório, a pegada de carbono é relativamente menor quando estimada pelo CES EcoAudit, 46% e 66%; no entanto, os valores de energia incorporados são muito semelhantes, 47% e 48%;
- Também para o aquecedor a gás de passagem, a pegada de carbono é menor quando estimada pelo CES EcoAudit, 72% e 56%, porém com o mesmo valor para ambos (57%) se calculado pela energia incorporada;
- Para o aquecedor gás-solar de passagem, a energia incorporada e a pegada de carbono são relativamente mais baixas quando estimadas pelo CES EcoAudit, respectivamente 81% e 67%, quando comparado com o Gabi 6, 87% e 77%.

Usando o Gabi 6 ou o CES EcoAudit 2017, em termos de impacto ambiental, é possível concluir que a opção gás-solar de passagem tem o melhor resultado, seguido pelo aquecedor a gás de passagem.

3.1.3. Considerações Finais

O objetivo do presente trabalho foi validar uma ferramenta que possa auxiliar projetistas e pesquisadores na seleção de materiais com menor impacto ambiental ainda nos estágios iniciais do desenvolvimento de produtos. Esta validação foi desenvolvida tendo como base o estudo comparativo dos resultados publicados de oito avaliações do ciclo de vida com os respectivos resultados obtidos com o CES-Selector EcoAudit.

Em todos os casos estudados, a mesma decisão foi tomada em relação a questões energéticas e ambientais, mostrando que é possível usar um software confiável com as métricas de energia incorporada e pegada de carbono para avaliar, previamente, o impacto ambiental de um novo produto, proporcionando menores emissões de CO₂, consumo de energia e carga ambiental. A diferença numérica absoluta entre os valores

dos métodos comparativos não foi levada em consideração, uma vez que o objetivo deste trabalho é avaliar a tomada de decisão, assim sendo, as diferenças quantitativas não são relevantes.

Tendo em vista trabalhos futuros, sugere-se aplicar esta proposta em empresas que desenvolvam novos produtos, a fim de consolidar a possibilidade de utilizar um software confiável, com as métricas de energia incorporada e pegada de carbono, para pré-avaliar o impacto ambiental de um novo produto durante seu ciclo de vida, ainda nas fases iniciais de projeto e desenvolvimento.

3.2. Avaliação da Potencialidade do Uso de Resíduos Industriais através de Ferramenta de Seleção de Materiais para Projeto de Produtos Cerâmicos²

O desenvolvimento de estudos voltados à reciclagem e/ou sua reutilização na indústria cerâmica, representa uma alternativa capaz de contribuir para o uso de matérias-primas alternativas e diminuir os custos finais dos setores industriais geradores e consumidores de resíduos, além de preservar o meio ambiente (CASAGRANDE, SARTOR e GOMES, 2008).

A construção de mapas de propriedade permite ao projetista ou ao engenheiro a observação da situação de cada classe de materiais ou cada material dentro de uma classe, no que diz respeito às suas características específicas confrontadas duas a duas, estabelecendo-se comparativos sequenciais na busca de definição da escolha dos materiais (SILVA, 2005).

Dentre os softwares disponíveis para seleção de materiais, destaca-se o CES Selector, desenvolvido por Ashby e sua equipe (GRANTA DESIGN, 2018) que disponibiliza um banco de dados com cerca de 4000 materiais, contendo informações técnicas referentes a cada material, destacando-se dentre elas a energia incorporada e a pegada de carbono.

² Publicado na revista Cerâmica Industrial, 21 (2) Março/Abril, 2016.

3.2.1. Metodologia

Este trabalho busca avaliar o potencial de resíduos industriais como matéria prima de novos produtos cerâmicos. Para sua realização foram selecionados 29 produtos cerâmicos distintos, divididos em três grupos principais (tijolos, cimentos e concretos), complementados por com mais 3 tipologias (terracota, revestimento cerâmico e porcelana). O potencial do resíduo é avaliado a partir da análise de sua composição química expressa em óxidos (Al_2O_3 , SiO_2 e CaO). A partir dos materiais selecionados, criou-se um padrão de variação percentual dos 3 óxidos para cada um dos 3 grupos. Utilizando-se a ferramenta de seleção de materiais (software CES-Selector) foram construídos gráficos relacionados aos três grupos com as respectivas quantidades de cada um dos compostos químicos. A partir de dados da literatura, foram feitas avaliações de 12 diferentes resíduos, procurando enquadrá-los em algum dos grupos criados.

Após algumas simulações iniciais com o software, constatou-se que os melhores resultados para caracterizar o potencial do resíduo, seriam alcançados através da análise de sua composição química em óxidos: alumina (Al_2O_3), sílica (SiO_2) e cálcia (CaO). Em seguida, foram selecionados 29 materiais que contêm pelo menos 2 desses óxidos, dentre os 326 materiais cerâmicos disponibilizados no banco de dados do CES-Selector. Esses materiais foram subdivididos em três grupos: tijolos, cimentos e concretos.

Como passo seguinte, foram construídos dois gráficos com os materiais selecionados, um com o teor de alumina e outro com o teor de sílica (percentuais em massa). Completando os dados iniciais, foram elaboradas três tabelas com os teores de alumina, sílica e cálcia. Nessa etapa foi possível constatar que cada grupo possui percentuais distintos desses compostos químicos, por exemplo: o grupo “tijolos” possui alumina de 35% a 78%, enquanto o grupo “cimento” possui alto teor de cálcio e o grupo “concreto” alto teor de silício.

A partir desses resultados, elaborou-se uma tabela de padrões de alumina, sílica e cálcia para cada grupo e gráficos de bolhas com as variáveis sílica vs. cálcia e sílica vs. alumina.

Para avaliar a consistência dos padrões obtidos, foram selecionados 12 resíduos industriais, a partir de referências da literatura, com seus respectivos percentuais de alumina, sílica e cálcio. A avaliação consiste em comparar os percentuais dos três compostos de cada resíduo com os padrões desenvolvidos e apontar se sua utilização é apropriada ou não para algum dos produtos cerâmicos selecionados.

Como última etapa do trabalho, foram selecionadas inicialmente várias relações de propriedades dos materiais em função de sua composição. Em seguida, como exemplo para verificação, foram elaborados os seguintes gráficos de bolhas: alumina vs. dureza, (alumina + sílica) vs. tenacidade, (alumina + sílica) vs. condutividade térmica. Essa etapa tem como objetivo verificar se existe alguma relação entre as quantidades de alumina ou sílica, ou alumina + sílica, com as propriedades selecionadas.

Com os trabalhos concluídos, fez-se a análise dos resultados, avaliando o potencial do software CES-Selector como sistema perceptivo de potencialidade do uso de resíduos industriais como matéria prima de novos produtos cerâmicos.

3.2.2. Resultados e Discussão

Na primeira etapa, a partir do levantamento dos materiais existentes no banco de dados do CES-Selector, esses foram divididos em três grupos: tijolo, cimento e concreto. Esse levantamento resultou na seleção de 29 materiais, correspondentes a 7 tijolos, 7 cimentos e 12 concretos, além de 3 produtos complementares – terracota, porcelana e revestimento cerâmico, descritos na Tabela 10.

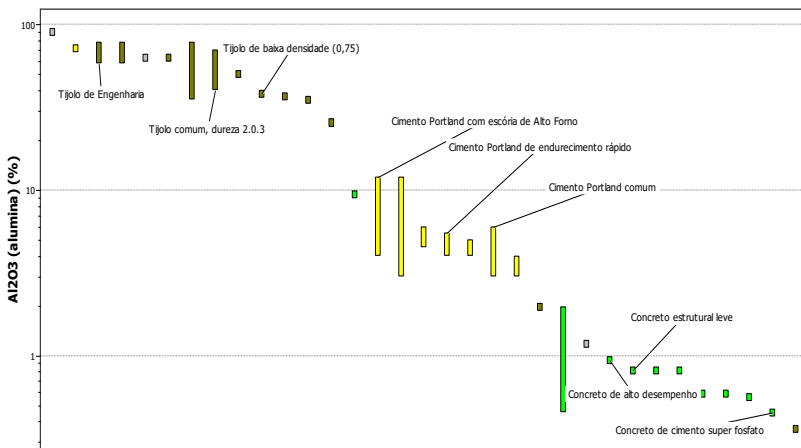


Figura 20: Materiais selecionados como produtos cerâmicos em função de percentual em massa de alumina.

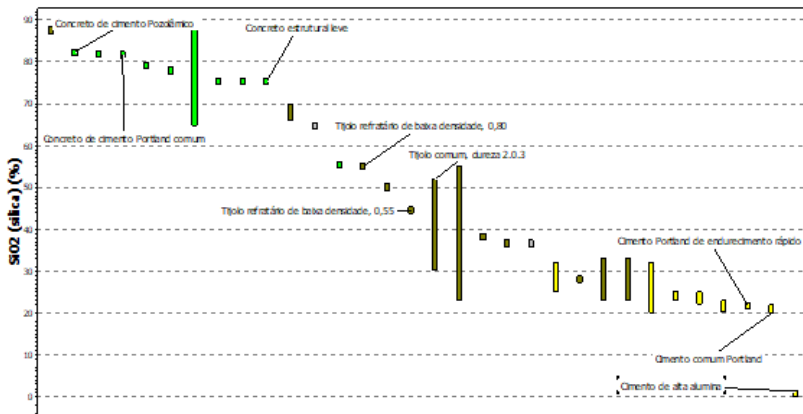


Figura 21: Materiais selecionados como produtos cerâmicos em função de percentual em massa de sílica.

As Figuras 20 e 21 mostram, respectivamente, a percentagem de alumina e sílica de cada um dos materiais. Essas figuras foram as primeiras evidências de que seria possível agrupar os materiais por óxidos cerâmicos.

A composição química em óxidos (Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , CaO e Fe_2O_3) presentes em cada um dos materiais selecionados é apresentada na Tabela 10. Além dos óxidos mencionados na etapa anterior, os óxidos de ferro e de magnésio foram incluídos por apresentarem percentuais significativos em determinados produtos, como, por exemplo, o óxido de magnésio nos concretos e o óxido de ferro nos cimentos.

Tabela 10: Composição química típica de tijolos, cimentos e concretos, além de terracota, porcelana e revestimentos cerâmicos. (GRANTA, 2016)

Produto	Composição em óxidos (% em massa)							
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Outros		
Tijolo de fachada	58-78	23-33	1-3	-----	-----	1-3		
Tijolo de engenharia	58-78	23-33	1-3	-----	-----	1-3		
Tijolo comum, dureza 2.0.3	40-70	30-52	1-3	-----	-----	1-3		
Tijolo comum, dureza 2.2.5	50	28,1	3,25	-----	-----	18,7		
Tijolo de baixa densidade, 0,75	38	50	-----	-----	-----	12		
Tijolo de baixa densidade, 0,80	35	55	-----	-----	-----	10		
Tijolo de baixa densidade, 0,55	37	44,5	0,55	7,75	7,75	2,45		
Cimento Portland comum	3-6	20-22	3-3,5	64-66	2-2,5	4		
Cimento Portland com escória de alto-forno	4-12	25-32	1-3	50-60	0-8	4		
Cimento Portland de endurecimento rápido	4-5,5	21-22	2,3-3,5	64-65	2,5-3,2	3-4		
Cimento de alta alumina	70-73	0-1,3	0-0,3	25-28	-----	0-2,4		

Produto	Composição em óxidos (% em massa)						
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Outros	
Cimento Portland de baixo calor	4-5	23-25	4-6	61-63	1-2	2-4	
Cimento Portland resistente a sulfatos	4,5-6	20,3-23	3-4	62-66	1-3	2,2-6	
Cimento superfosfato	3-4	22-25	3-5	63-65	1,5-2,5	1,9-4,1	
Concreto de cimento pozolânico	0,56	82,4	0,43	7,91	7,89	0,84	
Concreto de cimento de alta alumina	9,43	79	0,02	3,49	7,89	0,14	
Concreto de cimento superfosfato	0,45	82	0,52	8,46	7,89	0,69	
Concreto de cimento Portland comum	0,59	81,7	0,43	8,55	7,9	0,82	
Concreto com alto volume de cinzas volantes	1,96	87,5	0,65	4,62	4,82	0,42	
Concreto de pó reativo	1,18	64,7	0,84	17	6,96	8,65	
Concreto aerado	0,81	75,2	0,58	11,6	10,7	1,13	
Concreto de alta densidade	0,36	38,2	0,26	5,17	4,61	51	
Concreto de isolamento leve	0,81	75,2	0,58	11,6	10,7	1,13	
Concreto estrutural leve	0,81	75,2	0,58	11,6	10,7	1,13	

Produto	Composição em óxidos (% em massa)					
	Al₂O₃	SiO₂	Fe₂O₃	CaO	MgO	Outros
Concreto condutor	0,59	55,4	0,43	8,55	7,9	26,63
Concreto de alto desempenho	0,94	77,9	0,68	13,6	5,65	1,3
Terracota	63	36,7	0,27	-----	0,016	0,014
Porcelana	24-27	66-70	0,5-2	0-0,15	0,1-0,2	3.55-6,5
Piso Cerâmico	63	36,7	0,77	-----	0,016	0,027

Na sequência dos trabalhos foi definido um padrão de variação percentual dos 3 óxidos mais frequentes nos materiais selecionados de cada um dos três grupos (Al_2O_3 , SiO_2 e CaO). Os padrões criados estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Padrões de composição química em óxidos para os três grupos avaliados.

Produto	Composição em óxidos (% em massa)		
	Al_2O_3	SiO_2	CaO
Tijolo	35 – 78	23 – 55	–
Cimento	3 – 12	20 – 32	50 – 66
Concreto	0,45 – 1,96	64,7 – 87,5	4,62 – 17

Na etapa seguinte, foram elaborados gráficos de bolhas, respectivamente Figura 22 e Figura 23, considerando os parâmetros SiO_2 vs. CaO e Al_2O_3 vs. SiO_2 de cada um dos três grupos. O gráfico da relação Al_2O_3 vs. CaO , não mostrado, apresentou a mesma tendência de agrupamento.

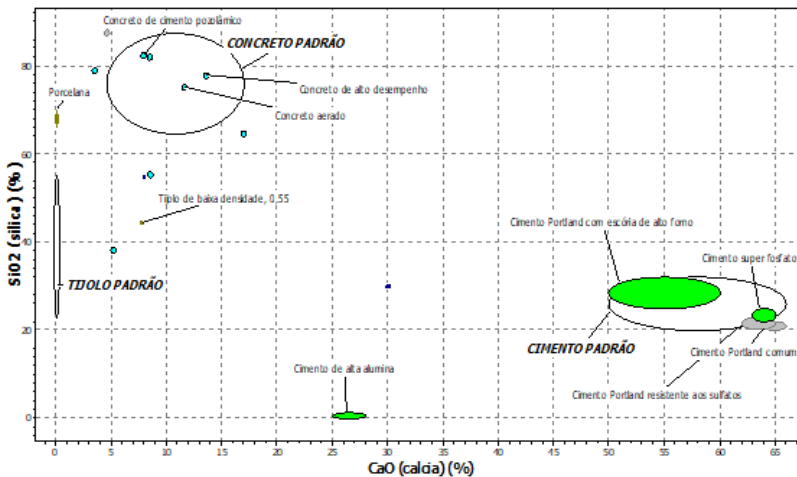


Figura 22: Relação composicional típica para produtos cerâmicos - sílica em função de cálcia.

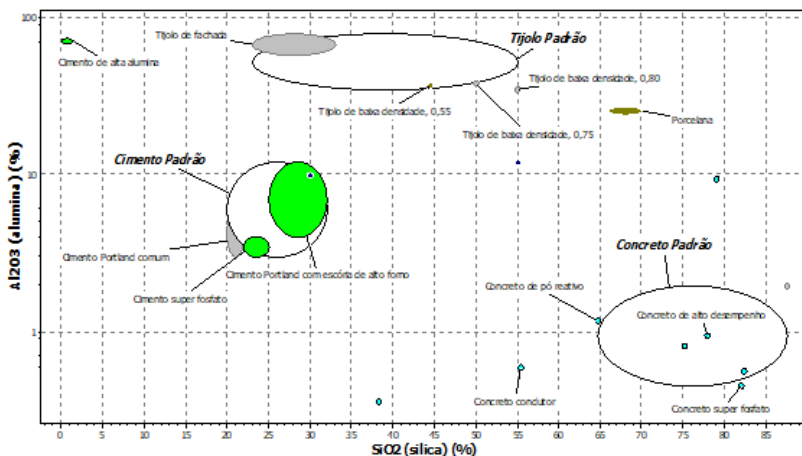


Figura 23: Relação composicional típica para produtos cerâmicos - alumina em função de sílica.

Na sequência, foi verificada a validade dos gráficos elaborados a partir da comparação de alguns resíduos industriais, cujos dados foram obtidos da literatura, com os padrões criados a partir do CES-Selector e definidos na etapa anterior. A avaliação consistiu em comparar os percentuais de alumina, sílica e cálcia de cada resíduo, com os padrões desenvolvidos e apontar se sua utilização é apropriada ou não para algum dos produtos pertencentes a um dos 3 grupos. Também foi possível indicar qual dos componentes químicos deve ser adicionado para alcançar um resultado satisfatório. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 12: Resíduos industriais com sua respectiva composição química, possível utilização e ação de correção

Resíduo Industrial	Referência	Composição em óxidos (% em massa)			Utilização (ação corretiva)
		Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	
Escória de Alto Forno (MG)	Moreira, 2006 (MOREIRA, 2006)	3-18	20-40	12-30	Cimento (+ CaO)
Argila Carbonática	Oliveira, 2001 (OLIVEIRA, RABELO JR. e BRESSIANI, 2001)	12	55	8	Fora do padrão
Argila Gresificável		15	60	1	Fora do padrão
Argila Plástica		22	55	0,1	Tijolo (+ Al ₂ O ₃)
Argila Caulínica		25	50	0,1	Tijolo
Areia Feldspática		9	80	1	Fora do padrão
Calcita		1	2	46	Cimento (+SiO ₂)
Lama FA	Pereira, 2014 (PEREIRA, 2014)	10,91	12,64	34,35	Cimento (+ SiO ₂ + CaO)
Lama FA **		8,76	5,34	51,95	Cimento (+ SiO ₂)
Lama A		89,92	1,8	4,31	Tijolo de alta alumina
CR 1		6,9	19,3	35,27	Cimento (+ CaO)
CR 3		8,46	1,96	43	Cimento (+SiO ₂ + CaO)

** Rica em cálcia

Por fim, foram comparadas as composições químicas dos materiais com suas respectivas propriedades mecânicas, físicas, térmicas, elétricas e outras, a partir das ferramentas disponibilizadas pelo software. Para fins demonstrativos, foram selecionadas as seguintes relações de propriedades em função da composição: alumina vs. dureza, (alumina + sílica) vs. tenacidade e (alumina + sílica) vs. (condutividade térmica), respectivamente representadas nas Figuras 24, 25 e 26.

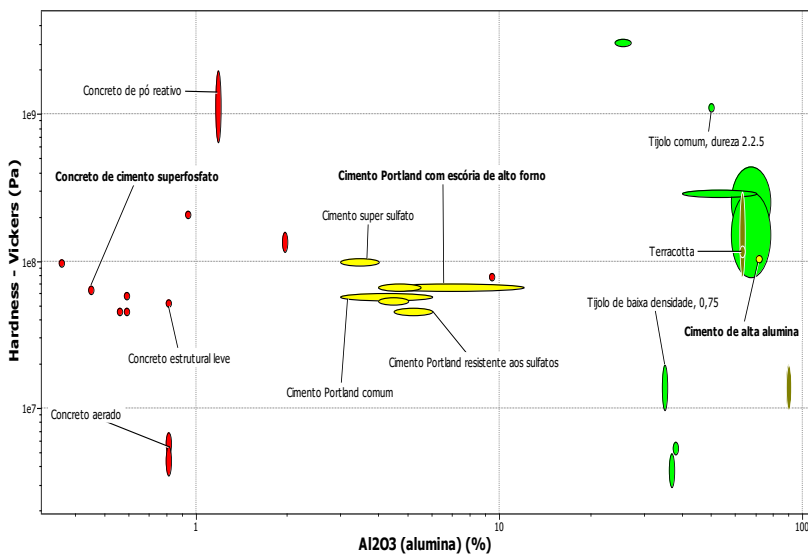


Figura 24: Dureza (Vickers) em função do teor de alumina.

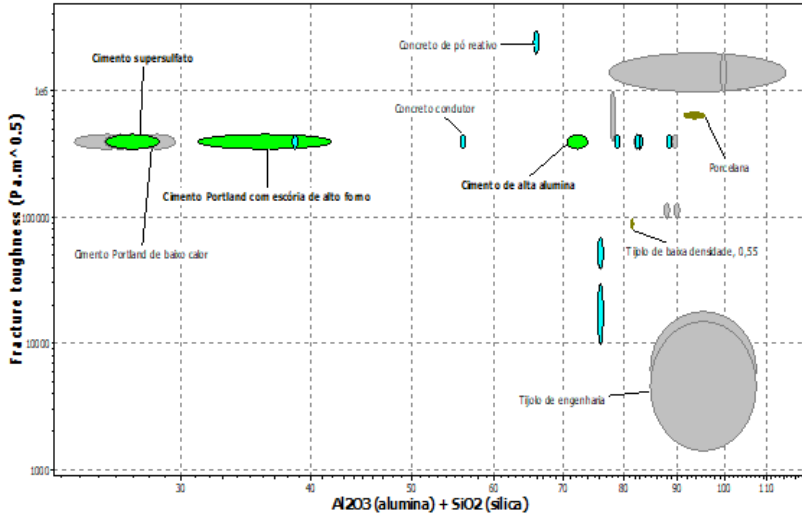


Figura 25: Percentual de (alumina + sílica) vs. tenacidade.

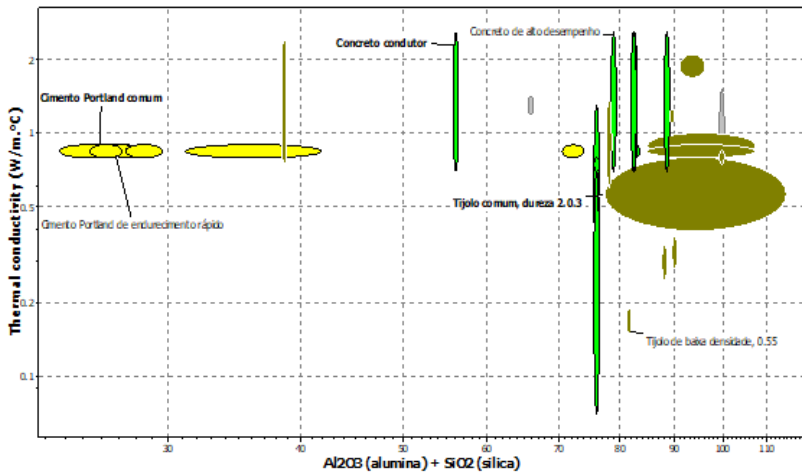


Figura 26: Percentual de (alumina + sílica) vs. condutividade térmica.

Os resultados encontrados podem ser divididos em dois grupos distintos: o primeiro considerando a quantidade percentual dos compostos químicos presentes nos resíduos selecionados e sua possibilidade de

utilização como tijolos, cimentos ou concretos; O segundo verificando se é possível perceber alguma relação entre o percentual de sílica e alumina presente nos resíduos e sua influência nas propriedades mecânicas, físicas, térmicas e elétricas dos produtos a serem elaborados.

Em relação à composição química, os resultados encontrados demonstram que existe uma relação direta entre o teor de sílica, alumina e cálcia presentes nos resíduos com seu enquadramento nos grupos tijolos, cimentos ou concretos. Assim, por exemplo:

- A escória de alto forno contém de 3 a 18% de alumina, o que impossibilita seu uso como concreto, que permite apenas de 0,45 a 1,96% de alumina. A presença de 12 a 30% de cálcia descarta seu uso como tijolo, que não permite a presença desse composto químico. Portanto, a escória de alto forno só pode ser utilizada como cimento. Entretanto, deve-se adicionar CaO em quantidade suficiente para atingir os valores mínimos desse composto químico no cimento (Figuras 27 e 28).
- Alguns resíduos, como a argila carbonática, não se enquadram diretamente em nenhum desses três produtos: 12% de alumina a desabilita para seu uso como concreto; devido aos 8% de cálcia, não pode ser utilizada como tijolo; por ter 55% de sílica, não se enquadra nos cimentos. Dessa forma, a utilização direta da argila carbonática como um desses três produtos não é possível. Portanto, requer-se que seja misturada com outros resíduos ou componentes que levem os percentuais desses compostos químicos a níveis dentro dos valores aceitáveis para cimento ou concreto, uma vez que o tijolo não aceita cálcia, que deveria ser totalmente eliminado da matéria prima resultante.

Com a utilização do CES-Selector é possível inserir os resíduos em seu banco de dados e facilmente visualizá-los no conjunto de materiais e produtos disponibilizados e identificar os potenciais destinos dos resíduos, com base nas respectivas composições químicas. A Figura 27 mostra que a escória de alto forno se encaixa perfeitamente no padrão dos cimentos, quando avaliada com os percentuais de alumina e sílica, e o cimento Portland de escória de alto-forno se aproxima obviamente dessa composição.

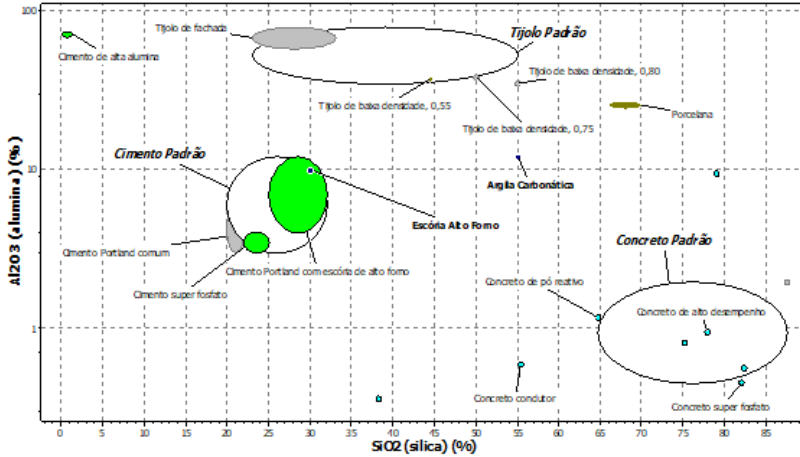


Figura 27: Visualização da escória de alto forno e argila carbonática, bem como seu enquadramento no grupo cimento, considerando seus percentuais de alumina e sílica.

Analisando-se a Figura 28, é possível perceber a necessidade de se aumentar a quantidade de cálcio na escória, para a ajustá-la ao uso como cimento desse tipo. Também é possível excluir alguns materiais, como por exemplo, o cimento de alta alumina, que não pode ser produzido com esse resíduo, devido ao fato de não possuir em sua composição a sílica nos teores encontrados na escória de alto forno avaliada.

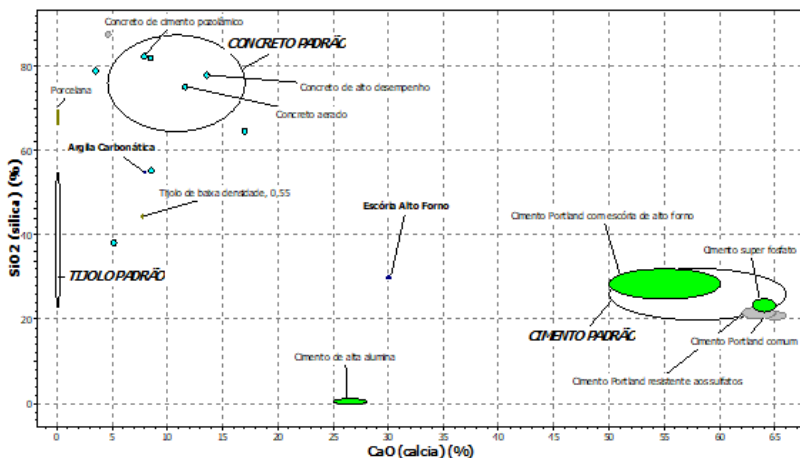


Figura 28: Visualização da escória de alto forno e seu enquadramento no grupo cimento, considerando seus percentuais de sílica e cálcia.

Na sequência, procurou-se identificar alguma relação entre as propriedades mecânicas, físicas, elétricas e térmicas dos materiais selecionados com seus respectivos percentuais de sílica e alumina. Esse procedimento foi desenvolvido tanto de forma individual como de forma combinada, a fim de se constituírem padrões semelhantes aos conseguidos na primeira etapa. Caso esse objetivo fosse alcançado, seria possível pré-determinar essas propriedades quando os resíduos fossem utilizados como matéria prima de novos produtos.

Entretanto, o padrão desejado não foi encontrado e os resultados não mostraram uma tendência ou uma correlação definida. Deste modo, as propriedades requeridas, em termos da utilização dos resíduos selecionados, não são previsíveis apenas a partir do conhecimento da sua composição química. Ou seja, tornou-se evidente que outros fatores são fundamentais, tais como: a matéria prima final, as características do projeto, os processos de fabricação e alguns parâmetros que só poderão ser identificados quando o resíduo for processado (com testes em eventuais corpos de prova). Os resultados apresentados nas Figuras 24, 25 e 26 dão suporte a essa análise:

- Na Figura 24, da avaliação da relação da percentagem de alumina com a dureza dos materiais, observa-se que vários produtos dos

diferentes grupos têm dureza semelhante para diferentes percentuais de alumina. Por exemplo, para valores aproximados e retirados do gráfico, têm-se, para uma dureza Vickers de cerca de 70 MPa, o concreto super sulfato com 0,2 % de alumina, o cimento Portland de escória de alto-forno com valores variáveis de 5 a 11% e o cimento de alta alumina com 90% de alumina.

- A Figura 25, referente à relação da soma dos percentuais de sílica e alumina com a tenacidade do material, mostra que mesmo componentes de um mesmo grupo não possuem uma relação direta. Analisando-se o gráfico, é possível verificar que para um valor de tenacidade de $0,6 \text{ MPa.m}^{0,5}$ o cimento superfosfato possui entre 24 e 28% de sílica + alumina, o cimento Portland de escória de alto-forno possui entre 32 e 42% de sílica + alumina e o cimento de alta alumina possui cerca de 72% de alumina + sílica.
- A Figura 26 mostra a relação da soma dos percentuais de sílica + alumina com a condutividade térmica e demonstra que para uma condutividade térmica de $0,8 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ o cimento Portland comum possui entre 24 e 26% de sílica + alumina, enquanto que um tipo de concreto condutor possui cerca de 56% de sílica + alumina e o tijolo comum de dureza 2,03 tem entre 80 e 100% de sílica + alumina.

De referir que outras possíveis relações entre as propriedades mecânicas, físicas, térmicas e elétricas, não apresentadas, também apontam que a falta de relação persiste em todas as propriedades avaliadas. Ou seja, não há indícios de que as demais propriedades dos materiais disponibilizadas no CES-Selector e que não foram avaliadas neste trabalho, venham a obter resultados diferentes dos que foram aqui apresentados.

3.2.3. Considerações Finais

Os resultados apresentados indicam a relevância do desenvolvimento de ferramentas que possibilitem maior eficácia na destinação correta dos resíduos industriais, de forma a diminuir seus custos iniciais de testes e ensaios necessários para sua caracterização. A ferramenta usada e avaliada nesse trabalho permitiu fomentar uma estratégia de seleção de materiais rápida e eficaz, para a fase de projeto de produto, considerando sua composição química expressa nos óxidos inicialmente selecionados (Al_2O_3 , SiO_2 e CaO).

O resultado da validação de uma ferramenta, para avaliar a potencialidade de resíduos industriais, mostrou que é possível utilizar o software como etapa inicial do processo de utilização do resíduo industrial, como matéria prima para a elaboração de novos grupos de produtos. Ressalte-se que a análise neste trabalho se restringiu aos seguintes grupos: de tijolos, cimentos, concretos e mais três produtos (revestimento cerâmico, terracota e porcelana). Considere-se ainda que as propriedades dos materiais devem ser medidas através de testes e ensaios, pois os resultados alcançados nesse trabalho não permitem esses parâmetros de avaliação.

Concluindo, o CES-Selector pode ser uma ferramenta útil na percepção do potencial de utilização de um resíduo, uma vez que pode indicar a melhor reutilização do resíduo com maiores potencialidades e permitir ao projetista/pesquisador uma escolha mais apropriada.

3.3. Avaliação da Energia Incorporada e da Pegada de Carbono em Recipientes para Refrigerantes: PET versus Vidro³

Esse artigo busca avaliar e comparar qual o material (PET ou vidro) que proporciona um ciclo de vida mais sustentável para os recipientes utilizados no envase de refrigerantes. Foram comparados quatro recipientes de vidro, sendo três retornáveis e um descartável, com cinco recipientes PET (polietileno tereftalato), em que três são descartáveis e produzidos com material virgem, um é descartável e produzido com 20% de material reciclado e um é retornável (RefPet). Utilizou-se como ferramenta o programa CES-Selector EcoAudit, que, como anteriormente referido, considera as cinco principais etapas do ciclo de vida do produto: material (obtenção de matéria-prima), produção, transporte, uso e disposição final (ASHBY, 2009). Novamente, os indicadores resultantes foram a energia incorporada e a pegada de carbono.

3.3.1. Metodologia

A metodologia utilizada tem como base a Avaliação do Ciclo de Vida através de uma ferramenta simplificada de análise, que considera apenas a energia incorporada e a pegada de carbono. A relação (Kg de

³ Artigo aceito para publicação na revista Engenharia Sanitária e Ambiental.

material do vasilhame / 1000 litros de refrigerante) foi utilizada como parâmetro de comparação e mostrou-se válida, entretanto trabalhos com relações semelhantes a essa não são comuns.

3.3.1.1. Ferramenta de Avaliação

Para a análise comparativa de energia incorporada e pegada de carbono, referentes às garrafas produzidas em vidro ou em PET, foi utilizada a estratégia presente no CES-Selector EcoAudit e apresentada na Figura 29.

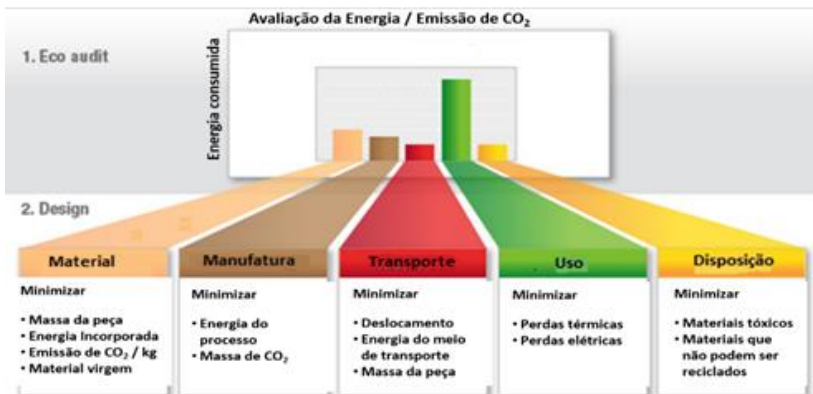


Figura 29: Estratégia de seleção e substituição de materiais com o EcoAudit (adaptado de (GRANTA DESIGN, 2018).

A ferramenta EcoAudit, além de considerar a passagem do produto pelas cinco etapas referidas anteriormente, permite também alguns desdobramentos, como na disposição final, onde, além de minimizar o efeito de materiais tóxicos e não recicláveis, permite definir o melhor destino final possível, podendo o produto após o uso ser destinado para: aterro, reciclagem como matéria prima, reciclagem como novo produto de menor ou maior valor agregado, remanufatura, reuso ou incineração.

O módulo EcoAudit permite que seja realizada uma análise sobre o consumo de energia e pegada de carbono de cada material durante todo o seu ciclo de vida. Esse módulo utiliza um conjunto customizado de indicadores de impacto ambiental (energia incorporada e pegada de carbono), sem explorar todos os parâmetros que são usualmente utilizados

no estudo do ciclo de vida do produto (ASHBY, COUTLER, *et al.*, 2012), também representado na Figura 29.

Para o presente trabalho, os valores de energia incorporada e pegada de carbono referentes ao material têm a União Europeia como referência. Entretanto, o EcoAudit permite que no parâmetro “uso” o usuário possa escolher em qual região do planeta o objeto em estudo será utilizado. Neste trabalho, o país considerado para o “uso” do produto é o Brasil e sua respectiva matriz energética, já presente nos parâmetros do CES-Selector.

3.3.1.2. Restrições Consideradas

No âmbito deste trabalho, foram consideradas as seguintes restrições:

- Não foram utilizadas outras ferramentas além do EcoAudit. Todos os valores apresentados provêm desse software;
- Não foi considerado o consumo de água utilizado na produção e lavagem dos recipientes, bem como os respectivos valores relacionados ao consumo de energia e emissão de CO₂;
- Não foi possível, tampouco, avaliar o número de vezes que o recipiente é reutilizado e suas respectivas consequências relacionadas ao consumo de energia e pegada de carbono;
- A percentagem de vidro reciclado utilizado na fabricação das garrafas de vidro foi considerada de 47% (IBGE, 2016);
- A percentagem de material reciclado nas garrafas PET foi considerada de 19,8% (COCA COLA FEMSA, 2015);
- Os valores de massa dos recipientes foram fornecidos diretamente pelo fabricante (VONPAR, 2016) ou retirados de sites dos fornecedores dos recipientes (VERALLIA BRASIL, 2017)). Não foi utilizada qualquer técnica estatística;
- A fábrica da Vonpar, que participou dos trabalhos, está localizada na cidade de Antonio Carlos – SC. A empresa produz e envasa o refrigerante, sendo que os recipientes de vidro são adquiridos de terceiros e os de polietileno tereftalato são moldados na fábrica da Coca Cola.

3.3.1.3. Bases de Cálculo

Neste trabalho, foram consideradas as seguintes bases de cálculo:

- A distância média percorrida entre a fábrica e o distribuidor final de refrigerante foi considerada de 100 km;

- A distância percorrida pelo recipiente, após o uso, até sua disposição final foi considerada de 100 km;
- Para calcular a massa total de cada recipiente para transportar 1000 litros de refrigerante, foi utilizada, como base de cálculo, a massa de 100 unidades de cada tipo de recipiente avaliado;
- No ponto de venda foi considerado um mostrador vertical de duas portas e motor com potência de 0,12 kW;
- As garrafas permanecem em média 2 dias no expositor até serem vendidas e os expositores ficam ligados 24 horas por dia;
- A energia incorporada e a pegada de carbono relativas à rotulagem já estão incluídas no item “Produção” do EcoAudit;
- Como primeiro passo para o desenvolvimento dos trabalhos optou-se por utilizar os valores de energia incorporada e pegada de carbono por 1000 litros de refrigerantes, a fim de harmonizar os resultados, uma vez que cada tipo de recipiente possui volume e massa distintos.

3.3.2. Resultados e Discussão

A Tabela 3 apresenta na segunda coluna os valores de massa para cada 100 recipientes, na terceira coluna esses valores estão convertidos, mostrando a massa total dos recipientes necessários para envasar 1000 litros de refrigerante. A quarta coluna apresenta o percentual de material reciclado para cada tipo de recipiente. A Figura 2 mostra os valores apresentados na 3ª coluna de forma gráfica.

A partir da análise dos dados apresentados, Tabela 13 e Figuras 30 e 31, é possível verificar que nos recipientes PET a quantidade necessária de material para produzir esses vasilhames, decresce na medida em que o volume individual do recipiente aumenta, ocorrendo exatamente o contrário para os vasilhames de vidro.

Tal fato pode ser explicado pela necessidade de reforçar a espessura das garrafas de vidro de maior volume, de modo a evitar um aumento da sua fragilidade e a sua conseqüente quebra, uma vez que são retornáveis. Cabe ressaltar que, em média, o índice de ductilidade e a resistência à fratura do polietileno tereftalato são, respectivamente, $8,58 \times 10^{-3} \text{ MJ/m}^2$ e $5,0 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{0,5}$ enquanto que o do “vidro soda cal”, muito mais frágil, são de $5,85 \times 10^{-6} \text{ MJ/m}^2$ e $6,4 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{0,5}$ (GRANTA DESIGN, 2018).

Tabela 13: Quantidade de material utilizado por tipo de recipiente por 1000 litros de refrigerante.

Base de cálculo	100 unidades		1000 litros	-----	Valores médios (CES-Selector 2014)
	Massa (kg)	Massa total (kg)	Material reciclado (%)	Densidade (kg/m ³)	
Recipiente					
Garrafa vidro 290 ml	10,2*	352	47**	Vidro = 2470	
Garrafa vidro 600 ml	45****	750	47**	PET = 1400	
Garrafa vidro 1 l	95*	950	47**		
Garrafa vidro 600 ml Descartável	45****	750	47**		
Garrafa PET 250 ml	1,5*	60	0	Energia incorporada (J/kg)	
Garrafa PET 600 ml	2,06*	34,3	0	Vidro = 10,6	
Garrafa PET 2 l	4,18*	20,9	0	PET = 84,7	
Garrafa PET 2.1 <i>Bottle to Bottle</i>	4,18*	20,9	20***		
Garrafa PET 2 l Retornável – RePet	10,6*	53,0	12***		

* Valores de massa dos recipientes (VONPAR, 2016)

** Percentuais de material reciclado (IBGE, 2016)

*** Percentuais de material reciclado (COCA COLA BRASIL, 2016)

**** Valores de massa dos recipientes (VERALLIA BRASIL, 2017)

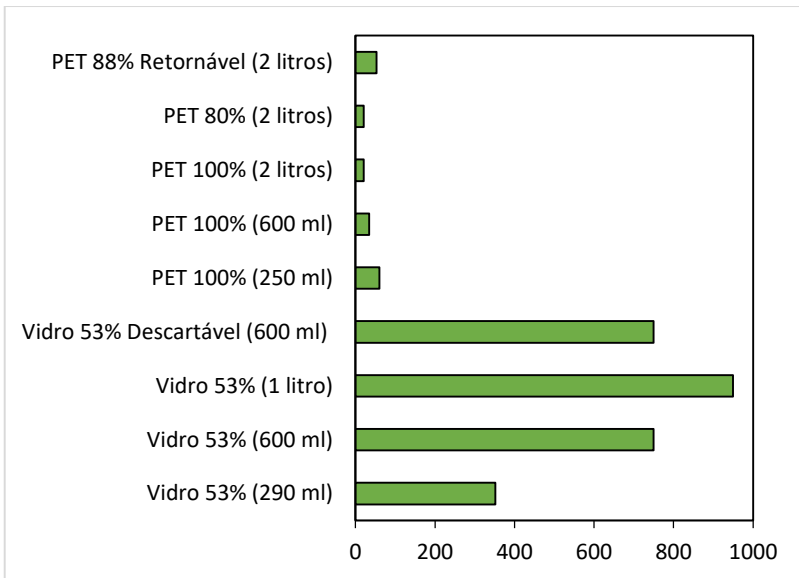


Figura 30: Massa utilizada (kg de material por 1000 litros de refrigerante).

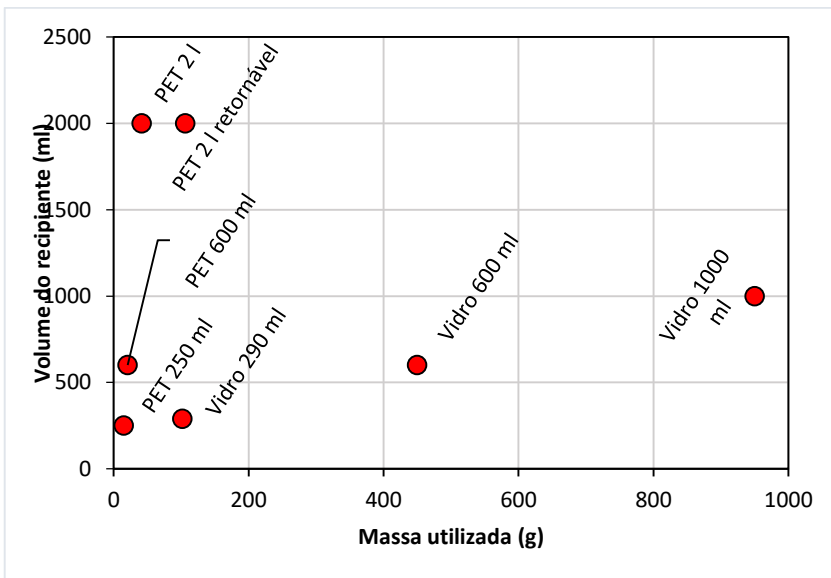


Figura 31: Massa utilizada (grama de material por recipiente).

No passo seguinte, com os valores apresentados na Tabela 13 já definidos, foram construídas, utilizando-se o EcoAudit, duas novas tabelas, referentes à energia incorporada (Tabela 14) e à pegada de carbono (Tabela 15) dos recipientes, durante todo o ciclo de vida.

Para os recipientes em vidro de 290 ml, são necessários 352 kg desse material, para produzir a quantidade necessária de vasilhames capaz de armazenar 1000 litros de refrigerante, enquanto que para os recipientes em vidro de um litro são necessários 950 kg de vidro para armazenar a mesma quantidade de refrigerante, ou seja, 1,7 vezes mais material relativamente ao utilizado nas garrafas de 290 ml. Para o recipiente de 600 ml, o material utilizado para armazenar 1000 litros (750 kg) representa um aumento de apenas 1,13 vezes o material utilizado nas garrafas de 250 ml, entretanto menor do que a quantidade utilizada nas garrafas de 1 litro, mostrando a mesma tendência.

Para os recipientes em PET de 250 ml, são necessários 60 kg desse material para produzir a quantidade necessária de vasilhames para armazenar os mesmos 1000 litros de refrigerante, enquanto que para os recipientes PET de dois litros são necessários apenas 20,9 kg de PET para armazenar a mesma quantidade de refrigerante, ou seja, consome apenas 34,8% do material utilizado nas garrafas de 250 ml. Para o recipiente de 600 ml o material utilizado para armazenar 1000 litros (34,3 kg) representa 57,2% do material utilizado nas garrafas de 250 ml, no entanto maior do que a quantidade utilizada nas garrafas de dois litros, mostrando, também, a mesma tendência.

Analisando-se as garrafas de 2 litros, constata-se que os retornáveis utilizam 53 kg de material contra 20,9 kg das garrafas de 2 litros descartáveis, resultando em um aumento de 1,53 vezes a mais, de material. Essa maior quantidade de material utilizado é justificada pela necessidade de o recipiente ser mais resistente a possíveis danos provocados pelo uso ou transporte.

3.3.2.1 Energia Incorporada

A Tabela 14 mostra a energia incorporada durante todo o ciclo de vida de cada tipo de recipiente avaliado. Foram comparados quatro recipientes de vidro, dos quais 3 são retornáveis (290 ml, 600 ml e 1 l) e 1 descartável (600 ml) com 5 recipientes em PET, sendo 3 produzidos em

material virgem (250 ml, 600 ml e 2 l), um com 20% de material reciclado (2 l) e um retornável (2 l) denominado RefPet.

Na Tabela 14, as colunas 2 e 3 mostram os valores de energia fornecidos pelo EcoAudit para 100 unidades de cada vasilhame e as colunas 4 e 5 apresentam os valores de energia convertidos para cada 1000 litros de refrigerante. Os valores de Energia Recuperada são referentes à possibilidade de recuperação de parte da energia incorporada no produto durante o seu ciclo de vida, através da disposição final.

Ainda na Tabela 14, a coluna 6 apresenta a energia total incorporada para cada 1000 litros de refrigerante, resultado da energia absorvida durante todo o ciclo de vida (coluna 4) menos a que, provavelmente, poderá ser recuperada em sua disposição final (coluna 5). A Figura 32 mostra os valores das colunas 4, 5 e 6 de forma gráfica.

Avaliando os valores obtidos têm-se o melhor resultado, dentre os recipientes reutilizáveis de vidro, para as tradicionais garrafas de 290 ml, as quais possuem um valor de energia total incorporada de 4587 MJ/1000 litros, representando 65,0% da energia total incorporada pelos recipientes de 600 ml e 51,5% da energia total incorporada pelos recipientes de um litro. Isso confirma a tendência apresentada na Tabela 14, ou seja, quanto maior a capacidade do recipiente de vidro maior a quantidade de energia incorporada durante o seu ciclo de vida.

Tabela 14: Energia incorporada nos recipientes por 1000 litros de refrigerante

Unidade	100 unidades			1000 litros		
	Energia Incorporada (MJ)	Energia Recuperada (MJ)	Energia Incorporada (MJ)	Energia Recuperada (MJ)	Energia Incorporada (MJ)	Energia Total Incorporada (MJ)
Garrafa vidro 290 ml	281	- 148	9690	- 5103	4587	
Garrafa vidro 600 ml	915	- 491	15250	- 8183	7067	
Garrafa vidro 1 litro	1860	- 969	18600	- 9690	8910	
Garrafa vidro 600 ml Descartável	957	- 94,7	15950	- 1578	14372	
Garrafa PET 250 ml	219	- 97,7	8760	- 3908	4852	
Garrafa PET 600 ml	281	- 128	4683	- 2133	2550	
Garrafa PET 2 litros	516	- 245	2580	- 1225	1355	
Garrafa PET 2 litros <i>Bottle to bottle*</i>	469	-199	2345	-995	1350	
Garrafa PET 2 litros Retornável	1120	- 829	5600	- 4145	1455	

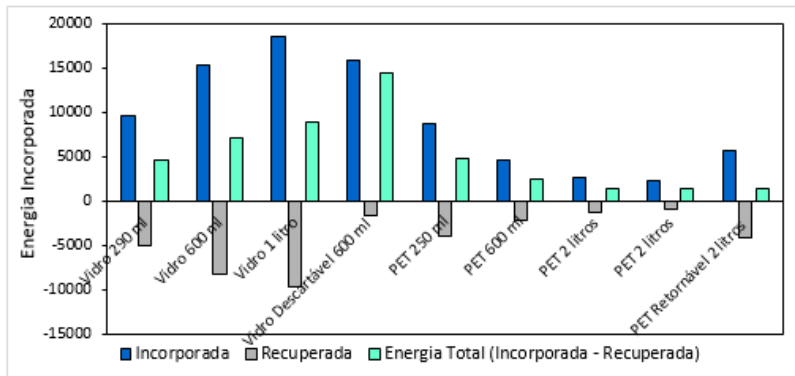


Figura 32: Energia Incorporada (MJ / 1000 litros de refrigerante).

Comparando os recipientes de vidro com 600 ml, enquanto o descartável possui uma energia total incorporada de 14372 MJ/1000 litros, o reutilizável incorpora 7067 MJ/1000 litros, resultando na diminuição de energia incorporada de 50,8%, ou seja, 7305 MJ/1000 litros de refrigerante durante todo o ciclo de vida.

Ao observar os valores obtidos para as garrafas PET, constata-se que o melhor resultado obtido, não considerando o recipiente reutilizável, ocorreu para as garrafas de 2 litros, com valores muito semelhantes entre as garrafas com 100% de material virgem e as garrafas com 20% de material reciclado, as quais possuem, respectivamente, energia incorporada de 1300 e 1350 MJ/1000 litros, respectivamente. Esses valores representam aproximadamente 27,8% da energia total incorporada pelos recipientes de 250 ml e 52,9% da energia total incorporada pelos recipientes de 600 ml.

Finalmente, comparando os recipientes de 2 litros, todos em PET, enquanto que os descartáveis possuem uma energia total incorporada entre 1350 e 1355 MJ/1000 litros, o reutilizável incorpora 1455 MJ/1000 litros, resultando no aumento da energia incorporada de 7,4% ou seja 100 MJ/1000 litros de refrigerante durante o ciclo de vida. No entanto, o CES-Selector não permite especificar quantas vezes o recipiente retornará ao envase, o que poderá alterar, significativamente, o valor resultante do recipiente de 2 litros retornável.

3.3.2.2 Pegada de Carbono

A Tabela 15 mostra a pegada de carbono durante o ciclo de vida de cada tipo de recipiente. Os recipientes avaliados são os mesmos descritos no parágrafo anterior, ou seja, nove unidades, sendo quatro de vidro e cinco em PET.

Na Tabela 15, as colunas 2 e 3 apresentam os valores de emissão de CO₂ fornecidos pelo EcoAudit para 100 unidades de cada vasilhame e as colunas 4 e 5 apresentam os valores de emissão de CO₂ para cada 1000 litros de refrigerante. Os valores de CO₂ recuperados são referentes à possibilidade de diminuir a produção de CO₂, pela reutilização de parte da energia incorporada ao produto durante seu ciclo de vida, através de sua disposição final.

A coluna 6 apresenta o total de CO₂ produzido para cada 1000 litros de refrigerante, resultante da emissão de CO₂ durante todo o ciclo de vida (coluna 4) menos a que poderá ser subtraída, considerando sua disposição final (coluna 5). A Figura 33 mostra esses valores e deixa clara a relação entre a energia incorporada e o CO₂ emitido.

Tabela 15: Pegada de carbono dos recipientes por 1000 litros de refrigerante.

Base de Cálculo	100 unidades		1000 litros		
	CO ₂ emitido (kg)	CO ₂ recuperado (kg)	CO ₂ emitido (kg)	CO ₂ recuperado (kg)	CO ₂ Total Emitido (kg)
Garrafa vidro 290 ml	18,2	- 9,44	627,4	- 325,6	302
Garrafa vidro 600 ml	66,3	- 32,8	1105	- 547	558
Garrafa vidro 1 litro	134	- 64,5	1340	- 645	695
Garrafa vidro 600 ml descartável	67,6	- 8,26	1127	- 138	989

Base de Cálculo	100 unidades		1000 litros		
Garrafa PET 250 ml	9,99	- 4,23	399,6	- 169,2	230,4
Garrafa PET 600 ml	13,3	- 5,66	221,7	- 94,3	127,4
Garrafa PET 2 litros	25,7	- 11,1	128,5	- 55,5	73,0
Garrafa PET 2 litros	23,5	- 8,94	117,5	- 44,7	72,8
Garrafa PET 2 litros Retornável	57,2	- 38,2	286	- 191	95

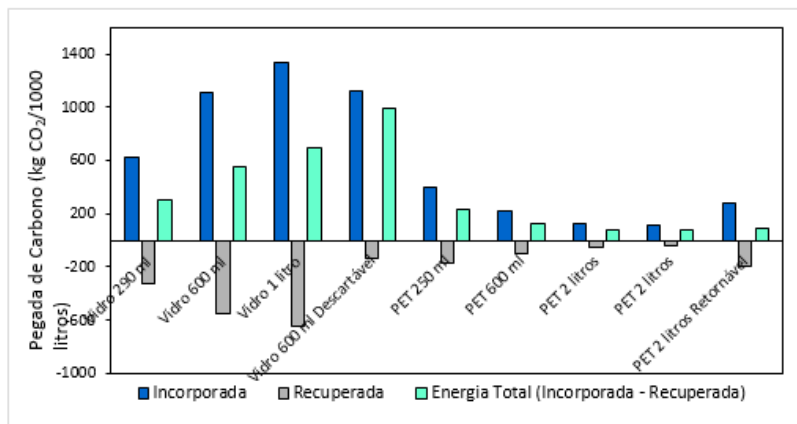


Figura 33: Pegada de Carbono (kg de CO₂ / 1000 litros de refrigerante).

Avaliando os valores obtidos têm-se o melhor resultado, dentre os recipientes reutilizáveis de vidro, para as tradicionais garrafas de 290 ml, as quais possuem um valor de emissão de CO₂ de 302 kg/1000 litros, representando 54,1% da energia total incorporada pelos recipientes de 600 ml e 43,4% da energia total incorporada pelos recipientes de um litro.

Comparando os recipientes de 600 ml, enquanto o descartável apresenta uma produção de 989 kg/1000 litros, o reutilizável produz 558 kg/1000 litros, resultando na diminuição do CO₂ gerado em 43,6 %, ou seja, 431 kg/1000 litros de refrigerante durante todo o ciclo de vida.

Avaliando os valores obtidos com as garrafas PET têm-se o melhor resultado, dentre todos os recipientes, para as garrafas de 2 litros, as quais possuem um valor médio de emissão de CO₂ de 73 kg/1000 litros, representando apenas 31,7 % do CO₂ gerado pelos recipientes de 250 ml e 57,4 % do CO₂ emitido pelos recipientes de 600 ml.

Comparando os recipientes de dois litros, enquanto o descartável apresenta uma emissão média de 73,0 kg/1000 litros, o reutilizável emite 95 kg/1000 litros, resultando no aumento da emissão de CO₂ em 30,1 % ou 22 kg / 1000 litros de refrigerante durante todo o ciclo de vida. Cabe ainda lembrar que o CES-Selector não permite especificar quantas vezes o recipiente retornará ao envase, o que pode, também neste caso alterar o valor resultante do recipiente de 2 litros retornável.

3.3.3. Considerações Finais

Os resultados apresentados são válidos para as definições e parâmetros relativos ao escopo de trabalho definido, ao EcoAudit e a mesma quantidade de refrigerante envasado (1000 litros). A mudança de parâmetros, tais como a distância percorrida e o consumo de energia nos pontos de distribuição e venda darão origem a valores diferentes dos encontrados.

Valores mais precisos, relacionados com o número de vezes que o recipiente é reutilizado e com o consumo de água para a lavagem dos recipientes retornáveis, poderão alterar a diferença entre os valores de pegada de carbono e energia incorporada nessas garrafas, o que sugere um estudo complementar.

Os resultados referentes à energia incorporada e à pegada de carbono estão diretamente relacionados à quantidade de material presente em cada recipiente. Entretanto, as tendências são opostas, enquanto nos recipientes de vidro a energia incorporada e a quantidade de CO₂ gerada para 1000 litros de refrigerante envasado aumentam na medida em que o volume individual da garrafa aumenta, nos recipientes PET a energia

incorporada e a emissão de CO₂ para 1000 litros de refrigerante envasado diminui, à medida que o volume individual da garrafa aumenta.

A escolha de 1000 litros de refrigerante transportados como base de cálculo, deve-se ao fato do recipiente ser um acessório necessário para o envase e transporte, porém, indesejado, uma vez que possui energia incorporada, pegada de carbono e precisa de uma destinação final. Quanto ao refrigerante, é o produto desejado que terá que absorver o impacto ambiental do recipiente.

Finalmente, é possível afirmar que variáveis tais como o volume do recipiente, a distância transportada e o local de consumo podem influenciar na escolha do recipiente mais adequado. Assim sendo, faz-se necessário um estudo mais detalhado de cada situação, para se definir qual a escolha ambientalmente mais correta entre os dois tipos de recipientes, de vidro e de PET. Uma opção que deve ser analisada com maior profundidade é a garrafa de PET retornável, que mostrou maiores potencialidades de vir a ser a melhor solução.

3.4. Energia Incorporada e Pegada de Carbono no Projeto Conceitual de Usinas Solares Fotovoltaicas e Eólicas em uma Planta de 1,5 MW⁴

O objetivo deste trabalho é avaliar comparativamente o impacto ambiental de usinas solares fotovoltaicas e eólicas. O processo de seleção de materiais, foi realizado nas etapas iniciais do projeto preliminar, mais especificamente no projeto conceitual. A avaliação foi feita utilizando duas métricas diferentes, energia incorporada e pegada de carbono. Cinco configurações diferentes de usina eólica e um conjunto de painéis fotovoltaicos foram avaliados. Nas usinas eólicas foram consideradas diferentes tipologias, variando o gerador, o material e a altura da coluna e o modelo da torre.

Na configuração das torres, foram considerados os seguintes parâmetros: material das colunas (concreto ou aço), altura (80, 100, 120 ou 150 m) e potência do gerador (1,5, 2,5 ou 3,0 MW). Os painéis fotovoltaicos produzem 255 W cada, sendo construídos com placas de silício monocristalino, que juntos, em uma estação de energia fotovoltaica, podem fornecer até 1,5 MW. O trabalho está dividido em

⁴ Artigo submetido para publicação

duas diferentes etapas, na primeira, foram comparadas três diferentes configurações de usina eólica, e na segunda uma usina fotovoltaica foi comparada a uma usina de energia eólica.

Os materiais selecionados para avaliação da energia incorporada e da pegada de carbono, seguiram dois critérios: os materiais com maior participação percentual de massa e os materiais de maior valor de energia incorporada e pegada de carbono. A distância percorrida pela matéria-prima e componentes utilizados nas torres eólicas e nos painéis fotovoltaicos considera como destino final a cidade de Viana do Castelo (norte de Portugal), região tradicional na produção de componentes para torres eólicas e na instalação de geradores eólicos.

3.4.1. Metodologia

No mundo acadêmico, conceitos como, Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e Projeto para o Meio Ambiente (PMA) ou *EcoDesign* têm promovido discussões e mudanças nas metodologias de design, que tradicionalmente não contêm, de forma clara, requisitos ambientais e de sustentabilidade.

Diante da necessidade mundial de preservação do meio ambiente, foram desenvolvidas metodologias de projeto que efetivamente levam em conta os requisitos ambientais, dentre elas têm-se o *EcoDesign* (Europa) ou o PMA (Estados Unidos) e a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Em todas essas metodologias, a seleção de materiais tem papel relevante no desenvolvimento de produtos com menor carga ambiental.

Trabalhando em um conceito simplificado de ACV, o software CES-Selector oferece a ferramenta EcoAudit para avaliação do impacto ambiental, a qual trabalha com dois indicadores, energia incorporada e pegada de carbono. Este software identifica quais produtos e processos terão a menor carga ambiental ao longo do ciclo de vida, do berço ao túmulo, através das fases de seleção, fabricação, transporte, uso e descarte de materiais. O resultado é mostrado através de gráficos e relatórios (GRANTA DESIGN, 2018).

As unidades utilizadas são KWh/KWh e gCO₂/ KWh, respectivamente, para a energia incorporada e a pegada de carbono.

O projeto selecionado consiste em comparar a energia incorporada e a pegada de carbono por KWh, em geradores de energia

eólica necessários para produzir entre 1,5 MW e 3,0 MW de potência, montados em colunas de 80, 100, 120 e 150 m com uma central fotovoltaica de 1,5 MW.

Para os geradores de energia eólica, foram incluídas três opções viáveis de construção da torre de sustentação do gerador: coluna de aço, treliça de aço e coluna de concreto. Os geradores são movidos por um conjunto de três pás, as quais são fabricadas em fibra de vidro e resina epóxi. A torre em treliça de aço é galvanizada, a coluna de concreto não é pintada e a coluna de aço é pintada com tinta epóxi.

A central fotovoltaica é composta de um conjunto de painéis fotovoltaicos com potência unitária de 255 W. O painel fotovoltaico possui um quadro composto de sessenta células monocristalinas encapsuladas com filmes de EVA (*Ethylene Vinyl Acetate*) e protegidas em sua parte anterior por um vidro temperado e na parte posterior por uma chapa de alumínio. O conjunto é fechado com perfis de alumínio e montados em solo sobre uma estrutura de aço galvanizado.

3.4.2. Resultados e Discussão

Foram avaliados todos os principais componentes do painel solar e sua estrutura de suporte em aço galvanizado. Os valores apresentados, de energia incorporada (EI) e pegada de carbono (PC), dos principais materiais utilizados nas torres de energia eólica, tais como: concreto, aço, fibra de vidro, resina epóxi, tinta epóxi e cobre são referentes aos valores médios do CES-Selector EcoAudit 2017, sendo descritos na Tabela 16.

Tabela 16: Valores médios da EI e PC para os principais materiais utilizados nos geradores eólicos e na central solar

	Material	EI (MJ/kg)	PC (kgCO₂/kg)
Material Comum	Aço galvanizado	40,05	3,02
	Aço CA – 50	32,35	2,38
Gerador Eólico	Concreto – Portland comum	2,80	0,44
	Fibra de vidro “ <i>type E</i> ”	51,80	3,00
	Resina epóxi “ <i>glass filler</i> ”	127,00	6,80
	Tinta epóxi “ <i>flexibilized</i> ”	132,50	6,44
	Cobre 12500 “ <i>soft</i> ”	59,00	3,62
Central Solar	Célula de silício monocristalino	1750,00	131,25
	Etileno Vinil Acetato – EVA 9000	82,70	2,11
	Alumínio 6063 T5 / Alumínio 5005	199,50	13,15
	Glass	10,60	0,758

Analisando-se a Tabela 16, o primeiro fato que chama a atenção é o altíssimo valor da EI e PC da célula de silício monocristalino e o baixo valor das mesmas no concreto, em relação aos demais materiais presentes na tabela. Esses valores serão determinantes no resultado comparativo da energia incorporada e da pegada de carbono do gerador eólico e da central solar.

Por exemplo, tendo como foco somente os materiais do gerador eólico e a célula de silício monocristalino como base de cálculo, a energia incorporada do concreto representa apenas 0,16% da energia incorporada da célula de silício monocristalino, ou seja, 1 kg da célula de silício monocristalino tem a mesma energia incorporada que 625 kg de concreto.

Considerando o aço galvanizado, ele representa somente 2,29% da energia incorporada da célula de silício monocristalino, ou seja, 1 kg da célula de silício monocristalino tem a mesma energia incorporada do que 43,7 kg de aço galvanizado. Seguindo a mesma linha, a fibra de vidro tem 2,96%, o cobre tem 3,37%, a resina epóxi 7,26% e a tinta epóxi 7,57% da energia incorporada da célula de silício monocristalino.

Ao analisarmos os valores da central solar, o vidro tem o menor valor de energia incorporada (10,60 MJ/kg), representando 0,61% da célula de silício monocristalino, ou seja, 1 kg de célula de silício monocristalino tem a mesma energia incorporada que 165 kg de vidro. Considerando os outros materiais, a EVA tem 4,73% e o alumínio tem 11,4% da energia incorporada da célula de silício monocristalino.

3.4.2.1. Principais Materiais Utilizados nas Torres de Geração Eólica

Os dados mais relevantes para o cálculo da energia incorporada (EI) e da pegada de carbono (PC) das torres de energia eólica, utilizados para o presente trabalho, foram retirados de Oebels (OEBELS e PACCA, 2013), o qual indica a quantidade de aço, concreto, tinta epóxi, fibra de vidro e outros materiais utilizados na construção de torres de aço tipo coluna, torres de aço treliçada e torres de concreto tipo coluna. Os trabalhos de Rocha (ROCHA, 2016) e Henriques (HENRIQUES, 2012) forneceram informações referentes às quantidades de aço e concreto utilizados nas torres de energia eólica.

Considerando a massa total de uma torre de 80 m com um gerador de 1,5 MW, Oebels (OEBELS e PACCA, 2013) constatou que o somatório dos percentuais de aço mais concreto, para essa torre com coluna de aço, alcança 96,79% da massa total da torre. Para o caso da torre com coluna de concreto, o somatório de aço e concreto utilizados atinge 97,99% da massa total da torre, conforme mostrado nas Figuras 34 e 35.

Com estes elevados percentuais de aço e concreto na construção das torres eólicas, seria conveniente supor a utilização de apenas esses dois materiais para o cálculo da energia incorporada e da pegada de carbono. Entretanto, optou-se por não restringir a análise da EI e da PC apenas a esses dois elementos de maior massa. Essa opção deve-se ao fato de que, apesar das quantidades de concreto e aço serem muito maiores do

que os demais componentes, seus valores de energia incorporada e pegada de carbono são bem menores do que os constatados para os principais materiais complementares, conforme apresentado na Tabela 17.

A Tabela 17 apresenta os quantitativos utilizados de fibra de vidro, resina epóxi, tinta epóxi e cobre nas torres de 80, 100, 120 e 150 m. Foram feitas as seguintes considerações:

- As torres com colunas de concreto e de treliça não são pintadas;
- Os valores das torres de 80 m construídas de aço ou concreto, apresentadas no trabalho de (OEBELS e PACCA, 2013), serviram de referência para calcular os quantitativos de fibra de vidro, resina epóxi, tinta epóxi e cobre utilizados nas torres de 100 m, 120 m e 150 m, mantendo a proporcionalidade.

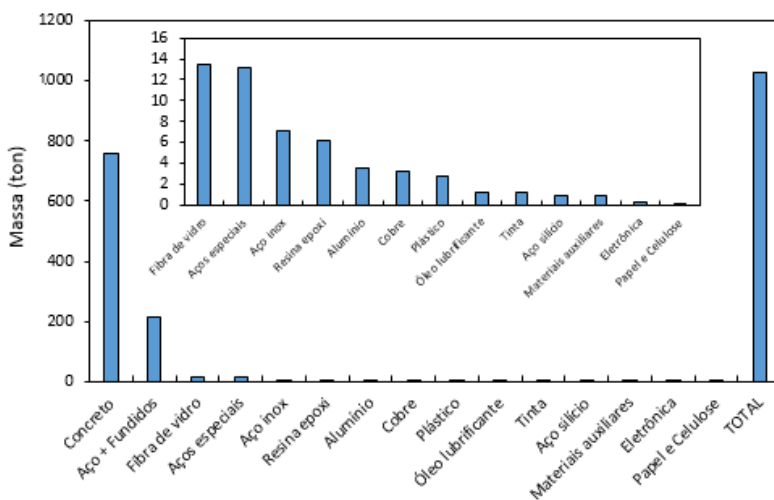


Figura 34: Massa de aço e concreto utilizados nas torres de coluna de aço (adaptado de (OEBELS e PACCA, 2013)).

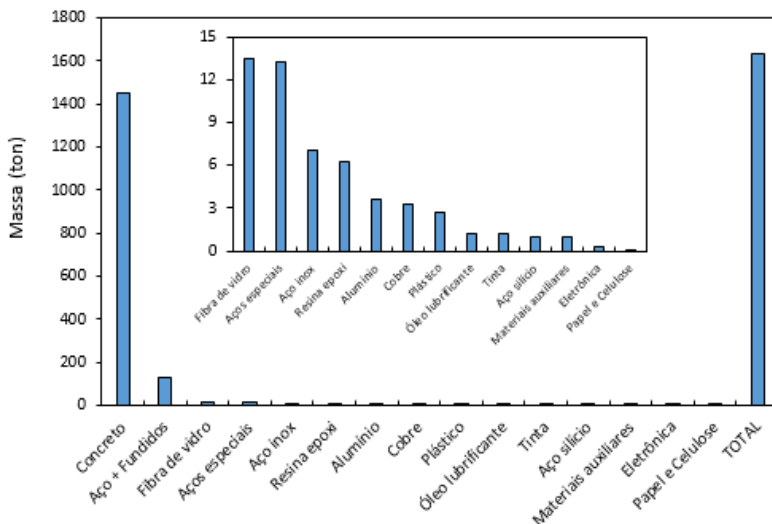


Figura 35: Massa de aço e concreto utilizados nas torres de coluna de concreto. Adaptado (OEBELS e PACCA, 2013).

Tabela 17: Principais materiais complementares utilizados nos geradores de energia eólica.

Material	Torre 80 m (kg)	Torre 100 m (kg)	Torre 120 m (kg)	Torre 150 m (kg)
Fibra de vidro	11860	14820	17790	22240
Resina epóxi	6190	7740	9285	11610
Tinta epóxi	1030	1290	1545	1930
Cobre	1180	1475	1770	2210

Como esperado, a quantidade de material aumenta proporcionalmente com o comprimento das pás e a massa de fibra de vidro é a mais representativa na produção das pás eólicas.

A Tabela 18 apresenta a quantidade de concreto e aço utilizados na construção de torres de coluna de aço segundo os trabalhos de Oebels e Pacca (OEBELS e PACCA, 2013), com uma torre de 80 m e um gerador de 1,5 MW, Rocha (ROCHA, 2016) com torres de 80, 100 e 120 m e

geradores de 3,0 MW e Henriques (HENRIQUES, 2012) com uma torre de 150 m e gerador de 2,5 MW. Os resultados apresentados mostram que ao comparar as torres de 80 m, a estrutura de Oebels (OEBELS e PACCA, 2013) é mais leve, tanto em aço (34,7%) como em concreto (47,9%) do que a estrutura de Rocha (ROCHA, 2016). Isso pode ser explicado pelo fato da turbina utilizada por Oebels e Pacca (OEBELS e PACCA, 2013) ter 50% da potência da turbina utilizada por Rocha (ROCHA, 2016), com menor torque e massa.

Tabela 18: Quantidade de aço e concreto na Torre Coluna de Aço. A quantidade de concreto está relacionada somente à fundação da Torre Coluna de Aço.

Autor	Altura da Torre (m)	Aço Coluna (t)	Aço Fundação (t)	Aço Outros (t)	Aço Total (t)	Concreto (t)
Oebels (1,5 MW)	80	155	22,5	15,5	193	757
Rocha (3,0 MW)	80	183,6	53,1	59	295,7	1454
	100	330,6	62,9	74	467,5	1697
	120	685,7	82,5	89	857,2	2210
Henriques (2,5 MW)	150	610	111	61	782,0	3070

A Tabela 19 apresenta as quantidades de concreto e aço utilizados na construção de torres de coluna treliçada de aço, comparadas às quantidades utilizadas nas torres com coluna de aço, segundo os trabalhos de Henriques (HENRIQUES, 2012), que consideram uma torre de 150 m e gerador de 2,5 MW. Os resultados apresentados mostram que ao comparar as torres de 150 m construídas com colunas de aço e as mesmas construídas em treliças de aço, estas últimas mostraram-se mais leves do que as colunas de aço, com 46% a menos de aço e 67,7% a menos de concreto.

Tabela 19: Concreto e aço, uma comparação entre a coluna de chapa de aço e a de treliça de aço, para uma torre de 150 m.

Referência	Aço Coluna [t]	Aço Treliça [t]	Aço Fundação [t]	Aço (outro) [t]	Aço (Total) [t]	Concreto [t]
Henriques	-----	350,4	36	35	421,4	992
(2,5 MW)	610	-----	111	61	782,0	3070

A Tabela 20 apresenta a quantidade de concreto e aço utilizados na construção de torres de coluna de concreto segundo os trabalhos de Oebels e Pacca (OEBELS e PACCA, 2013), com uma torre de 80 m e um gerador de 1,5 MW e Rocha (ROCHA, 2016) com torres de 80 m, 100 m e 120 m e geradores de 3,0 MW. Os resultados apresentados mostram que ao comparar as torres de 80 m, a estrutura de Oebels e Pacca utiliza menos concreto (2,1%), no entanto, mais aço (10,0%) do que a estrutura de Rocha (ROCHA, 2016). Isso ocorre pelo fato da torre de concreto de Oebels e Pacca possuir um painel de aço em sua parte final superior.

Tabela 20: Aço e concreto para Torre Coluna de Concreto.

Autor	Altura da Torre (m)	Aço Coluna (t)	Aço Fundação (t)	Aço Total (t)	Concreto Coluna (t)	Concreto Fundação (t)	Concreto Total (t)
Oebels 1,5 MW	80	67,0	33,5	100,5	697,5	756,6	1454,1
	80	52,2	38,5	90,4	734,4	1102	1836,4
Rocha 3,0 MW	100	74,0	47,0	121	1096,8	1493	2589,8
	120	88,9	72,8	161,7	1459,0	1858	3317

3.4.2.2. Dimensionamento da Central Solar

Os dados utilizados para o presente trabalho foram retirados do projeto de uma central fotovoltaica desenvolvida em dois trabalhos distintos, Granja (GRANJA, 2017) e Lopes (LOPES, 2013). Para efeito de comparação com os geradores eólicos descritos por Oebels e Pacca (OEBELS e PACCA, 2013), optou-se por definir uma potência instalada de 1,5 MW. Os materiais incluídos na avaliação da energia incorporada e da pegada de carbono foram: silício, aço, alumínio, vidro e EVA.

A Tabela 21 mostra características técnicas do painel fotovoltaico e dos respectivos inversores utilizados nesse projeto da central solar.

Tabela 21: Especificações técnicas do painel fotovoltaico e do inversor.

	Parâmetros elétricos	Símbolo	Unidade	Valor
Painel fotovoltaico	Potência nominal	P_n	W_p	255
	Tolerância de potência	ΔP	W	+ 5
	Eficiência	η	%	15,7
Inversor	Potência máxima AC de saída	P_{out}	kW	33
	Potência máxima DC de entrada	P_{in}	kW	34-45
	Eficiência máxima	η	%	98,5

A quantidade de painéis fotovoltaicos necessária para produzir 1,5 MW de potência pode ser definida pela relação direta entre a potência da central fotovoltaica (P_{cv}) e a potência nominal do painel (P_n), resultando em um valor inicial de 5882 painéis fotovoltaicos. Entretanto, essa quantidade de painéis não é definitiva, devendo ser ajustada de acordo com as especificações técnicas do inversor a ser utilizado. Considerando que a potência máxima de saída do inversor selecionado é de 33 kW, a quantidade de painéis fotovoltaicos que pode ser conectada a um inversor é definida pela relação direta entre a potência máxima de

saída (P_{out}) do inversor e a potência nominal do painel fotovoltaico (P_n), sendo o valor resultante de 129 painéis.

Como a central fotovoltaica terá *strings* duplos, ou seja, duas linhas de coletores solares sobrepostos, o número de painéis por inversor deverá ser par e múltiplo de seis, pois são seis linhas por inversor, como se ilustra na Figura 36. Dessa forma, otimizando e ajustando o valor de N_{minv} , serão 126 painéis por inversor. Assim, a quantidade de inversores pode ser calculada pela razão entre a quantidade total de painéis (N_m) dividida pelo número de painéis por inversor (N_{minv}), sendo o valor resultante de 47 inversores.

Ajustando a quantidade de painéis fotovoltaicos para 47 inversores com 126 painéis por inversor tem-se um total final de 5922 painéis fotovoltaicos, que podem gerar uma potência gerada de 1,510 MW. A Figura 36 apresenta o layout de ligação das *strings* aos inversores. Cada inversor funciona com três linhas de dois *strings* de 21 painéis fotovoltaicos cada, o que totaliza 126 painéis por inversor.

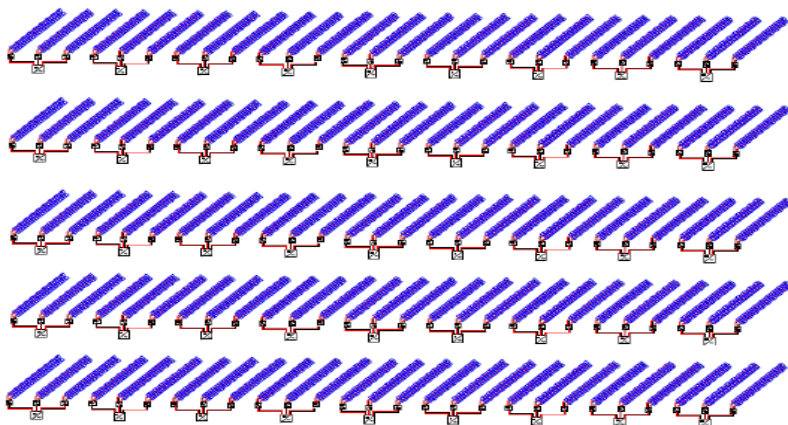


Figura 36: Layout de instalação dos painéis solares e seus respectivos inversores.

Como a instalação será feita em Portugal, no hemisfério Norte e terá estrutura fixa, a inclinação ótima dos painéis solares para a cidade de Viana do Castelo é de $\alpha = 38^\circ$, voltados para o Sul (SOCIEDADE PORTUGUESA DE ENERGIA SOLAR, 2012). A distância “d” (Figura

37) que se deve manter entre as linhas de painéis, de modo a minimizar o sombreamento dos mesmos é de 6,91 m.

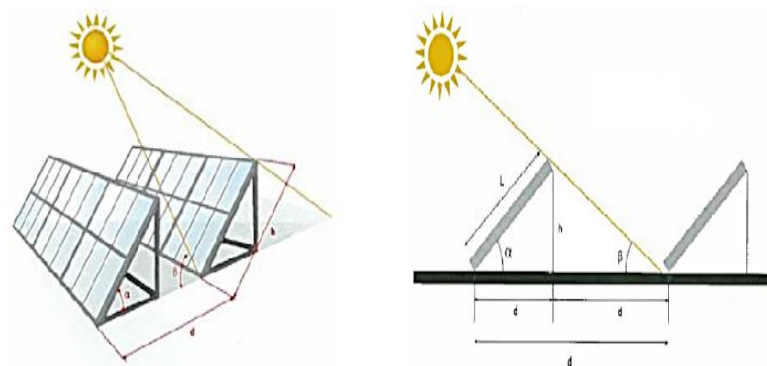


Figura 37: Esquema da distância entre painéis (adaptado de (LOPES, 2013)).

3.4.2.3. Principais Materiais Utilizados na Central de Energia Solar Fotovoltaica

A estrutura de fixação dos painéis é feita com perfil U ($100 \times 50 \times 3,04$ mm) de aço galvanizado, o qual será considerado no cálculo desse material. Os demais acessórios utilizados para a fixação dos painéis fotovoltaicos não serão considerados de forma individualizada nesse cálculo. Para compensar essa imprecisão, foi acrescentado 5% sobre o montante do aço estrutural considerado.

Para o perfil vertical foi escolhido o perfil U ($100 \times 50 \times 3,04$ mm) com massa de 4,48 kg/m, enquanto para o perfil de suporte dos painéis foi escolhido o perfil retangular [] ($50 \times 30 \times 4,75$ mm) com uma massa de 3,54 kg/m. Tanto os perfis U como os perfis [] foram galvanizados a quente. A quantidade de aço utilizada para suportar os painéis da central fotovoltaica encontra-se definida na Tabela 22.

Tabela 22: Quantidade de aço utilizado na estrutura de suporte dos painéis fotovoltaicos.

	Perfil de aço (mm)	Massa (kg/m)	Comprimento por linha de painéis (m)	Comprimento total (m)	Massa total (kg)
Estrutura Vertical	U (100 × 50 × 3,04)	4,48	27,0	135	604,8
Suporte dos painéis	□ (50 × 30 × 4,75)	3,54	20,7	103	364,6
Massa parcial total					969,4
Massa total (acrescentado 5%)					1018

Os painéis fotovoltaicos são fabricados de forma a garantir a proteção das células fotovoltaicas e o melhor aproveitamento da irradiação solar. Para isso, os painéis são montados conforme apresentado na Figura 38. O painel possui área de $1,627 \text{ m}^2$ ($1,640 \times 0,992 \text{ m}^2$) e as células fotovoltaicas área de $1,46 \text{ m}^2$, possuindo 60 (6×10) células de $156 \times 156 \text{ mm}$. Os principais materiais utilizados para construir os painéis de energia fotovoltaica, mostrados na Tabela 23, são: alumínio, vidro, EVA (Etileno Vinil Acetato) e silício, este último com os valores do silício cristalino para uma única célula fotovoltaica. A Figura 39 apresenta o respectivo gráfico de barras dos materiais descritos na Tabela 23.

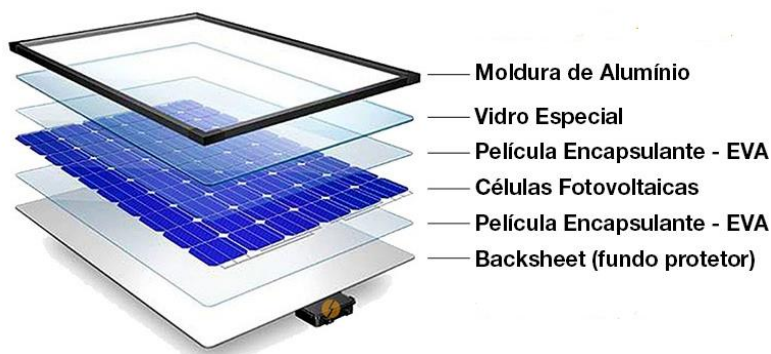


Figura 38: Painel fotovoltaico e suas partes (Adaptado de (FERNANDES, 2016)).

Tabela 23: Quantidade de material utilizado nos painéis fotovoltaicos.

Componente	Material	Área do painel (m²)	Comprimento linear (m)	Espessura (mm)	Massa por painel (kg)	Massa total (kg)
Moldura	Alumínio 6063 T5	-----	5,264	-----	5,648	33549
Etileno Vinil Acetato EVA	EVA 9000	3,254	-----	0,5	1,545	9177
Fundo protetor	Alumínio 5005	1,627	-----	1,2	5,271	31309
Vidro temperado	Vidro antirreflexo	1,627	-----	3,2	13,02	77339
Célula fotovoltaica	Silício monocristalino	1,460	-----	0,3	0,964	5726

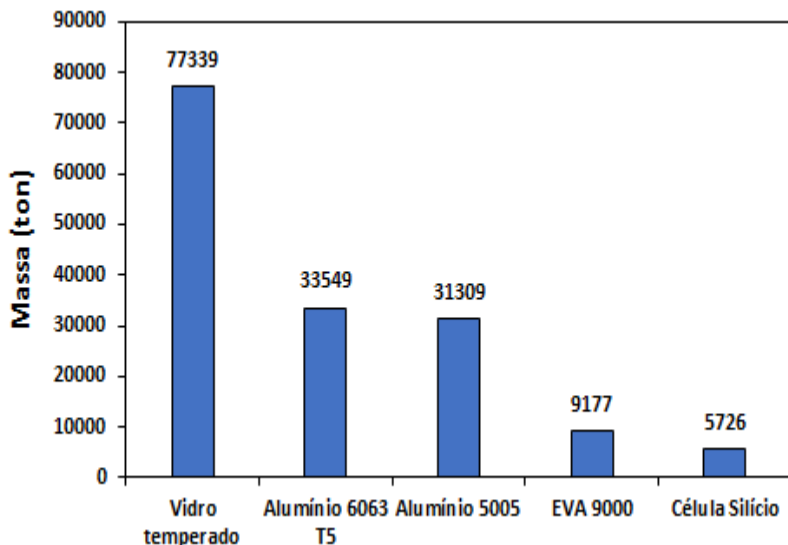


Figura 39: Massa dos painéis da central fotovoltaica.

3.4.2.4. Distâncias Percorridas

A Tabela 24 apresenta as distâncias aproximadas percorridas pelos principais materiais utilizados na fabricação dos painéis solares e dos geradores eólicos. Os fornecedores foram selecionados pelas suas possibilidades de fornecimento de material para Portugal e não pela sua real situação de fornecimento, pois, os compradores não adquirem seus produtos sempre do mesmo fornecedor. O destino final considerado foi a cidade de Viana do Castelo, a qual tem tradição nos sistemas de produção de energia renovável e no desenvolvimento de dispositivos de gestão de energia.

Tabela 24: Distâncias de possíveis fornecedores de matéria prima e componentes.

Material	Procedência	Distância aproximada (km)	Meio de transporte
Aço	Alemanha - Duisburg	2200	Terrestre
Cimento	Portugal – Loulé	610	Terrestre
Brita e areia	Portugal – Braga	65	Terrestre
Silício monocristalino	China – Tianjin	14000	Marítimo
Alumínio	Brasil – Marabá	550 + 7800	Terrestre + Marítimo
Vidro	Portugal – Valença	65	Terrestre
EVA	França – Saint Paul	1700	Terrestre
Fibra de vidro	UK	2000	Terrestre
Resina / Tinta	França – Meneey	1600	Terrestre
Cobre	Suécia - Aitik	1600	Marítimo + Terrestre

3.4.2.5. Cálculo da Energia Incorporada e Pegada de Carbono

Para o cálculo da energia incorporada e da pegada de carbono, foram feitas as seguintes considerações:

- O local de instalação deste projeto é a cidade de Viana do Castelo (41°41'24" N e 8°49'16" W), norte de Portugal;
- Não foi considerado o cabeamento necessário para a transmissão da energia elétrica a partir do ponto de geração, até o local de ligação à rede elétrica, para ficar em conformidade com o gerador de energia eólica;

- Não foi definido o local específico de instalação da central fotovoltaica, somente a cidade, que é Viana do Castelo – Portugal;
- Não foi definido o local do posto de transformação (subestação);
- Não foram realizados cálculos elétricos, tais como tensão de curto circuito, corrente, circuito de proteção, perda de energia e outros cálculos relacionados;
- Não foram dimensionadas as linhas aéreas e subterrâneas, fundações, apoios e outros elementos estruturais e complementares do sistema de transmissão de energia.

Como parte do projeto conceitual e preliminar, o cálculo da energia incorporada e da pegada de carbono pode ser efetuado conhecendo-se as massas dos principais materiais constituintes de um produto, seu processo de fabricação, a distância percorrida desde o país de origem da matéria prima, seu uso e destinação final. Em particular, para este estudo, não foi considerado o uso da energia em si, considerou-se assim que o destino final da energia produzida seria o mesmo que o dado à energia distribuída pela rede elétrica nacional.

Outro fator importante é a perspectiva de vida do produto. Para o gerador eólico considerou-se uma vida útil de 20 anos (ARVESEN e HERTWICH, 2012) e para o painel solar uma expectativa de vida de 25 anos (IEA, 2010). Para o gerador eólico foram consideradas 3000 horas de geração de energia por ano (34,25%) e para o painel solar 2500 horas de geração de energia por ano (28,54 %) de um total possível de 8760 horas / ano.

A Tabela 25 mostra os valores de energia incorporada e pegada de carbono para os geradores de 1,5 MW, 2,5 MW e 3,0 MW instalados sobre torres de 80, 100, 120 e 150 m construídas em colunas de aço, colunas de concreto e treliçada. Mostra, também, os valores de EI e PC para a central fotovoltaica de 1,5 MW. Estão incluídos no cálculo os principais materiais, aço e concreto e os complementares, fibra de vidro, resina epóxi, tinta epóxi e cobre. As distâncias mostradas na Tabela 24 também estão inseridas no cálculo. As Figuras 40 e 41 são gráficos relativos aos dados descritos na Tabela 25.

Tabela 2.5: Energia Incorporada [EI – kWh/kWh] e Pegada de Carbono [PC – gCO₂/kWh] dos principais materiais utilizados nos geradores eólicos e na planta fotovoltaica.

Autor	Torre (m)	Coluna chapa de aço		Coluna de concreto		Coluna treliçada de aço		Central fotovoltaica	
		EI	PC	EI	PC	EI	PC	EI	PC
Oebels 1,5 MW	80	0,0252	6,96	0,0273	7,90	-----	-----	-----	-----
	80	0,0199	5,63	0,0165	4,88	-----	-----	-----	-----
Rocha 3,0 MW	100	0,0261	7,17	0,0219	6,43	-----	-----	-----	-----
	120	0,0391	10,95	0,0274	8,09	-----	-----	-----	-----
Henriques 2,5 MW	150	0,0480	14,69	-----	-----	0,0257	6,97	-----	-----
Autor 1,5 MW	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,0637	16,10

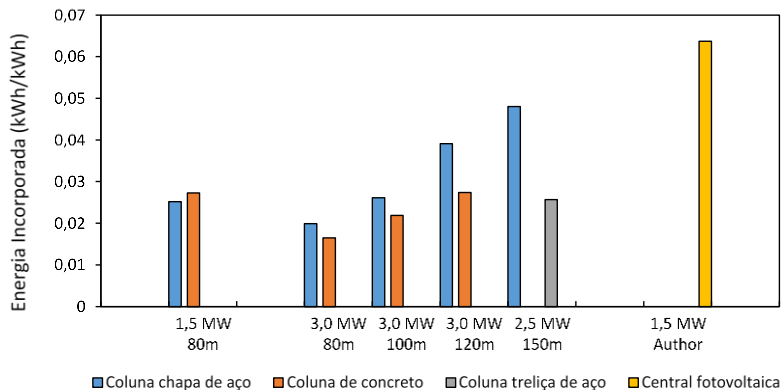


Figura 40: Energia Incorporada (EI – kWh/kWh) dos principais materiais utilizados nos geradores eólicos e na planta solar fotovoltaica.

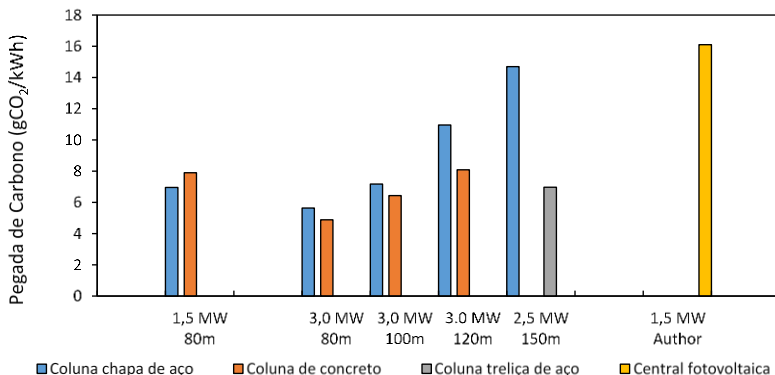


Figura 41: Pegada de Carbono (PC – gCO₂/kWh) dos principais materiais utilizados nos geradores eólicos e na planta solar fotovoltaica.

A Tabela 26 mostra os valores de energia incorporada e pegada de carbono para a mesma configuração descrita para a Tabela 25, porém, nesse caso estão incluídos apenas os valores referentes ao aço e ao concreto. As Figuras 42 e 43 são gráficos representativos dos dados descritos na Tabela 26.

Comparando os valores apresentados nas Tabelas 25 e 26 é possível verificar que houve um aumento substancial da EI e PC gerados pelas torres da Tabela 25, onde são considerados, além do aço e do

concreto, os materiais complementares para a fabricação das pás (fibra de vidro, resina epóxi e tinta epóxi), transmissão de energia (cobre) e acabamento das torres (tinta epóxi).

Tabela 26: Energia Incorporada (EI – kWh/kWh) e Pegada de Carbono (PC – gCO₂/kWh) do aço e concreto utilizados nos geradores eólicos e na planta fotovoltaica.

Autor	Torre (m)	Coluna chapa de aço		Coluna de concreto		Coluna treliçada de aço		Central fotovoltaica	
		EI	PC	EI	PC	EI	PC	EI	PC
Oebels 1,5 MW	80	0,0145	4,43	0,0153	6,15	-----	-----	-----	-----
	80	0,0126	3,79	0,0091	2,96	-----	-----	-----	-----
Rocha 3,0 MW	100	0,0171	6,78	0,0123	4,12	-----	-----	-----	-----
	120	0,0281	8,33	0,0159	5,22	-----	-----	-----	-----
Henriques 2,5 MW	150	0,0354	10,79	-----	-----	0,0258	6,80	-----	-----
Autor 1,5 MW	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,0637	16,10

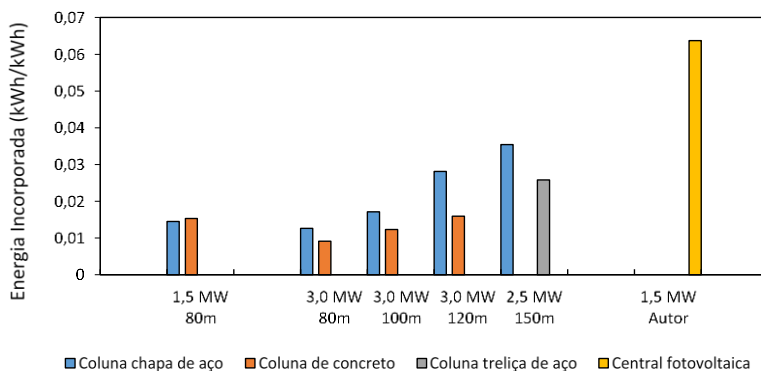


Figura 42: Energia Incorporada (EI – kWh/kWh) do aço e concreto utilizados nos geradores eólicos e na planta fotovoltaica.

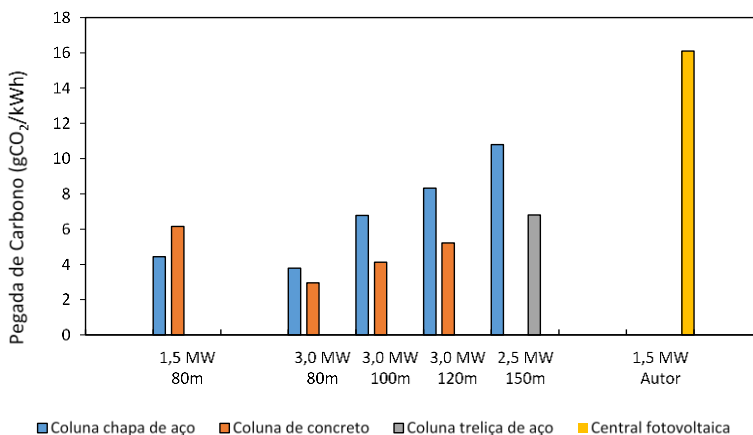


Figura 43: Pegada de Carbono (PC – gCO₂/kWh) do aço e concreto utilizados nos geradores eólicos e na planta fotovoltaica.

Na torre de 80 m construída para o gerador de 1,5 MW, ocorreram as seguintes alterações nos valores da energia incorporada e da pegada de carbono, após a adição dos materiais complementares:

- Na torre com coluna de aço, o concreto e o aço representam 40,1% (0,0145 – 0,0242 kWh/kWh) da energia incorporada e 33,6% (4,43 – 6,67 gCO₂/kWh) da pegada de carbono.

- Na torre com coluna de concreto, o concreto e o aço representam 43,9% (0,0153 – 0,0273 kWh/kWh) da energia incorporada e 22,2% (6,15 – 7,90 gCO₂/kWh) da pegada de carbono.

3.4.3. Considerações Finais

Com o objetivo de escolher qual o sistema de geração de energia possui a menor energia incorporada e pegada de carbono dentre os geradores eólicos e as centrais fotovoltaicas, foi possível constatar que a central fotovoltaica possui o maior valor dentre os sistemas avaliados, com uma EI de 0,0637 kWh/kWh e uma PC de 16,10 g CO₂/kWh, conforme demonstrado nas Tabela 25 e 26.

Quanto às torres de energia eólica o resultado mostrou-se favorável às torres de concreto, que conseguiram o melhor resultado de EI e PC. A torre de 3.0 MW com coluna de concreto de 80 m possui uma EI de 0,0156 kWh/kWh (24,49 % da central solar) e uma PC de 4,56 g CO₂/kWh (28,32% da central solar). Essa vantagem das torres de concreto se repete para as outras colunas, por exemplo para as colunas de 120 m a EI e a PC para a coluna de concreto são de 0,0274 kWh/kWh (43,01% da central solar) e 8,09 g CO₂/kWh (50,25% da central solar), enquanto que para a coluna de aço os valores de EI e PC são de 0,0391 kWh/kWh (61,38% da central solar) e 10,95 g CO₂/kWh (68,01% da central solar).

Outro ponto importante foi constatar que o cálculo da energia incorporada e pegada de carbono de geradores eólicos não pode ser reduzido aos dois materiais de maior massa, aço e concreto, pois os materiais utilizados na fabricação das pás e pintura das torres aumentam de forma substancial o valor da EI e PC. Para a torre de sustentação do gerador de 3,0 MW com 80 metros de altura sua energia incorporada aumenta de 0,0091 kWh/kWh para 0,0156 kWh/kWh, ou seja, 71,42%.

Situações semelhantes poderão ocorrer toda vez que os materiais de maior massa tiverem baixa energia incorporada e pegada de carbono e os materiais de menor massa possuírem alta energia incorporada e pegada de carbono.

3.5. Energia Incorporada e Pegada de Carbono no Projeto Conceitual de uma Pá para Geradores Eólicos⁵

O objetivo deste trabalho é avaliar o impacto ambiental que terá uma pá de 63 m para geradores eólicos, utilizando como métricas a energia incorporada e a pegada de carbono. Esse processo de avaliação dos possíveis materiais a serem utilizados na fabricação da pá foi realizado nas etapas iniciais de projeto.

3.5.1. Metodologia

Em respeito às normas de sigilo industrial da empresa, este documento não pode identificar o nome da empresa e de seu contato, bem como a especificação completa dos materiais utilizados na construção da pá eólica (características técnicas, fornecedores, etc.). Assim sendo o nome aqui utilizado é fictício e os materiais estão apenas especificados de forma genérica. Para o desenvolvimento dos trabalhos e cálculo da energia incorporada e da pegada de carbono, foram utilizadas as especificações completas de cada material, aqui não demonstradas. Para facilitar a leitura e a escrita, a empresa terá o nome fictício de ALFA.

O trabalho teve início com uma visita à empresa ALFA, onde foi possível conhecer seu processo de fabricação e controle de qualidade. A empresa ALFA produz pás eólicas de vários tamanhos e, no período de nossa visita, estava em processo de desenvolvimento de um novo modelo de pá eólica, com 63 m de comprimento. Em conversa com o engenheiro responsável pela produção, foi possível entrar em contato com a engenharia de desenvolvimento e ter acesso ao novo projeto, com suas respectivas listas de materiais e protótipo em desenvolvimento. Dessa lista, foram selecionados os materiais mais utilizados na construção da pá eólica.

Em seguida, as especificações dos materiais definidos para projeto foram ajustadas de forma a ficarem compatíveis com os materiais do banco de dados do CES-Selector EcoAudit. De forma paralela foram acrescentadas informações referentes à localização e ao meio de transporte dos fornecedores. Com esses dados bem definidos teve início o trabalho de cálculo e análise do impacto ambiental produzido pela pá eólica de 63 m através das métricas de energia incorporada e da pegada de carbono.

⁵ Artigo submetido para publicação.

3.5.2. Resultados e Conclusões

A Tabela 26 apresenta os dados disponibilizados pela empresa ALFA e completados com os valores de energia incorporada e pegada de carbono fornecidos pelo CES-Selector EcoAudit, possui ainda as seguintes características:

- Por opção da empresa, o produto avaliado contempla tanto os principais materiais utilizados na construção da pá de 63-m, como os utilizados na embalagem;
- Na coluna 2, as especificações do material estão descritas de forma simplificada, a fim de manter o sigilo. Para o cálculo da energia incorporada e da pegada de carbono foram utilizadas especificações completas;
- Na coluna 5 a distância de transporte entre o país de origem da matéria prima e Portugal é aproximada, sendo que o principal meio de transporte utilizado a partir da Alemanha, Lituânia e Polônia é o ferroviário; a partir da China é o marítimo; e a partir de Portugal é o rodoviário;
- Nas colunas 6 e 7, estão os valores da energia incorporada em MJ/kg e da pegada de carbono (kg/kg) para cada material especificado. Esses valores foram retirados do banco de dados do CES-Selector.

A partir da análise dos dados apresentados na Tabela 26 é possível verificar que a massa de apenas dois componentes, fibra de vidro e resina correspondem a 75,09% da massa total da pá eólica. Se considerarmos ainda um terceiro componente, o *mesh*, chega-se ao percentual de 83,02%. Assim sendo, podemos concluir que a massa de apenas três componentes corresponde a 83,02% do material total utilizado na fabricação da pá eólica, que faz com que sejam o principal foco de análise. O resultado da somatória das massas, ou seja, a massa total da pá em análise, mostrado na coluna 2, é de 14910 kg,

A Tabela 27, colunas 6 e 7, mostra a energia incorporada e a pegada de carbono para cada quilograma de material. Aqui é possível perceber que a resina e a cola, possuem os maiores valores de energia incorporada (128,5 MJ/kg) e pegada de carbono (6,59 kg/kg) por quilograma de material e, por terem a mesma base, possuem valores iguais.

Tabela 27: Energia Incorporada (EI), Pegada de Carbono (PC) e origem dos materiais da pá cólica de 63 m

Material	Quantidade (kg)	País de origem	Distância	EI (MJ/kg)	PC kg/kg
Fibra de vidro	7496	Alemanha/China	2200/14000	65,5	3,51
<i>Mate</i> (reforço)	40	Alemanha	2200	65,5	3,51
Resina	3700	Alemanha	2200	128,5	6,59
Cola	600	Alemanha	2200	128,5	6,59
Insertos	174	Alemanha/Port.	2200/300	40,1	3,02
Receptores	55	Alemanha	2200	58,3	3,20
<i>Gel coat</i>	123	Alemanha	2200	92,8	4,93
Massas	32	Alemanha	2200	92,8	4,93
<i>Top Coat</i>	46	Alemanha	2200	102	4,79
Balsa	751	Polónia/Lituânia	3050/3640	12,2	0,604
PVC/PET	75	Polónia/Lituânia	3050/3640	69,4	2,47
<i>Taky Tape</i>	88	Alemanha	2200	94,7	4,45
<i>Glitter Tape</i>	439	Alemanha	2200	121	5,75
Saco vácuo	99	Alemanha	2200	113,8	4,68
<i>Mesh</i>	1183	China	14000	103,8	4,18
<i>Peel Ply</i>	9	China	14000	44,7	1,14
Total	14910				

Consumíveis

Pá

3.5.2.1. Avaliação do Ciclo de Vida da Pá Eólica de 63 m

O CES-Selector EcoAudit apresenta, em seu módulo “relatório”, os vários resultados obtidos com os dados de entrada contemplando a quantidade de material e seu respectivo processo produtivo, o meio de transporte utilizado no deslocamento dos materiais e componentes, seu uso e sua disposição final.

A Tabela 28 traz a energia incorporada e a pegada de carbono da pá eólica de 63 m durante o ciclo de vida, considerado, neste caso, de 25 ano. É possível perceber que a extração e produção dos materiais possui a maior energia incorporada (64,6%) e a maior pegada de carbono (55,9%), seguido pelo transporte, respectivamente de 28,3% e 34,6%.

Devido às características do produto, a manufatura possui equipamentos de baixo consumo de energia, tornando a energia incorporada e a pegada de carbono pouco significativas nesta fase. Como a pá eólica consome uma baixa quantidade de energia durante seu ciclo de vida, praticamente só em suas manutenções, o consumo de energia é muito pequeno, próximo de zero. A grande maioria dos materiais utilizados não permite uma reciclagem economicamente viável, por esse motivo, os valores apresentados são pouco significativos.

Tabela 28: Energia Incorporada (EI) e Pegada de Carbono (PC) da pá eólica de 63 m.

Fases do Ciclo de Vida	EI (GJ)	EI (%)	PC (tCO₂)	PC (%)
Material	1280	64,6	65,1	55,9
Manufatura	137	6,9	10,9	9,4
Transporte	560	28,3	40,3	34,6
Uso	0	0,0	0	0,0
Disposição final	3,1	0,2	0,2	0,2
Total	1980,1	100,0	116,5	100,0
Potencial de recuperação	-7,63		-0,512	

Os resultados apresentados na Tabela 29 reafirmam a tendência anterior, na qual os materiais de maior massa são os grandes

consumidores de energia e produtores de CO₂, sendo que, somente os dois materiais mais representativos em massa, contribuem para 75,17% da energia incorporada e 77,46% da pegada de carbono.

Tabela 29: Energia Incorporada (EI) e Pegada de Carbono (PC) dos materiais da pá eólica de 63 m.

Material	Quantidade (kg)	EI (total) (GJ)	EI (total) (%)	PC (total) (t)	PC (total) (%)
Fibra de vidro	7496	490,99	38,19	26,31	40,20
<i>Mate</i> (reforço)	40	2,62	0,20	0,14	0,21
Resina	3700	475,45	36,98	24,38	37,26
Cola	600	77,10	6,00	3,95	6,03
Insertos	174	6,98	0,54	0,53	0,80
Receptores	55	3,21	0,25	0,18	0,27
<i>Gel coat</i>	123	11,41	0,89	0,61	0,93
Massas	32	2,97	0,23	0,16	0,24
<i>Top Coat</i>	46	4,66	0,36	0,22	0,34
Balsa	751	9,16	0,71	0,45	0,69
PVC/PET	75	5,21	0,40	0,19	0,28
<i>Taky Tape</i>	88	8,33	0,65	0,39	0,60
<i>Glitter Tape</i>	439	53,12	4,13	2,52	3,86
Saco vácuo	99	11,27	0,88	0,46	0,71
<i>Mesh</i>	1183	122,80	9,55	4,94	7,56
<i>Peel Ply</i>	9	0,40	0,03	0,01	0,02
Total	14910	1285,66	100,00	65,45	100,00

Dentre esses dois materiais, a tabela mostra que a resina contribui com 36,98% da energia incorporada e 37,26% da pegada de carbono, enquanto na fibra de vidro os percentuais foram, respectivamente de 38,19% e 40,20% da EI e PC.

Para a continuidade das avaliações, foram incluídos outros três componentes com percentual de participação na energia incorporada total maior do que 1%, são eles: *mesh* (9,55%), cola (6%) e *glitter tape* (4,13%), representando um total de 94,85% da energia incorporada total e 94,91% da pegada total de carbono. Assim sendo, somente estes cinco componentes são parte integrante das próximas análises, que avaliam o transporte e a manufatura.

A Tabela 30 mostra a energia incorporada (EI) e a pegada de carbono (PC) do processo de manufatura dos materiais mais representativos, em massa, da pá eólica de 63 m. Nas colunas 4 e 6 é possível constatar que a resina é a maior produtora de EI e PC no processo de manufatura, contribuindo, respectivamente, com 66,4% e 66,7% do total produzido na manufatura da pá eólica de 63 m.

Tabela 30: Energia Incorporada (EI) e Pegada de Carbono dos materiais mais representativos, durante o processo de manufatura de uma pá eólica de 63 m

Material	Quantidade (kg)	EI_(manuf) (GJ)	EI_(manuf) (%)	PC_(manuf) (t)	PC_(manuf) (%)
Fibra de vidro	7496	20	14,9	1,6	15,0
Resina	3700	89	66,4	7,1	66,7
Cola	600	15	11,2	1,2	11,3
<i>Glitter Tape</i>	439	2,7	2,0	0,2	1,9
<i>Mesh</i>	1183	7,3	5,4	0,54	5,1
Total	13418	134	100	10,64	100

A Tabela 31 apresenta a carga ambiental do processo de transporte. Aqui, o *mesh* têm a maior colaboração no consumo de energia e na produção de CO₂, respondendo por 53,3% da energia incorporada e 53% da pegada de carbono. Com valores menores, mas ainda assim representativos, têm-se a fibra de vidro, com, respectivamente, 30,6% e 30,5% da energia incorporada e da pegada de carbono.

Tabela 31: Energia Incorporada (EI) e Pegada de Carbono dos materiais mais representativos, durante o processo de transporte de uma pá eólica de 63 m.

Material	Quantidade (kg)	EI_(transp) (GJ)	EI_(transp) (%)	PC_(transp) (t)	PC_(transp) (%)
Fibra de vidro	7496	84	30,6	6,1	30,5
Resina	3700	22	8,1	1,7	8,5
Cola	600	11	4,0	0,8	4,0
<i>Glitter Tape</i>	439	11	4,0	0,8	4,0
<i>Mesh</i>	1183	146	53,3	10,6	53,0
Total	13418	274	100	20,0	100

Considerando que o foco deste trabalho é avaliar a carga ambiental produzida por uma pá eólica de 63 m e propor possíveis materiais que venham a diminuir seu impacto, considerando os resultados apresentados até o momento e considerando que o escopo desse trabalho possibilita a avaliação de apenas um material, decidiu-se por escolher a resina, que tem um impacto ambiental considerável.

3.5.2.2. Avaliação do Material “Resina”

Ao avaliar alternativas para o material “resina” é preciso manter, para os materiais alternativos, as principais características mecânicas do material de referência escolhido. Devido às características do produto, optou-se por avaliar apenas resinas epóxi e poliéster, totalizando 42 resinas, com 17 resinas epóxi e 25 resinas poliéster. As propriedades mecânicas avaliadas individualmente foram o módulo de Young (Figura 44) e a tensão de escoamento (Figura 45), enquanto que a densidade foi avaliada em conjunto com o módulo de Young (Figura 46).

A resina de referência é a resina “Epóxi/Fibra de vidro E, laminação biaxial”, marcada em todas as figuras com um pequeno “pin” vermelho. Os valores médios das propriedades mecânicas deste material, fornecias pelo banco de dados do CES-Selector 2017 são:

- Módulo de Young: 26,4 GPa
- Tensão de escoamento: 445 MPa
- Alongamento: 1,78%

- Densidade: 1,85 g/cm³

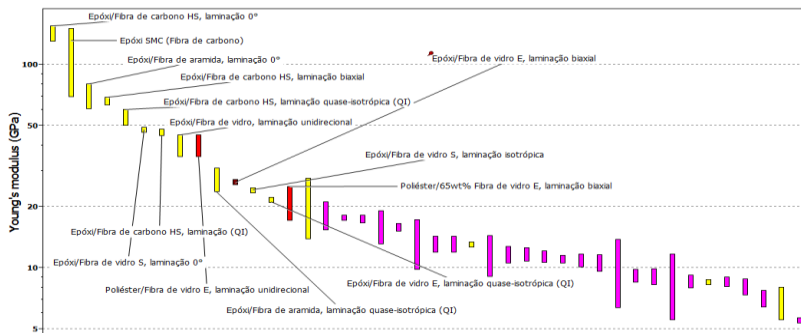


Figura 44: Módulo de Young das resinas avaliadas

A Figura 44 mostra o módulo de Young dos 42 materiais presentes no banco de dados do CES-Selector e previamente selecionados. Como restrição para o grupo de materiais com esta propriedade mecânica e para todas as demais propriedades avaliadas, foram descartados os materiais que têm propriedades com valores significativamente menores do que o material de referência, bem como os que utilizam fibra de carbono ou fibra de aramida, por não serem, no momento, passíveis de implantação no processo produtivo da empresa. Assim sendo, os seis materiais escolhidos foram:

- Epóxi/Fibra de vidro, laminação unidirecional;
- Epóxi/Fibra de vidro tipo S, laminação 0°;
- Epóxi/Fibra de vidro tipo S, laminação isotrópica;
- Epóxi/Fibra de vidro tipo E, laminação quase-isotrópica (QI);
- Poliéster/Fibra de vidro tipo E, laminação unidirecional; e
- Poliéster/Fibra de vidro tipo E, 65wt%, laminação biaxial.

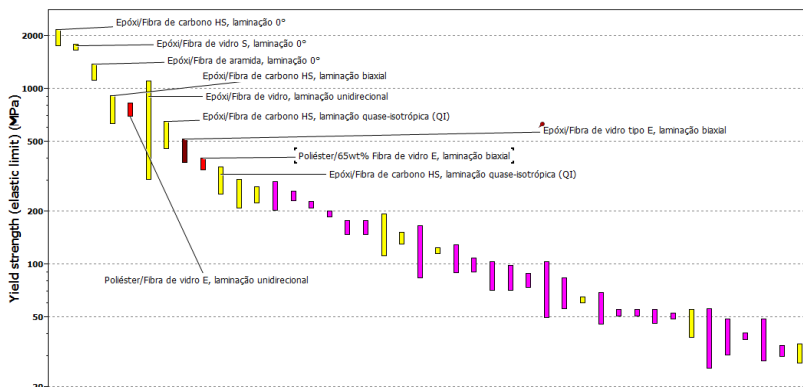


Figura 45: Tensão de escoamento das resinas avaliadas

Utilizando os mesmos critérios de restrição da análise anterior, a Figura 45 apresenta a tensão de escoamento dos materiais selecionados. São 4 os materiais que atendem aos requisitos do módulo de Young e da tensão de escoamento, são eles:

- Epóxi/Fibra de vidro, laminação unidirecional;
- Epóxi/Fibra de vidro tipo S, laminação 0°;
- Poliéster/Fibra de vidro tipo E, laminação unidirecional; e
- Poliéster/Fibra de vidro tipo E, 65wt%, laminação biaxial.

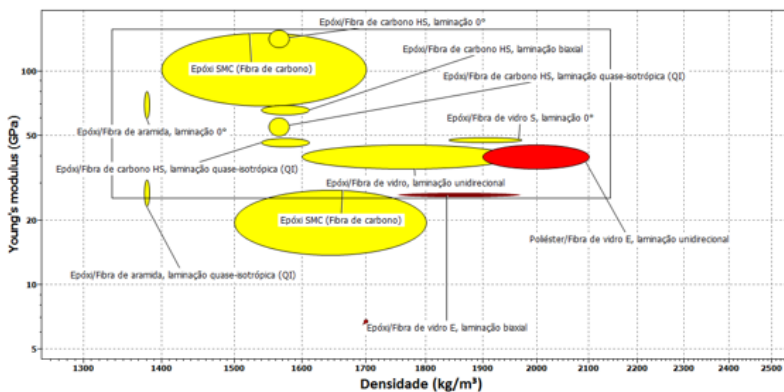


Figura 46: Módulo de Young vs Densidade das resinas avaliadas

A figura 46 mostra o gráfico de bolhas contendo os materiais com melhor relação densidade vs módulo de Young. Com as restrições iniciais somadas às definidas nas Figuras 44, 45 e 46, os materiais que atendem a todos os requisitos são apenas 3, sendo eles:

- Epóxi/Fibra de vidro, laminação unidirecional;
- Epóxi/Fibra de vidro tipo S, laminação 0°; e
- Poliéster/Fibra de vidro tipo E, laminação unidirecional.

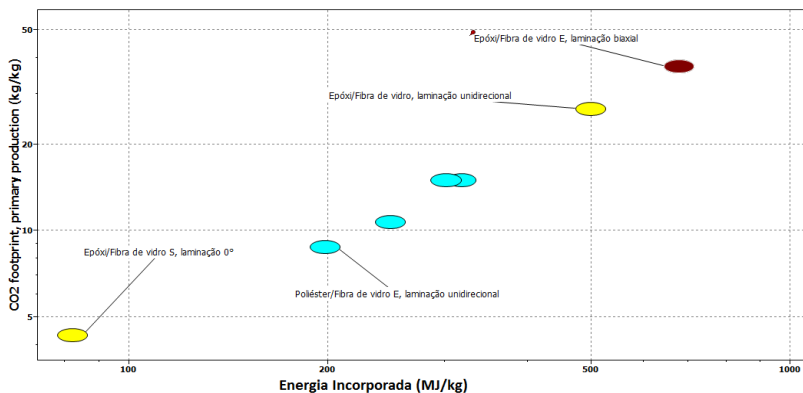


Figura 47: Energia Incorporada vs Pegada de Carbono das resinas aprovadas

A Figura 47 mostra as três resinas aprovadas após a avaliação de algumas propriedades mecânicas e a resina de referência. É possível verificar que as três resinas selecionadas possuem valores menores para a energia incorporada e a pegada de carbono do que a resina de referência.

Assim sendo, caso alguma destas três resinas seja aprovada em outros requisitos técnicos de produção, manutenção, custo, logística e outros parâmetros específicos da empresa ALFA, poderá ser utilizada para diminuir a energia incorporada e a pegada de carbono das pás eólicas.

A Tabela 32 apresenta os valores de EI e PC dos quatro materiais e a redução do impacto que cada material proporciona em relação à resina padrão “Epóxi/Fibra de vidro E, laminação biaxial”. Os valores da tabela foram retirados das fichas de dados de cada material, parte do banco de dados do CES-Selector.

Tabela 32: Energia Incorporada (EI) e Pegada de Carbono das resinas aprovadas e da resina padrão.

Material	Energia Incorporada (MJ/kg)	Redução do Impacto EI (%)	Pegada de Carbono (kg/kg)	Redução do Impacto PC (%)
Epóxi/Fibra de vidro E laminação biaxial	679	-----	37,4	-----
Epóxi/Fibra de vidro laminação unidirecional	494	27,2	26,7	28,6
Poliéster/Fibra de vidro E laminação unidirecional	198	70,8	8,8	76,5
Epóxi/Fibra de vidro S laminação 0°	82,1	87,9	4,3	88,5

As colunas 3 e 5 da Tabela 32 mostram a redução do impacto ambiental possível com a substituição do material padrão, “Epóxi/Fibra de vidro E, laminação biaxial”. O melhor resultado foi conseguido com o material “Epóxi/Fibra de vidro S, laminação 0°”, diminuindo a energia incorporada em 87,9% e a pegada de carbono em 88,5%. Considerando que a pá eólica de 63 m consome 3700 kg de resina em sua fabricação (Tabela 27), o valor total da diminuição da carga ambiental, com esta resina tipo S, seria de 2208 GJ de energia e de 122 ton. de CO₂.

3.5.3. Considerações Finais

A avaliação do ciclo de vida de uma pá de 63 m para geradores eólicos mostrou que os materiais são os grandes contribuintes do impacto ambiental durante o ciclo de vida deste produto, com valores de energia incorporada e pegada de carbono de 64,6 % e 55,9 %, respectivamente. O transporte possui importância secundária, mas relevante, tendo 28,3 % da energia incorporada e 34,6 % da pegada de carbono. A soma destas duas etapas contempla 92,9% da energia incorporada e 90,5 % da pegada de carbono.

Devido à importância apresentada, optou-se pela avaliação dos materiais com foco nas resinas utilizadas com fibra de vidro. O trabalho realizado indica a relevância de se utilizar ferramentas que possibilitem maior eficácia e rapidez na seleção de materiais nas fases iniciais do desenvolvimento de produto.

Ressalte-se que a análise de materiais realizada neste trabalho, restringiu-se à resina utilizada com a fibra de vidro, porém, para completar os trabalhos é necessário incluir avaliações econômicas e de processos de fabricação, a fim de contemplar as fibras de carbono, aramida e possíveis fibras naturais. Assim como a substituição da resina traz ganhos ambientais, a mudança da fibra pode, também, ter impacto positivo.

Tendo em vista futuras avaliações, sugere-se continuar os trabalhos referentes às pás eólicas, pois o crescente uso dos geradores eólicos provocará um passivo ambiental de grande monta, quando as pás tiverem que ser substituídas, daqui a 25 anos. Atualmente, não se tem uma solução economicamente viável para uma destinação final apropriada de produtos construídos com o compósito fibra sintética + resina.

4. CONCLUSÕES

Com o objetivo de propor um processo simplificado de seleção de materiais e de processos de produção, com menor energia incorporada e menor pegada de carbono, durante todo o seu ciclo de vida, desenvolveu-se este trabalho utilizando, como ferramenta, o software CES-Selector EcoAudit, o qual se mostrou uma ferramenta versátil, confiável e eficaz para a seleção de materiais ainda nas fases iniciais do desenvolvimento de um produto.

A utilização de uma ferramenta mais simples de Análise do Ciclo de Vida (ACV), permite que sua inclusão na metodologia de desenvolvimento de produto, ainda nas fases iniciais de projeto conceitual ou preliminar, passe a ser de fácil implantação, auxiliando os projetistas a tomarem uma decisão segura sobre os materiais mais adequados para comporem um produto com baixa carga ambiental.

Assim, este trabalho sugere a avaliação da carga ambiental através de um software simplificado de ACV, o qual possui apenas dois parâmetros de medição, a energia incorporada e a pegada de carbono. Tais conclusões são suportadas pelas principais constatações presentes nos trabalhos desenvolvidos nesta tese, onde a somatória dos resultados alcançados em cada trabalho mostra a eficácia da proposta apresentada, como segue:

- Através do estudo comparativo, entre os resultados apresentados em 8 publicações sobre ACV e os resultados alcançados pelo CES-Selector EcoAudit, foi possível validar sua utilização como ferramenta de pré-avaliação da carga ambiental através das métricas de energia incorporada e da pegada de carbono. Em todos os casos estudados, comparando os resultados de forma qualitativa, a mesma decisão foi tomada em relação às questões energéticas e ambientais, mostrando que é possível e confiável utilizar o CES-Selector EcoAudit para pré-avaliar o impacto ambiental na seleção de materiais de um novo produto.
- Utilizando o CES-Selector como ferramenta para a seleção de materiais na área de resíduos industriais, considerando a potencialidade dos resíduos, este mostrou-se útil na percepção do potencial de uso do resíduo, uma vez que pode indicar a melhor

utilização do resíduo e permitir ao projetista/pesquisador uma escolha apropriada.

- Na avaliação comparativa do ciclo de vida de recipientes para refrigerantes produzidos em PET ou vidro, os resultados mostram que a escolha do material com menor carga ambiental não é uma decisão única, mas sim, que ela depende de variáveis tais como o volume do recipiente, a distância transportada, o local de consumo e o destino final do recipiente.
- Com o objetivo de escolher a melhor opção de produto em suas fases iniciais de desenvolvimento, foram comparados dois sistemas de geração de energia em relação a sua menor energia incorporada e a sua menor pegada de carbono, dentre os geradores eólicos e as centrais fotovoltaicas. Foi possível constatar que as centrais eólicas possuem valores menores do que a central fotovoltaica. Constatou-se também que a torre construída sobre colunas de concreto possui a menor carga ambiental.
- Finalizando, um outro estudo de caso foi realizado a partir de dados oriundos de uma empresa, tendo como objetivo avaliar o impacto ambiental de uma pá de 63 m, para geradores eólicos, utilizando como métricas a energia incorporada e a pegada de carbono. Esse trabalho realizou-se na etapa de desenvolvimento do produto e fabricação do protótipo. Devido ao escopo de trabalho e outras implicações decidiu-se por avaliar o material “resina”. Após a escolha da resina padrão e a seleção de outras três resinas, verificou-se que a redução do impacto ambiental pode atingir valores por volta de 88%, ratificando a premissa de que é recomendável trabalhar com requisitos ambientais logo nas fases iniciais de projeto e desenvolvimento de um produto.

Entretanto, convém referir que esta não é uma ferramenta definitiva com decisões determinísticas, mas sim uma ferramenta de apoio à decisão do projetista/pesquisador, uma vez que sua eficácia está relacionada à habilidade do operador do software e do seu conhecimento sobre materiais.

Por fim, é importante enfatizar que esse trabalho não inviabiliza e não exclui uma avaliação mais detalhada do ciclo de vida de um produto através de softwares mais específicos neste tema. Tendo em vista trabalhos futuros, sugere-se a aplicação desta proposta a outras empresas, a fim de consolidar a possibilidade de utilizar um software confiável para

pré-avaliar o impacto ambiental, nas etapas iniciais de desenvolvimento de um novo produto.

5. REFERÊNCIAS

ABNT 14001. **NBR ISO 14001:2015 - Sistema de Gestão Ambiental - Requisitos com orientações para uso.** [S.l.]. 2015.

ABNT 14040. **NBR ISO 14040:2009 - Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura.** [S.l.]. 2009.

ABNT 14044. **NBR ISO 14044:2009 - Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e Orientações.** [S.l.]. 2009.

AGOSTINHO, F.; SICHE, R. Hidden costs of typical embodied energy analysis: brazilian sugarcane ethanol as a case study. **Biomass & Bioenergy**, 71, 2014. 69-83.

ALWAN, Z.; JONES, P. The importance of embodied energy in carbon footprint assessment. **Structural Survey**, 32, n. 1, 2014. 49-60.

ARVESEN, A.; HERTWICH, E. G. Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and rearearch needs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 16, 2012. 5994-6006.

ASHBY, M. et al. The CES EduPack Eco Audit Tool - A White Paper. **GRANTA - Teaching Resources**, Cambridge, 1, n. 2.1, 2012. 24.

ASHBY, M. F. **Materials and the Environment:** eco-informed material choise. 1ª. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, v. I, 2009.

ASHBY, M. F. et al. CES-EduPack for Eco Design - A white paper. **GRANTA - Teaching Resources**, Cambridge, n. 5.1, 2012. 23.

ASHBY, M. F.; JOHNSON, K. **Materials and Design:** the art and science of materials selection in product design. 3. ed. Oxford: Butterworth Heinemann, v. 1, 2013. 416 p.

ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e Engenharia dos Materiais.** 1ª. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

ASM INTERNATIONAL. **American Society for Metals.** [S.l.]. 1997.

- BAKSHI, A. A.; DEMONSABERT, S. M. Estimating the carbon footprint of municipal water cycle. **American Water Works Association**, 104, n. 5, 2012. 337-347. Acesso em: 30 jan. 2017.
- BALDO, G. L. et al. The carbon footprint measurement toolkit for EU Ecolabel. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 14, n. 7, 2009. 591-596.
- BCL - BOUSTED CONSULTING. Busted Consulting, 2018. Disponível em: <<http://www.bustedusa.com>>. Acesso em: 17 fev. 2017.
- BISWAS, W. K. Carbon footprint and embodied energy assessment of a civil works program in a residential estate of Western Australia. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 19, 2014. 732-744.
- BORCHARDT, M. et al. Considerações sobre EcoDesign: um estudo de caso na indústria eletrônica automotiva. **Ambiente e Sociedade**, XI, n. 2, 2008. 341-353.
- BORDIGONI, M.; HITA, A.; LE BLANC, G. Role of embodied energy in the european manufacturing industry: application to short-term impacts of a carbon tax. **Energy Policy**, 43, 2012. 335-350.
- BRIBIAN, I. Z.; CAPILLA, A. V.; USÓN, A. A. Life cycle assessment of buildings materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environmental**, 46, 2011. 1133-1140.
- BROEREN, M. L. M. et al. Early-stage sustainability assessment to assist with material selection: a case study for biobased printer panels. **Journal of Cleaner Production**, 135, 2016. 30-41.
- CABEZA, L. F. et al. Low carbon and low embodied energy materials in buildings: a review. **Renewable and Sustainable Energy Review**, 23, 2013. 536-542.
- CAHILL, C. J.; GALLACHÓIR, B. P. Monitoring energy efficiency trends in european industry: which top-down methods should be used? **Energy Policy**, 38, n. 11, 2010. 6910-6918.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CAPES/MEC. Portal de Periódicos CAPES/MEC, 2018. Disponível em: <<http://www-periodicos-capes-gov-br.ez46.periodicos.capes.gov.br>>. Acesso em: 05-09 fev. 2018.

CASAGRANDE, M. C.; SARTOR, M. N.; GOMES, V. Reaproveitamento de resíduos industriais. Processamento e aplicação no setor cerâmico. **Cerâmica Industrial**, 13, n. 1/2, 2008. 34-42.

CHEHEBE, J. **Análise do ciclo de vida dos produtos - ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

CLARIVATE. Web of Science, 2018. Disponível em: <http://apps-webofknowledge.ez46.periodicos.capes.gov.br/WOS_GeneralSearch_input.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&SID=8CTNzhwrhnYTqSt6li6&preferencesSaved=>>. Acesso em: 20-23 fev. 2018.

COCA COLA BRASIL. Sustentabilidade. **Relatório de Sustentabilidade**, 2016. Disponível em: <<https://www.cocacolabrasil.com.br/content/dam/journey/br/pt/private/pdfs/relatorio-de-sustentabilidade-coca-cola-brasil-2017.pdf>>. Acesso em: 19 abr. 2017.

COCA COLA FEMSA. Informe de Sostentabilidade. **Coca Cola FEMSA - Informe Integrado 2016**, 2015. Disponível em: <https://img.cocacolafemsa.com/assets/files/es/Sostenibilidad/KOF17_spanish.pdf>. Acesso em: 9 fev. 2017.

CRAWFORD, R. H. Validation of a hybrid life-cycle inventory analysis method. **Journal of Environmental Management**, 88, 2008. 496-506.

CROWTHER, P. **Design for disassembly to recover embodied energy**. The 16th International Conference on passive and low energy architecture. Melbourne-Brisbane-Cairns: [s.n.]. 1999. p. 6.

CULÁKOVA, M. et al. Reduction of carbon footprint of building structures. **Chemical Engineering Transactions**, 29, 2012. 199-204.

DE BENEDETTI, B. et al. Eco Audit: a renewed simplified procedure to facilitate the environmental informe material choise orienting the further life cycle analisys for ecodesigners. **Materials Transactions**, 51, n. 5, 2010. 832-837.

DING, G. The development of a multi-criteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities. **PhD Thesis, University of Technology**, Sydney - Austrália, 2004.

DIXIT, M. K. et al. Identification of parameters for embodied energy measurement: a literature review. **Energy and Buildings**, 42, 2010. 1238-1247.

DONG, H. et al. Carbon footprint evaluation at industrial park level: A hybrid life cycle assessment approach. **Energy Policy**, 57, 2013. 298-307.

DRUCKMAN, A.; JACKSON, T. The carbon footprint of UK households 1990-2004: a socio-economically disaggregated, quasi-multi-regional input-output model. **Ecological Economics**, 68, n. 7, 2009. 2066-2077.

EI COMPENDEX. Engineering Village, 2018. Disponivel em: <<https://www.engineeringvillage.com/search/quick.url>>. Acesso em: 19-23 mar. 2018.

ELSEVIER. Scopus, 2018. Disponivel em: <<https://www.elsevier.com/americalatina/pt-br/scopus>>. Acesso em: 05-09 mar. 2018.

ERTEKIN, Y.; HUSANU, I. N. C.; CHIOU, R. **Entegrating eco-design in manufacture materials and processes related courses - material selection for sustainable design using CES Package**. 121st^a ASEE-Annual Conference & Exposition. [S.l.]: [s.n.]. 2014. p. 12.

FERNANDES, S. C. Passa a passo da fabricação de um painel solar. **Wix**, 04 nov. 2016. Disponivel em: <<http://fernandessc.wixsite.com/blog/single-post/2016/11/04/Passo-a-passo-da-fabrica%C3%A7%C3%A3o-de-um-painel-solar>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

FIKSEL, J.; WAPMAN, H. How to design for environment and minimize life cycle cost. **IEEE Explore Digital Library**, 1994.

Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/document/337290/references>>. Acesso em: 11 out. 2016.

FINNVEDEN, G. et al. Recent developments in the life cycle assessment. **Journal of Environmental Management**, 91, 2009. 1-21.

GENG, Y.; TSUYOSHI, F.; CHEN, X. Evaluation of innovative municipal solid waste management through urban symbiosis: a case study of Kawasaki. **Journal of Cleaner Production**, 18, 2010. 993-1000.

GIANETTI, B. F.; VILLAS BOAS ALMEIDA, C. M.; BONILLA, S. H. Implementação de Eco-Tecnologias rumo à ecologia industrial. **RAE-Eletrônica**, São Paulo, 2, n. 1, jan-jun 2003. 1-19.

GRANJA, A. V. C. **Estudo e otimização de uma central fotovoltaica de 1 MW**. Porto: Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto, 2017. 122 p. Acesso em: 26 jul. 2018.

GRANTA DESIGN. Granta Design. **Site da Granta Design**, 2018. Disponível em: <<https://www.grantadesign.com/products/ecoaudit/>>. Acesso em: 19 fev. 2017.

GRANTA DESIGN. Software CES - Cambridge Engineering Selector. **http://teachingresources.grantadesign.com.index**, 2018. Acesso em: 12 jan. 2018.

GREENDELTA. openLCA, 2018. Disponível em: <<http://www.openlca.org>>. Acesso em: 19 fev. 2017.

HAMMOND, G. P.; LI, B. Environmental and resource burdens associated with world biofuel production out to 2050: footprint components from carbon emissions and land use to waste arisings water consumption. **GCB Bioenergy**, 8, 2016. 894-908.

HAMMOND, G. P.; SETH, S. M. Carbon and environment footprint of global biofuel production. **Applied Energy**, 112, 2013. 547-549.

HASSARD, H. A. et al. Product carbon footprint and energy analysis of alternative coffee products in Japan. **Journal of Cleaner Production**, 73, 2014. 310-321.

HENRIQUES, J. F. M. **Projecto de torres eólicas reticuladas de grande altura (150 m):** Modelação e análise comparativa com estruturas tubulares auto suportadas. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012. 133 p.

IBGE. Indicadores de Desenvolvimento Sustentável - IDS. **SIDRA**, 2016. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ids/tabelas>>. Acesso em: 8 out. 2017.

IEA. **IEA - International Energy Agency**. Carlet, p. 45. 2010.

IFIAS. **Energy analysis Workshop on methodology and conventions**. Guldsmedshyttan: International Federation of Institutes for Advanced Study (IFIAS). 1974.

IFU HANBURG. Umberto, 2018. Disponível em: <<https://www.ifu.com/en/umberto/lca-software>>. Acesso em: 18 fev. 2017.

INMETRO. Situação dos certificados válidos por unidade da federação. Disponível em: <<http://www.certifiq.inmetro.gov.br>>. Acesso em: 03 nov. 2016.

JESWIET, J.; HAUSCHILD, M. EcoDesign and future environmental impacts. **Materials & Design**, 26, 2005. 629-634.

JUDKOFF, R.; NEYMARK, J. **Building Energy Simulation Test (BESTEST) and diagnostic method**. International energy Agency. Golden-Colorado, p. 296. 1995.

KEOLEIAN, G. A.; MENEREY, D. Sustainable Development by Design: Review of Life. **Air & Waste Management Association**, 44, 1994. 845-868.

KHARE, S. et al. Selection of materials for high temperature latent heat energy storage. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, 107, 2012. 20-27.

KIM, K. H. A comparative life cycle assessment of a transparent composite façade system and glass curtain wall system. **Energy and Building**, 43, 2011. 3436-3445.

KOSKELA, L. **Application of the new production philosophy to construction**. Stanford University. Stanford, p. 75. 1992.

LAMNATOU, C. et al. Life cycle analysis of a building-integrated solar thermal collector, based on embodied energy and embodied carbon methodologies. **Energy and Buildings**, 84, 2014. 378-387.

LANGSTON, Y. L.; LANGSTON, C. A. Reliability of building embodied energy modeling: an analysis of 30 Melbourne case studies. **Construction Management and Economics**, 26, n. 2, 2008. 147-160.

LANOE, T.; SIMÕES, C. L.; SIMÕES, R. Improving the environmental performance of bedding products by using life cycle assessment at the design stage. **Journal of Cleaner Production**, 52, 2013. 155-164.

LIN, J. et al. Using hybrid method to evaluate carbon footprint of Xiamen City, China. **Energy Policy**, 58, 2013. 220-227.

LJUNGBERG, L. Y. Materials selection and design for development of sustainable products. **Materials & Design**, 28, 2007. 466-479.

LOPES, R. J. C. **Efeito do sombreamento nos painéis fotovoltaicos**. Porto: [s.n.], 2013. 111 p. Acesso em: 26 jul. 2018.

MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis - Os requisitos ambientais dos produtos industriais**. São Paulo: USP, 2002. 366 p.

MARQUES, A. C. Teaching Sustainability Design of Products to Engineering Students. **International Journal of Performability Engineering**, 10, n. 6, 2014. 589-604.

MAYYAS, A. T. et al. A life cycle assessment-based selection for a sustainable lightweight body-in-white design. **Energy**, 39, 2012. 412-425.

MILLER, A. J. **Embodied energy - a life cycle os transportation energy embodied in construction materials**. COBRA, conference papers, RICS Foundation. Glasgow: University of Brighton. 2001.

MO, W. et al. Measuring the embodied energy in drinking water supply systems: a case study in the Great Lakes region. **Environmental Science Thechnology**, 44, 2010. 9516-9521.

MOORE, A. D. et al. Life cycle assessment of domestic hot water systems in Australia. **Renewable Energy**, 2017. 187-196.

MOREIRA, C. C. **Características e desempenho da escória de alto forno como agregado para utilização em camadas granulares de pavimento**. 37ª Reunião anual de pavimentação. Goiânia: [s.n.]. 2006. p. 13.

NABAVI-PELESARAEI, A. . B. R.; HOSSEINZADEH-BANDBAFHA, H.; BERRADA, A. Prognostication of energy use and environmental impacts for recycle system of municipal solid waste management. **Journal of Cleaner Production**, 154, 2017. 602-613.

O'HORE, J.; COPE, E.; WARDE, S. Five steps to eco-design - improving the environmental performance of products through design. **GRANTA DESIGN**, 2016. Disponível em: <<http://www.grantadesign.com>>. Acesso em: 06 set. 2016.

OEBELS, K. B.; PACCA, S. Life cycle assessment of an onshore wind farm located at the northeastern coast of Brazil. **Renewable Energy**, 53, 2013. 60-70.

OLIVEIRA, H. A.; RABELO JR., E. C.; BRESSIANI, J. C. Influência de adição de resíduo lama de cal no desenvolvimento microestrutural de revestimento cerâmico. **Tiles & Brick**, 17, n. 1, 2001. 29-31.

PE INTERNATIONAL. GaBi, 2018. Disponível em: <<http://www.gabi-software.com/international/index>>. Acesso em: 18 fev. 2017.

PENCIUC, D. et al. Product life cycle management approach for integration of engineering design and life cycle engineering. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing**, 30, 2016. 379-389.

PEREIRA, F. R. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral**: composições cerâmicas e cimentícias. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2014.

QUANTIS. Quantis, 2018. Disponível em: <<https://quantis-intl.com>>. Acesso em: 17 fev. 2017.

RALF, A. The effect of building and material service life on building life cycle embodied energy. **PhD Thesis - Faculty of Architecture, Building & Planning**, Meubourne, 2016.

ROBERTSON, A. B.; FRANK, C. F. L.; COLE, R. J. A comparative cradle to gate life cycle assessment of Mid-Rise Office building construction alternatives: laminated timber or reinforced concrete. **Buildings**, 2, 2012. 245-270.

ROCHA, A. B. **Uma avaliação comparativa entre torres para aerogeradores de aço tubular e de concreto pré-moldado protendido na região da serra do mel, Rio Grande do Norte**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Departamento de Engenharia Civil, 2016. 61 p. Acesso em: 6 jul. 2018.

ROMEIRO FILHO, E. **CAD na Indústria**: implantação e gerenciamento. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ, 1997. 180 p.

ROSSI, B.; MARIQUE, A. F.; REITER, S. Life Cycle Assessment os residential buildings in three different european locations, case study. **Building and Environmental**, 51, 2012. 402-407.

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de desenvolvimento de produtos**: uma referência para a melhoria de processo. 1ª. ed. São Paulo: Saraiva, 2006.

RYDH, C. J.; SUN, M. Life cycle inventory data for materials grouped according to environmental and material properties. **Journal of Cleaner Production**, 13, 2005. 1258-1268.

SCHALTEGGER, S.; BURRIT, R. L. Sustainability accounting for companies: Catchphase or decision support for business leaders? **Journal of World Business**, 45, n. 4, 2010. 375-384.

SCHLANBUSH, R. D. et al. Integration of life cycle assessment in the design of hollow silica nanospheres for thermal insulation applications. **Building and Environment**, 80, 2014. 115-124.

SCIELO. Scielo, 2018. Disponível em: <<https://www.scielo.org/php/index.php>>. Acesso em: 26-28 fev. 2018.

SEDLÁKOVÁ, A.; VILCEKOVÁ, S.; BURDOVÁ, E. K. Analysis of material solutions for design of construction details of foundation, wall and floor for energy and environmental impacts. **Clean Technologies and Environmental Policy**, 17, n. 5, 2015. 1323-1332.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. São Paulo: Pearson Education, 2008.

SHELDRIK, L.; RAHIMIFARD, S. **Evolution in ecodesign and sustainable design methodologies**. Proceedings of the 20th CIRP International Conference on the Life Cycle Engineering. Singapore: [s.n.]. 2013. p. 35-40.

SILVA, E. S. A. **Um sistema informacional e perceptivo de seleção de materiais com enfoque no design de calçados**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 53. 2005.

SIMAPRO. SimaPro, p. <https://simapro.com/business/life-cycle-assessments/>, 2018. Disponível em: <<https://simapro.com/business/life-cycle-assessments/>>. Acesso em: 19 fev. 2017.

SINHA, R.; LENNARTSSON, M.; FROSTELL, B. Environmental footprint assessment of building structures: a comparative study. **Building and Environment**, 104, 2016. 162-171.

SOCIEDADE PORTUGUESA DE ENERGIA SOLAR. Energia solar - orientação e inclinação dos painéis solares. **Nova Energia**, 05 ago. 2012. Disponível em: <<https://www.novaenergia.net/forum/viewtopic.php?t=16257>>. Acesso em: 28 jul. 2018.

SOLINTANDER, N.; KOVACS, G. Corporate Environmental Management: a blueprint for categorising environmental policies. **Corporate**, Helsink, 2002. 22.

STAFFORD, F. N. Desempenho ambiental da indústria de cimento portland por meio da avaliação do ciclo de vida: três estudos de caso.

Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da UFSC, Florianópolis, 2016.

SURAHMAN, U.; KUBOTA, T.; WIJAYA, A. **Life cycle assessment of energy and CO² emissions for residential buildings in Jakarta, Indonesia**. International Conference on Innovation in Engineering and Vocational Education. [S.l.]: IOP Publishing. 2016. p. 8.

THACKARA. **In the bubble: designing in a complex world**. 1. ed. Cambridge: MIT Press, 2006. 321 p.

TRELOAR, G. J. A comprehensive embodied energy analysis framework. **PhD Thesis, Deakin University**, Vitória - Austrália, 1998.

UDDIN, M. S.; KUMAR, S. Energy, emission and environmental impact analysis of wind turbine using life cycle assessment technique. **Journal of Cleaner Production**, 69, 2014. 153-164.

UMEDA, Y. et al. LC-CAD: A CAD system for life cycle design. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 61, 2012. 175-178.

VAN DER VELDEN, N. M.; KUUSK, K.; KOHLER, A. R. A life cycle assessment and eco-design of smart textiles: the importance of material selection demonstrated through e-textile product redesign. **Material and Design**, 84, 2015. 313-324.

VENZKE, C. S. A situação do eco-design em empresas moveleiras da região de Bento Gonçalves, RS: análise da postura e das práticas ambientais. **Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Administração da Escola de Administração da UFRS**, Porto Alegre, 2002. 125.

VERALLIA BRASIL. Verallia Brasil. **Linha de Produtos**, 2017. Disponível em: <<https://br.verallia.com/catalog/list/12/1-cervejas/all/all/all/all>>. Acesso em: 18 fev. 2017.

VONPAR. **Visita à Fábrica**. Coca Cola Santa Catarina. Antonio Lopes. 2016.

VOSSBERG, C.; MASON-JONES, K.; COHEN, B. An energetic life cycle assessment of C&D waste and container glass recycling in Cape Town, South Africa. **Resources, Conservation and Recycling**, 88, 2014. 39-49.

WAN OMAR, W.; DOH, J.; PANUWATWANICH, K. Variations in embodied energy and carbon emission intensities of construction materials. **Environmental Impact Assessment Review**, 49, 2014. 31-48.

WANG, Z. et al. Hierarchical life cycle design of reinforced concrete structures incorporating durability, economic efficiency and green objectives. **Engineering Structures**, 157, 2018. 119-131.

WEBER, C. L.; MATTHEUWS, H. S. Quantifying the global and distributional aspects of american household carbon footprint. **Ecological Economics**, 66, 2008. 379-391.

WEILER, V.; HARTER, H.; EICKER, U. Life cycle assessment of buildings and city quarters comparing demolition and reconstruction with refurbishment. **Energy and Buildings**, 2017. 319-328.

WIEDMANN, T.; MINX, J. A definition of "Carbon Footprint". In: PERTSOVA, C. C. **Ecological Economics Research Trends**. Tradução de Nova Science Publishers. Hauppauge: [s.n.], v. 1, 2008. p. 1-11.

WU, X.; HU, S.; MO, S. Carbon footprint model for evaluating the global warming impact of food transport refrigeration systems. **Journal of Cleaner Production**, 54, 2013. 115-124.

YUNG, P.; LAM, K. C.; YU, C. An audit of life cycle energy analysis of building. **Habitat International**, 39, 2013. 43-54.

ZAMBRANA-VASQUEZ, D. et al. Environmental assessment of domestic solar hot water systems: a case study in residential and hotel buildings. **Journal of Cleaner Production**, 88, 2015. 29-42.

ZAPICO, L. Z.; BRANDT, N.; TURPEINEN, M. Environmental metrics - The main opportunity from ICT for industrial ecology. **Journal of Industrial Ecology**, 14, n. 5, 2010. 703-706.

ZARANDI, M. H. F. et al. A material selection methodology and expert system for sustainable design. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 57, n. 9, 2011. 885-903.

ANEXO I

Anexo I: Complemento do procedimento metodológico utilizado na pré-avaliação da EI e PC como requisitos para a seleção de materiais nas fases iniciais do desenvolvimento de produto

A técnica de pesquisa utilizada para alcançar os objetivos do trabalho pretendido é do tipo exploratória descritiva. O resultado total da pesquisa mostrada na Tabela 2 foi alcançado através do resultado das buscas individualizadas em cada banco de dados.

As mesmas buscas foram efetuadas com as palavras chave traduzidas para a língua portuguesa, entretanto, não foram encontrados documentos relevantes. Definido o quadro de palavras de busca, inicia-se a busca nas bases já selecionadas, considerando publicações que contenham esses termos no abstract, título, assunto ou palavras chave.

Tabela 33: Quantidade de artigos encontrados na base CAPES em 23/05/2018.

Palavra chave	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	3	3	3	3	3	0	0	2
3	1	3	9	10	17	12	18	14	14	15
4	0	1	2	3	11	9	6	10	5	7
5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
6	0	3	7	7	13	17	19	18	11	13
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	6	4	9	13	9	12	7	8
Total Parcial	1	7	28	27	53	54	55	54	37	45
Total Geral	8		353							

Fonte: autor

Tabela 34: Quantidade de artigos encontrados na base SCOPUS em 02/05/2018.

Palavra chave	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
1	0	0	2	2	3	2	7	6	5	12
2	1	0	2	2	3	2	2	6	4	4
3	3	0	7	4	11	9	10	12	15	13
4	4	1	3	4	12	9	6	8	9	6
5	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
6	0	0	1	2	4	3	8	10	6	5
7	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
8	0	0	5	1	1	4	3	3	6	4
Total Parcial	8	1	20	15	35	29	37	46	46	44
Total Geral	9		272							

Fonte: autor

Tabela 35: Quantidade de artigos encontrados na base Compendex Engineering Village em 10/05/2018.

Palavra chave	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
2	0	0	3	1	2	1	1	6	2	3
3	0	1	6	9	12	11	15	18	19	10
4	1	1	1	1	6	4	4	9	6	4
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	1	1	1	2	3	4	5	2
7	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0

8	0	0	6	2	1	4	6	2	9	3
Total Parcial	1	2	17	14	22	23	30	40	42	22
Total Geral	3		210							

Fonte: autor

As Tabelas 33, 34 e 35 mostram a quantidade de artigos encontrados para cada uma das palavras de busca definidas na Tabela 1, nos anos de 2000, 2005 e de 2010 a 2017. A Tabela 33 apresenta os dados encontrados na base da Capes, a Tabela 34 na base Scopus, a Tabela 35 na base Compendex – Engineering Village e a Tabela 36 na base Web of Science. A base de dados Scielo não apresentou resultados relevantes para as palavras de busca em língua inglesa ou traduzidas para a língua portuguesa.

Tabela 36: Quantidade de artigos encontrados na base Web of Science em 30/05/2018.

Palavra chave	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	2
2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
3	2	1	15	5	16	12	16	17	24	19
4	2	1	8	6	11	13	11	14	15	13
5	0	0	1	0	1	0	2	0	0	0
6	0	2	5	6	15	16	16	27	37	30
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
8	0	0	4	2	8	9	11	11	14	13
Total Parcial	4	4	33	19	54	51	58	69	91	77
Total Geral	8		452							

Fonte: autor

Finalizada a busca obteve-se 1321 publicações entre 2010 e 2017. Outros 23 artigos foram acrescentados através de referências de artigos avaliados e estão definidos na Tabela 2 como “complementar”.

A Figura 48 mostra a quantidade de artigos encontrados nas bases Capes, Scopus, Web of Science e Compindex, com as palavras de busca mostradas na Tabela 1. Mostra ainda que houve um aumento considerável de artigos publicados entre 2011 e 2016 e uma ligeira queda entre os anos de 2016 e 2017, mostrando que o interesse no assunto, apesar da pequena queda, ainda é relevante.

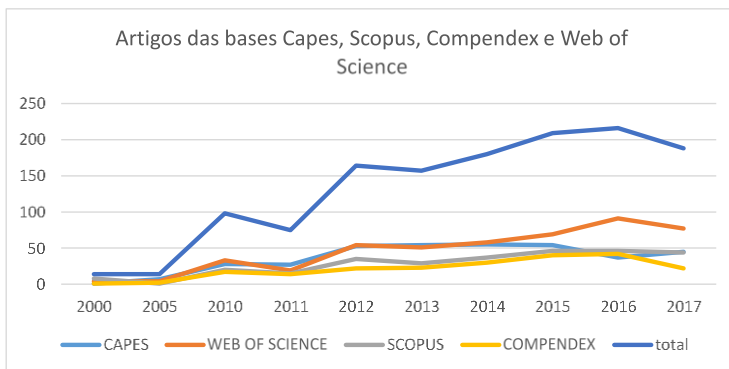


Figura 48: Artigos encontrados nas bases Capes, Scopus, Compindex e Web of Science entre 2000 e 2017.

Para a validação dos resultados deste trabalho, foi utilizado o método analítico. Assim, foram utilizados, como base, os resultados obtidos com a metodologia ACV em 8 artigos já publicados, comparando-os com os resultados obtidos com o uso do software EcoAudit. Foram selecionados os artigos que disponibilizam dados suficientes para calcular a energia incorporada e a pegada de carbono através do EcoAudit.

A Tabela 37 apresenta o resultado comparativo entre a utilização do método ACV e o CES-Selector / EcoAudit em seis artigos publicados. As seis colunas iniciais contêm dados retirados dos artigos avaliados e as três colunas finais os resultados obtidos com o CES-Selector, pelo autor deste trabalho. As colunas quatro e cinco apresentam os valores de energia incorporada e pegada de carbono pelo método ACV, enquanto as colunas sete e oito contêm os valores obtidos com o CES.

As colunas seis e nove apresentam a decisão tomada após avaliar o resultado numérico obtido no cálculo da energia incorporada e da pegada de carbono. Analisando-se esse resultado final, é possível

constatar que em todos os oito artigos avaliados optou-se pela mesma tomada de decisão, validando o CES-Selector / EcoAudit como uma ferramenta confiável para ser utilizada na pré-avaliação da carga ambiental de um novo produto.

Sendo a proposta do presente trabalho utilizar o CES como ferramenta de pré-avaliação da carga ambiental de um novo produto, o objetivo aqui é verificar se a decisão tomada na escolha do material ou sua disposição final é a mesma tanto no uso do método ACV como através do uso do módulo EcoAudit do CES. Aqui a diferença de valor encontrado entre os dois métodos é irrelevante, uma vez que a pré-avaliação não exclui, caso necessário, a possibilidade de se fazer a ACV em outras fases do projeto.

Tabela 37: Quadro comparativo de resultado entre a ACV e o CES-Selector/EcoAudit.

Autor	Produto avaliado	Artigo avaliado				CES – Selector		
		Software Base de dados	Energia Incorporada (GJ)	CO ₂ (t)	Decisão tomada	Energia Incorporada (GJ)	CO ₂ (t)	Decisão tomada
Lamnatou, C. et. al., 2014	Coletor Solar: reciclado vs. não reciclado	ICE – Inventory of Carbon & Energy; Alcorn	Não reciclado: ICE (7,01) Alcorn(7,66) Reciclado: ICE (2,36) Alcorn(2,00)	Não reciclado: ICE (0,47) Alcorn (0,50) Reciclado: ICE (0,19). Alcorn (0,18)	Reciclado	Não reciclado: (3,14) Reciclado: (0,92)	Não reciclado: (0,185) Reciclado (0,069)	Reciclado
Kim, K. H., 2011	Fachada Edifício: composto vs. vidro	SimaPro 7.1	Composto (148) Vidro (72)	Composto (7,6) Vidro (4,5)	Vidro	Composto (129) Vidro (76,2)	Composto (8,02) Vidro (5,13)	Vidro
Uddin, M. S. e Kunar, S., 2014	Gerador Eólico: vertical vs. horizontal	SimaPro 7.3.3	Vertical (0,532) Horizontal (0,590)	Vertical (0,27) Horizontal (0,09)	Horizontal	Vertical (3,21) Horizontal (2,41)	Vertical (0,218) Horizontal (0,158)	Horizontal
Mayyas, A. T. et. al., 2012	Carroceria Automóvel: diferentes materiais	CES 2008; Sullivan, et. al., 2008; GREIT.	AISI 3140 (255) AISI 405 (194) AZ61Mg Alloy (88,6)	AISI 3140 (17,72) AISI 405 (13,24) AZ61Mg Alloy (6,41)	AZ61 Mg Alloy	AISI 3140 (188) AISI 405 (142) AZ61Mg Alloy (74)	AISI 3140 (13,4) AISI 405 (10,1) AZ61Mg Alloy (5,4)	AZ61 Mg Alloy

Lanoe, T. et. al., 2013	Colchão: espuma vs. Mola	Ecoinvent; Idmat, 2001.	Utilizado a hierarquia de pontuação do E199: Mola (9,3 pontos) Espuma (39,1 pontos)	Mola	Mola (1,41) Espuma (3,38)	Mola (0,0734) Espuma (0,166)	Mola
Vossherg, et. al., 2014	Recipiente de vidro: reciclado vs. aterro	IPCC, 2007	Aterro (12,44) Reciclado (9,12)	Reciclado	Aterro (19,04) Reciclado (18,05)	Aterro (1,46) Reciclado (1,26)	Reciclado
Weiler, et. al., 2017	Building: demolition vs reconstruction	Umberto – Ecoinvent 3.2	1975 (30,5) 1975_Med_Ref. (22,3) 1975_Adv_Ref. (18,9) 2016 KfW 70 (20,4)	1975_Adv_Ref	1975 (4,32) 1975_Med_Re f. (2,46) 1975_Adv_Ref (2,09) 2016 KfW 70 (2,17)	1975 (2,62) 1975_Med_Ref. (1,49) 1975_Adv_Ref (1,26) 2016 KfW 70 (1,34)	1975_Adv_Ref
Moore, et. al., 2017	Domestic hot water: electric vs. Solar vs. Gas	Gabi 6	Electric storage (0,48) Gas storage (0,25) Gas instantaneous (0,21) Solar gás instantaneous (0,09)	Solar_Gás Instantâneo	Electric storage (0,44) Gas storage (0,23) Gas instantaneous (0,19) Solar gás instantaneous (0,14)	Electric storage (0,031) Gas storage (0,016) Gas instantaneous (0,013) Solar gás instantaneous (0,007)	Solar_Gás Instantâneo

ANEXO II

Anexo II: Documento para coleta de dados do EcoAudit

O documento relativo a este anexo tem por objetivo coletar os dados referentes às necessidades de informação do EcoAudit e contém campos específicos dessas necessidades, os quais devem ser preenchidos a fim de possibilitar a utilização do EcoAudit de forma rápida e eficaz. Esse diagnóstico coleta os dados do produto/modelo a ser desenvolvido, sendo documento obrigatório no desenvolvimento desses trabalhos.

O anexo II contém os seguintes campos a serem preenchidos:

- Dados da empresa: nome da empresa, endereço, faturamento, contatos e outros;
- Dados do produto/modelo: definição do novo modelo ou produto a ser produzido e o objetivo do novo projeto, como, por exemplo: diminuir em 5% a pegada de carbono;
- Dados dos componentes do produto/modelo: nome do componente, material, porcentagem de reciclado presente no material, massa unitária, processo e disposição final;
- Dados de transporte: referente às diversas etapas do processo, tanto a jusante como a montante da produção do novo produto; e
- Dados de uso: tempo de vida, país de uso, energia de entrada, equipamento utilizado, potência, tempo de uso do equipamento e outros.

1. Dados da empresa:

Nome: _____

Endereço: _____

Home page: _____

E-mail institucional: _____

Ramo de atividade: _____

Código IAC: _____

Faturamento anual: _____ n° de funcionários: _____

Contatos:

Nome	e-mail	Telefone
_____	_____	_____
_____	_____	_____
_____	_____	_____

2. Dados do(s) produto(s) / modelo(s)

() Novo produto () Novo modelo

2.1 Nome do novo produto/modelo:

2.2 Objetivo do trabalho: Exemplo: Diminuir em 5% a pegada de carbono do novo produto

2.3 Dados complementares úteis:

Grau de risco, peso e outros dados úteis para comparar o velho material com o novo material

3. Dados dos componentes do (s) produto(s) / modelo(s)

3.1. CES Selector / EcoAudit – dados de material – Nome do produto: _____

Nome do arquivo: _____

Nº	Quant. (uni)	Componente	Material	% reciclado utilizado	Massa unitária (kg)	Processo	Disposição final
01							
02							
03							
04							
05							
06							
07							
08							
09							
10							
11							
12							
13							
14							

3.2. CES Selector / EcoAudit – dados de transporte

Origem	Destino	Meio de transporte	Distância (km)

3.3. CES Selector EcoAudit – dados de uso

Tempo de vida
do produto (anos)

País de uso do
produto

Energia de
entrada
(elétrica/fóssil)

Equipamento
utilizado
(motor/bateria)

Potência do
equipamento

Tempo de uso:
equipamento
(dias/ano)

Tempo de uso:
equipamento
(horas/dia)

ANEXO III

Anexo III: Documento para diagnóstico SGA – ACV

O documento respectivo a este anexo deve ser utilizado somente quando a empresa já possui um sistema de gestão ambiental que contemple, ainda que de forma mínima, a análise do ciclo de vida do produto. Esse diagnóstico tem por objetivo verificar o grau de comprometimento da empresa com as questões ambientais, especialmente no processo de desenvolvimento de produto e seleção de materiais, sendo utilizado somente em conjunto com o documento I. Este documento foi desenvolvido a partir de requisitos das normas ISO 14001, ISO 14040, ISO 14044 além de boas práticas da gestão ambiental.

O anexo III contém os seguintes campos a serem preenchidos:

- Dados da empresa: nome da empresa, endereço, faturamento, contatos e outros;
- Dados sobre o desenvolvimento de produto: fluxograma do processo, seleção de materiais e desenvolvimento do produto;
- Dados sobre a gestão ambiental e possíveis indicadores: ISO 14001- política, objetivos e indicadores ambientais;
- Dados gerais sobre o ciclo de vida do produto: software, fluxograma e lista de produtos; e
- Dados sobre o ciclo de vida conforme ISO 14044: objetivo, escopo, inventário, indicadores e relatórios

A abrangência da documentação pode diferir de uma empresa para outra, devido:

- Ao tamanho da organização e ao tipo de atividades;
- À complexidade dos processos de desenvolvimento de produto e suas interações; e
- Ao produto definido, considerando seus materiais e sua complexidade.

1. Dados da empresa:

Nome: _____

Endereço: _____

Home page: _____ E-mail institucional: _____

Ramo de atividade: _____

Código IAC: _____

Faturamento anual: _____ n° de funcionários: _____

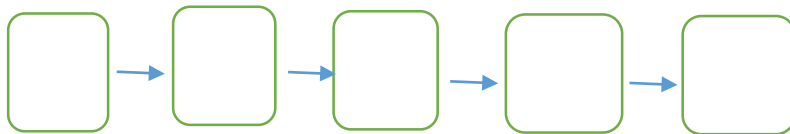
Contatos:

Nome

e-mail

Telefone

Nome	e-mail	Telefone

2. Desenvolvimento de produto e seleção de materiais**2.1. Fluxograma da empresa na área de DP.**

2.2. Em que fase do DP é feita a seleção de materiais?

Desenvolvimento conceitual Projeto preliminar Projeto detalhado

Outro _____

2.3. Qual o principal motivador na seleção de materiais?

Mercado Custo Disponibilidade de MP Propriedades técnicas

Requisitos ambientais Requisitos de segurança Outro _____

2.4. A empresa utiliza algum software no desenvolvimento do produto?

Não Sim Qual _____

2.5. A empresa utiliza algum software para a seleção de materiais?

Não Sim Qual _____

2.6. No desenvolvimento de um novo produto é considerado seu ciclo de vida, do berço ao túmulo (extração do material, fabricação, transporte, uso e disposição final)?

Não Sim Parcialmente

3. Gestão ambiental e indicadores

3.1. A empresa possui certificado ISO 9001?

Não Sim Qual versão: _____

3.2. A empresa possui uma política ambiental definida e difundida na organização? Qual?

Não Sim _____

3.3. A empresa possui objetivos ambientais? Quais?

Não Sim _____

3.4. Como a empresa monitora o cumprimento dos objetivos ambientais?

auditorias regulares análise crítica outro _____

3.5. A empresa possui indicadores de monitoramento e tomada de decisão, considerando os objetivos ambientais e a política ambiental?

Não Sim _____

3.6. Os indicadores são estruturados e permitem uma tomada de decisão eficaz?

Não Sim Evidência: _____

3.7. Os indicadores de desempenho ambiental são relevantes para a gestão ambiental da empresa? (ISO 14001:2016)

Não Sim Exemplifique: _____

3.8. A empresa possui indicadores relacionados à seleção de material?

Não Sim Exemplifique: _____

3.9. Através de quais indicadores a empresa considera os requisitos ambientais na seleção de materiais?

ACV Energia incorporada Pegada de carbono

Outros: _____

3.10. A empresa apresenta um relatório escrito contendo os resultados e conclusões da ACV?

() Não () Sim

3.11. A empresa possui algum indicador financeiro que permita concluir que as preocupações ambientais reforçam sua posição no mercado?

() Não () Sim Exemplifique: _____

4. Ciclo de Vida – dados gerais

4.1. Qual o software e/ou banco de dados utilizados pela empresa para fazer o inventário da ACV? _____

4.2. O fluxograma contendo os processos principal e secundário, pode ser utilizado para o estudo da energia incorporada e da pegada de carbono a ser realizado com o CES-Selector?

() Não () Sim () Parcialmente _____

4.3. O relatório da ACV possui valores claros e confiáveis de energia incorporada e pegada de carbono do produto durante seu ciclo de vida?

() Não () Sim () Parcialmente _____

4.4. Quais os produtos em que a empresa utilizou a ACV? Todos os componentes foram avaliados ou a empresa utilizou algum método de priorização?

Produto: _____

() Não () Sim () Pareto () ABC () Outro método _____

Produto: _____

() Não () Sim () Pareto () ABC () Outro método _____

Ciclo de Vida – ISO 14044:2009

5.1. O relatório contendo o estudo de ACV apresenta as fases de: (1) definição de objetivo e escopo; (2) análise de inventário; (3) avaliação de impactos e (4) interpretação dos resultados?

Não Sim Parcialmente _____

5.2. O escopo e os objetivos da ACV estão definidos de forma clara e facilmente compreensível?

Não Sim

5.3. A ACV desenvolvida apresenta evidências de melhoria no desempenho ambiental do produto em que foi aplicada, durante seu ciclo de vida?

Não Sim Exemplifique: _____

5.4. A ACV enfoca os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais (Ex. uso de recursos e as conseqüentes liberações para o meio ambiente) ao longo de todo o ciclo de vida do produto, do berço ao túmulo?

Não Sim Exemplifique: _____

5.5. O relatório contém fluxogramas que mostrem o processo principal, os processos complementares e suas interações?

Não Sim. Solicitar cópia.

5.6. O fluxograma apresentado mostra entradas e saídas de material e energia?

Não Sim Parcialmente _____

5.7. A empresa faz a AICV – Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida, relacionando-o ao ICV – Inventário do Ciclo de Vida?

Não Sim Parcialmente _____

5.8. O inventário apresenta dados confiáveis de energia, emissões, descargas, resíduos, transporte e recursos?

Não Sim Parcialmente _____

5.9. A AICV possui indicadores para as diferentes categorias de impacto definidas?

Não Sim Quais são as categorias? _____