

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPIRITO SANTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

THAIS AYRES REBELLO

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO PROCESSAMENTO DE LAMA DO
BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS: UM ESTUDO
COMPARATIVO COM AREIA, ARGILA E FÍLER**

VITÓRIA

2017

THAIS AYRES REBELLO

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO PROCESSAMENTO DE LAMA DO
BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS: UM ESTUDO
COMPARATIVO COM AREIA, ARGILA E FÍLER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia Ambiental.

Orientador: Dr. João Luiz Calmon
Nogueira da Gama

Coorientador: Dr. Ricardo Franci

VITÓRIA

2017

Dedico este trabalho aos meus pais:
Sérgio Ricardo Rebello Júnior e Leila
Rossiny Ayres Rebello que, desde o
meu primeiro dia, foram os maiores
mestres que encontrei.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Sérgio Ricardo Rebello Junior e Leila Rossiny Ayres Rebello, pelo incentivo ao longo desta jornada, apoio incondicional e amor;

Aos meus avós, Sérgio, Áurea, Lourdes, José e Vera pelo apoio e pelos ensinamentos ao longo de minha vida;

Ao Davi Monticelli, meu grande amor, pelo apoio e carinho, nos momentos mais difíceis e felizes deste ano;

À Larissa Aguiar, pela imensa amizade e palavras de carinho e incentivo;

Aos Drs. João Calmon e Ricardo Franci por terem aceito me orientar e pelas contribuições neste trabalho;

Ao Robson Zulcão pela orientação e apoio no desenvolvimento deste trabalho, que foram indispensáveis para a realização do mesmo;

À banca avaliadora que, com suas correções e observações, ajudaram a tornar este texto melhor;

Aos professores que participaram direta ou indiretamente desta conquista e que colaboraram na formação da profissional que me tornei;

À ACV Brasil pelo fornecimento do software e a CETR- AAMOL pelos dados de produção, sem os quais não seria possível realizar este trabalho.

RESUMO

REBELLO, T. A. Avaliação do ciclo de vida do processamento de lama do beneficiamento de rochas ornamentais: um estudo comparativo com areia, argila e fíler. Projeto de graduação - Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal Do Espírito Santo, Vitória, 138P. 2017.

Estima-se que a produção de rochas ornamentais aumente e que em 2020 a mesma seja equivalente a 170 milhões de toneladas. Por conseguinte, a geração do resíduo do processamento de rochas ornamentais, que representa cerca de 30% do material extraído, crescerá. A Lama do Beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO) não é biodegradável e não é disposta da maneira correta, dessa forma, diversas pesquisas estudam o reuso e a reciclagem deste resíduo. Embora opções recicladas e reutilizadas reduzam a quantidade de material descartado em aterros, nem sempre o impacto ambiental é menor que o da alternativa usual, sendo necessário realizar estudo aprofundado do mesmo, para a escolha da alternativa ambientalmente preferível. Este estudo tem como meta identificar se o processo de reciclagem da lama do beneficiamento de rochas ornamentais possui maior impacto ambiental que a areia, fíler e argila mediante do uso da Avaliação do Ciclo de Vida no software *SimaPro* 8.3. Os resultados desta pesquisa mostram que, não somente o resíduo apresenta melhor desempenho ambiental que as alternativas estudadas, como também que o uso de uma secadora artificial dos tipos *Flash dryer* e *Rotary dryer* após o processo é menos impactante que a extração e processamento da argila através de métodos de atomização. A análise de sensibilidade demonstrou que o input de energia não apresentou uma grande variação no impacto ambiental da LBRO, mas o input de maiores distâncias acarretou grande variação do impacto ambiental.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida, resíduo de rochas ornamentais, Argila, Areia, Fíler, Materiais Sustentáveis.

ABSTRACT

The production of ornamental rocks for 2020 is estimated to be 170 millions of tons. That means that the generation of the residue of ornamental stones processing, which represents 30% of the extracted material, will also increase. The ornamental stone waste is non-biodegradable and it is not disposed in the proper manner, hence, many researches study the reuse or recycling of this waste. Though recycled or reused options reduce the quantity of materials disposed in landfills, the environmental impact of this alternatives is not always the lower. This study has as a goal identify if the process of recycling of ornamental stone residue has lower impact than sand, clay and filler, through the application of Life Cycle Assessment in the software SimaPro. The results indicate that not only the waste has a lower impact, but also, the use of rotary and flash dryer after the process has a lower impact than clay dried through atomization. The sensibility analysis demonstrated that the input of energy did not presented a big variation in environmental impact of ornamental rocks residue, nevertheless the increase of the distances brought a large variation of the environmental impact.

Key-Words: Life Cycle Assessment, Ornamental Rocks' residue, Clay, Sand, Filler, Sustainable materials

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de rochas ornamentais.....	23
Figura 2 - Esquema de produção das rochas ornamentais.....	25
Figura 3 - Tear de lâminas metálicas (A) e tear de fio diamantado (B).....	26
Figura 4 - Fluxograma da relação entre as etapas de beneficiamento e resíduos gerados.....	27
Figura 5 - Diferentes tipos de extração de areia.....	35
Figura 6 – Processo de extração e beneficiamento do Fíller de calcário.....	38
Figura 7 – Triângulo da SETAC.....	45
Figura 8 – Etapas da ACV.....	46
Figura 9 – Elementos da AICV.....	52
Figura 10 - Temas prioritários para o melhoramento da ACV no Brasil.....	57
Figura 11 – Metodologia de análise de impacto (ReCiPe).....	60
Figura 12 – Processo produtivo da areia.....	68
Figura 13 – Processo de produção da argila.....	73
Figura 14 – Distância da lavra até a fábrica de argila.....	74
Figura 15 – Processo produtivo do fíller calcário.....	77
Figura 16 – Processo de beneficiamento da LBRO da CTR-AAMOL.....	80
Figura 17 – Resultados obtidos para a ACV da Areia, Argila, Fíller e LBRO – Normalização.....	93
Figura 18 – Resultados obtidos para a ACV da Areia, Argila, Fíller e LBRO – Normalização (ecotoxicidade marinha e aquática).....	94

Figura 19 – Resultados obtidos para a ACV da Areia, Argila, Fíler e LBRO – <i>Single Score</i>	94
Figura 20 – Resultados da ACV da Argila e LBRO – normalização.....	98
Figura 21 – Resultados da ACV da Argila e LBRO – normalização.....	99
Figura 22 – Resultado da ACV da Argila e LBRO – <i>Single Score</i>	100
Figura 23 – Resultado da ACV da LBRO – Normalização.....	103
Figura 24 – Resultados da ACV da LBRO – Normalização.....	103
Figura 25 – Resultado obtido para LBRO – <i>Single Score</i>	104
Figura 26 – Resultado da análise de sensibilidade da areia – <i>Single Score</i>	107
Figura 27 – Resultados obtidos para análise de sensibilidade da Argila – <i>Single Score</i>	109
Figura 28 – Resultado da análise de sensibilidade do fíler (<i>Single Score</i>).....	110
Figura 29 – Resultado da análise de sensibilidade da LBRO para Vitória	112
Figura 30 – Resultado da análise de sensibilidade da LBRO – Vila Velha.....	113
Figura 31 – Resultado da análise de sensibilidade da LBRO – Serra.....	114
Figura 32 – Resultado da Análise de sensibilidade da LBRO – Cariacica.....	115
Figura 33 – Resultado da análise de sensibilidade quanto ao input de energia.....	116
Figura 34 – Resultado da análise de sensibilidade quanto ao input de energia – LBRO.....	116
Figura 35 – Impacto total da LBRO – <i>Single Score</i>	120

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Aplicação de lama do beneficiamento de rochas ornamentais.....	32
Quadro 2 - Ferramentas de análise de impacto e suas descrições.....	40
Quadro 3 – Evolução das normas ISO para ACV.....	47
Quadro 4 – Diferentes bancos de dados utilizados na ICV.....	50
Quadro 5 – Principais Ferramentas de AICV utilizadas.....	53
Quadro 6 – Softwares utilizados na ACV.....	54
Quadro 7 – Exemplos de aplicação da ACV.....	55
Quadro 8 – Localização dos processos de manufatura da areia, argila, fíler e LBRO.....	61
Quadro 9 – Detalhamento do escopo do trabalho.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção teórica mundial de rochas ornamentais.....	24
Tabela 2 - Composição química do LBRO D e a LBRO G.....	29
Tabela 3 - Caracterização física da LBRO.....	29
Tabela 4 – Distâncias dos diferentes setores à CETR – AAMOL.....	63
Tabela 5 – Dados de entrada da areia extraída por dragagem por m ³ de areia.....	69
Tabela 6 - Dados de entrada do processo de extração (dragagem) da areia por kg de areia.....	70
Tabela 7 – Dados de entrada do processo de beneficiamento da areia, extraída através de dragagem.....	71
Tabela 8 - Dados de entrada do processo de estocagem (secagem) da areia por kg de areia.....	71
Tabela 9 – Dados de entrada utilizados na modelagem da areia de cava submersa.....	72
Tabela 10 – Dados de entrada da extração de argila em mina cativa.....	73
Tabela 11 – Dados de entrada da extração de argila em pequena lavra não cativa.....	75
Tabela 12 – Dados de entrada da argila, cenário intermediário.....	76
Tabela 13 – Dados de entrada, moagem da argila (cenário intermediário).....	77
Tabela 14 – Dados de entrada para atomização da argila (cenário intermediário).....	77
Tabela 15 – Relação dos moinhos utilizados para moagem do fíler e suas respectivas potências.....	79

Tabela 16 – Propriedades da LBRO.....	81
Tabela 17 – Dados de entrada do sedimentador e bomba de recalque da LBRO.....	82
Tabela 18 – Dados do filtro prensa CTR-AAMOL.....	82
Tabela 19 – Dados dos motores adicionais CTR AAMOL.....	83
Tabela 20 – Dados de entrada no SimaPro Secagem da Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais.....	84
Tabela 21 – Dados de entrada da secagem ao ar livre e destorroamento, LBRO.....	84
Tabela 22 – Dados de entrada da Rotary dryer (LBRO).....	85
Tabela 23 – Dados de entrada da <i>flash dryer</i>	86
Tabela 24 – Dados de entrada do spray dryer (LBRO).....	86
Tabela 25 – Dados de input utilizados no SimaPro.....	87
Tabela 26 – Resultados da ACV para Areia, Argila, Fíler e LBRO – Caracterização.....	92
Tabela 27 – Comparação entre os impactos da Areia, Fíler, Argila e LBRO – Single score.....	96
Tabela 28 – Resultados da comparação entre LBRO e Argila – caracterização.....	97
Tabela 29 – Resultados da comparação da Argila e LBRO com a LBRO seca no Flash Dryer.....	101
Tabela 30 – Resultados da ACV para LBRO – caracterização.....	101
Tabela 31 – Comparação entre as alternativas de LBRO e a Secagem natural e destorroamento.....	105

Tabela 32 – Representação de cada etapa no impacto total da LBRO.....	105
Tabela 33 – Distâncias de envio da areia.....	106
Tabela 34 – Resultado da análise de sensibilidade da areia – <i>Single Score</i>	108
Tabela 35 – Distâncias utilizadas na análise de sensibilidade da argila.....	108
Tabela 36 – Distâncias utilizadas na análise de sensibilidade do fíler.....	110
Tabela 37 – Distâncias de transporte da LBRO tratada.....	111
Tabela 38 – Comparação entre a LBRO proveniente da Serra e Cachoeiro de Itapemirim com areia, argila e fíler.....	121

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Avaliação Do Ciclo De Vida
AICV	Avaliação De Impacto De Ciclo De Vida
AAMOL	Associação Ambiental Monte Líbano
CETR	Central De Tratamento De Resíduos
EA	<i>Environmental Auditing</i> – Auditoria Ambiental
EIA	<i>Environmental Impact Assessment</i> - Análise De Impacto Ambiental
EPA	<i>Protection Agency</i> – Agência De Proteção Ambiental Americana
GANAA	Grupo De Apoio À Normatização Ambiental
IBICT	Instituto Brasileiro De Informação Em Ciência E Tecnologia
ISO	<i>International Organization For Standardization</i> – Organização Internacional De Normatização
LBRO	Lama Do Beneficiamento De Rochas Ornamentais
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i> – Avaliação Do Ciclo De Vida
LCI	<i>Life Cycle Inventory</i> – Inventário De Ciclo De Vida
LCIA	<i>Life Cycle Inventory Analysis</i> – Avaliação De Impacto Do Ciclo De Vida
MFA	<i>Material Flux Assessment</i> – Análise De Fluxo De Material
MIPS	<i>Material Intensity Per Unit Service</i> – Intensidade De Material Por Unidade De Serviço
OPEC	Organização De Exportadores Árabes De Petróleo

REPA *Resource And Environmental Profile Analysis* – Análise De Recursos E Perfil Ambiental

SIVC Banco Nacional De Inventários Do Ciclo De Vida

SETAC *Society Of Environmental Toxicology And Chemistry* – Sociedade De Química E Toxicologia Ambiental

SFA *Substance Flux Analysis* – Análise De Fluxo De Substância

TMR *Total Material Requirement* – Requerimento Total De Material

UNEP *United Nations Environment Programme* – Programa Ambiental Das Nações Unidas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	19
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo Geral	20
1.2.2. Objetivos específicos	20
1.3 QUESTÕES DE PESQUISA	20
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2. ROCHAS ORNAMENTAIS	23
2.1 PROCESSO PRODUTIVO DE ROCHAS ORNAMENTAIS	25
2.2 RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO	27
2.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA	28
2.4 IMPACTOS AMBIENTAIS DA LBRO	30
2.5 TRATAMENTO DA LBRO	31
2.6 APLICAÇÃO DO LBRO	31
3. MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	34
3.1 AREIA	34
3.2 ARGILA	36
3.3 FÍLER	37
4. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	40
4.1 DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DA ACV	42
4.2 NORMATIZAÇÃO DA ACV	46
4.3 METODOLOGIA DA ACV	48
4.3.1 Definição de objetivo e escopo	48
4.3.2 Análise de inventário	49
4.3.3 Análise de impacto	51
4.3.4 Interpretação	54
4.4 SIMAPRO	54
4.5 APLICAÇÃO DA ACV	55
4.6 A ACV NO BRASIL	56
5. METODOLOGIA	59
5.1 COLETA DE DADOS	59
5.2 BANCO DE DADOS	59

5.3 FERRAMENTA COMPUTACIONAL UTILIZADA	59
5.4 MÉTODO DE ANÁLISE DE IMPACTO	59
5.5 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE.....	61
5.5.1 Análise de sensibilidade quanto às distâncias	61
5.5.2 Análise de sensibilidade quanto à inserção de energia no sistema	61
6. APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO	63
6.1 DEFINIÇÃO DO ESCOPO E OBJETIVO.....	64
6. LIMITAÇÕES DESTE ESTUDO	65
7. ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA	68
7.1 AREIA (DRAGAGEM)	68
7.1.1 Extração	69
7.1.2 Beneficiamento	70
7.1.2 Estocagem	71
7.2 AREIA (CAVA SUBMERSA)	71
7.3 ARGILA (MINA CATIVA)	72
7.3.1 Extração	73
7.3.2 Transporte	74
7.3.3 Moagem e atomização	75
7.4 ARGILA (LAVRA DE MÉDIO PORTE)	75
7.4.1 Extração	75
7.4.2 Transporte	76
7.4.3 Moagem e atomização	76
7.5 ARGILA – EXTRAÇÃO INTERMEDIÁRIA.....	76
7.5.1 Moagem	76
7.5.2 Atomização	77
7.6 FÍLER.....	77
7.6.1 Extração	78
7.6.2 Britagem	78
7.6.3 Moagem	79
7.7 LAMA DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS	80
7.7.1 Geração e transporte	80
7.7.2 Secagem em filtro prensa	81
7.7.3 Secagem ao ar livre e destorroamento	84
7.7.4 Secagens artificiais	85

7.8 INPUTS UTILIZADOS NO SIMAPRO	86
8. ANÁLISE DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA.....	92
8.1 COMPARAÇÃO ENTRE AREIA, ARGILA, FÍLER CALCÁRIO E LAMA DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS	92
8.2 COMPARAÇÃO ENTRE LBRO E ARGILA	96
8.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE LBRO	101
8.4 ETAPAS DO PROCESSO DE MANUFATURA DA LBRO	105
8.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE QUANTO ÀS DISTÂNCIAS.....	106
8.5.1 Areia.....	106
8.5.2 Argila	108
8.5.3 Fíler	109
8.5.4 Lama do beneficiamento de rochas ornamentais	110
8.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE QUANTO AO INPUT DE ENERGIA.....	115
9. INTERPRETAÇÃO	119
10. CONCLUSÕES.....	124
10.1 SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS.....	125
11. REFERÊNCIAS	127
11.1 BIBLIOGRAFIA CITADA	127
11.2 NORMAS, LEIS E DECRETOS	137
11.3 BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	138

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

‘Would you tell me, please, which way I ought to go from here?’

‘That depends a good deal on where you want to get to’

Lewis Carrol

1. INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Segundo Montani (2014; apud ABIROCHAS, 2014), a produção mundial de rochas ornamentais em 2014 foi de 130 milhões de toneladas, equivalentes à 48 milhões de metros cúbicos e que movimentaram 130 bilhões de dólares. O autor destaca ainda que as projeções de consumo indicam aumento da demanda por materiais rochosos naturais e artificiais para revestimento. Estima-se que em 2020 a produção mundial de rochas ornamentais ultrapassará 170 milhões de toneladas (ABIROCHAS, 2014). Cabe salientar que, a produção brasileira estimada para o ano de 2013 foi de 10,5 milhões de toneladas. (ABIROCHAS, 2014; ABIROCHAS 2015).

Com o aumento da produção de rochas, têm-se também o aumento dos resíduos gerados na etapa de beneficiamento das mesmas. Gonçalves (2000) cita que em torno de 25 a 30% das rochas são transformadas em pó, que é misturado com água e outros componentes e transforma-se em uma lama acinzentada (BASTOS *et al.*, 2013). O resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais é um material não biodegradável e é disposto na natureza sem os processos adequados. Ademais, trata-se de um resíduo não inerte, que apresenta solubilidade em água. Dessa forma, os resíduos encontram o sistema hídrico como rios e lagos e causam poluição e danos ambientais.

Devido ao custo de transporte e destinação correta e, aos impactos causados pelo grande volume produzido de resíduos, diversas pesquisas estudam a sua reutilização ou reciclagem do resíduo na construção civil (ULIANA *et al.*, 2015). No entanto, deve-se salientar que nem sempre a reutilização/reciclagem de resíduos é ambientalmente preferível e que, um estudo aprofundado dos impactos do processamento da Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO) e de sua inserção nos materiais de construção deve ser realizado. Para realizar tal tarefa, diversas ferramentas estão disponíveis, mas a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta orientada a produto, que analisa os impactos ao longo do ciclo de vida (UNEP, 1996). Baitz *et al.* (2012)

reconhecem a ACV como uma ferramenta confiável, científica e inteligível para abordar a sustentabilidade ambiental das atividades humanas.

Por fim, este trabalho dedica-se à avaliação do berço ao portão (*cradle-to-gate*) dos impactos ambientais do processamento da lama gerada nos teares de rochas ornamentais, com intuito de comparar com os produtos que a Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO) pode substituir nos materiais de construção, entre os quais destacam-se: areia, argila e fíler.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o impacto ambiental do processo de reciclagem da Lama do Beneficiamento de Rochas ornamentais (LBRO) e efetuar a comparação com o processo produtivo da areia, argila e fíler, utilizando a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida.

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar revisão bibliográfica;
- Efetuar a coleta de dados de primeira mão para a LBRO e Fíler;
- Efetuar a análise de inventário dos processos produtivos da LBRO, areia, argila e fíler.
- Determinação dos cenários de avaliação;
- Identificar os processos mais impactantes da ACV do beneficiamento da LBRO;
- Analisar a sensibilidade quanto às distâncias de transporte da LBRO tratada.
- Analisar a sensibilidade quanto ao consumo de energia no processo de beneficiamento da LBRO;

1.3 QUESTÕES DE PESQUISA

Esta pesquisa busca responder se a LBRO é ambientalmente preferível em relação à areia, argila e Fíler calcário. Outras questões importantes são:

- Como a inserção de energia no processo afeta o impacto ambiental final gerado;
- Como o transporte afeta o impacto final gerado.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 1 traz a introdução ao trabalho e consta da justificativa e relevância, dos objetivos gerais e específicos, das questões de pesquisa e da estrutura do trabalho.

O segundo capítulo se refere às rochas ornamentais e mostra a pesquisa referente ao processo produtivo de rochas ornamentais, ao resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, a caracterização físico-química da LBRO, os impactos gerados pela disposição da LBRO, o tratamento da LBRO e a sua possível aplicação em materiais de construção.

O terceiro capítulo discorre sobre os processos produtivos da areia, argila e do fíler e o quarto capítulo traz a revisão bibliográfica sobre a avaliação do ciclo de vida: desenvolvimento histórico da ACV, normatização da metodologia, metodologia da ACV, programa SimaPro, aplicação da ACV e a ACV no Brasil.

O Quinto capítulo traz a metodologia do trabalho: como foi efetuada a coleta de dados, qual banco de dados foi utilizado bem como a ferramenta computacional e o método de análise de impacto.

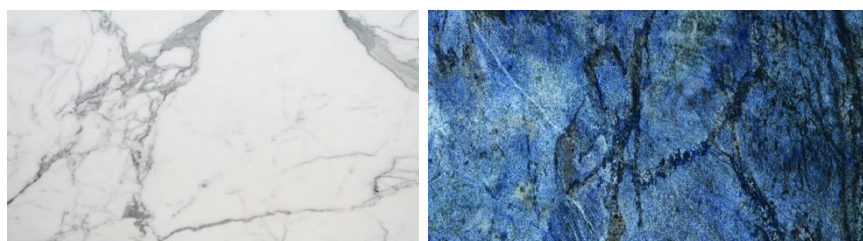
O Capítulo 6 traz a apresentação do estudo de caso, apresentando a CETR – AAMOL e o capítulo 7 disserta sobre o escopo e objetivo do trabalho, bem como as limitações da análise. O capítulo 8 traz a análise do inventário utilizado no estudo, para cada um dos cenários utilizados. O capítulo 9 traz os resultados da análise de impacto realizada e o capítulo 10 discorre sobre a interpretação dos resultados obtidos. Por fim, nos capítulos 11 e 12, faz-se a conclusão e a sugestão de estudos futuros, respectivamente.

CAPÍTULO 2 – ROCHAS ORNAMENTAIS

2. ROCHAS ORNAMENTAIS

Segundo Moraes (2006), rochas ornamentais são provenientes de maciços rochosos e matacões que são beneficiadas e transformam-se em placas cortadas e polidas conforme a necessidade da aplicação. As rochas ornamentais podem ser divididas em dois tipos: rochas de origem carbonática, que possuem menor dureza como os mármore (Figura 1) e travertinos; e, de origem silicática, com maior dureza, como o granito (Figura 1) e quartzitos (ALENCAR, 2013). As rochas ornamentais são especialmente utilizadas para construção, arquitetura, monumentos e esculturas (MOREIRA; MANHÃES; HOLANDA, 2008).

Figura 1 - Exemplos de rochas ornamentais (Mármore – esquerda; Granito – direita)



Fonte: SARDOU FILHO, 2013

A produção mundial noticiada de rochas ornamentais e de revestimento era de 1,8 milhão de toneladas por ano na década de 20. Já nas décadas de 1980 e 1990, conhecidas como a “idade da pedra”, o setor de rochas ornamentais se caracterizou como uma das mais importantes áreas emergentes de negócios minero-industriais. Em 2014, a produção mundial chegou a 130 milhões de toneladas, equivalentes a 48 milhões de metros cúbicos. Ademais, o setor movimentou cerca de US\$ 130 bilhões (MONTANI, 2014 apud ABIROCHAS, 2014).

Outrossim, as projeções de consumo sugerem um aumento da demanda por materiais rochosos naturais e artificiais para revestimento. Estima-se que no ano de 2020, a produção mundial de rochas ornamentais ultrapassará 170 milhões de toneladas, ou 2 bilhões de metros quadrados por ano, com aumento de 30% no volume físico das atuais transações internacionais (ABIROCHAS, 2014).

O percentual de rochas silicáticas no total da produção evoluiu de 10% em 1920 para 40% em 2014, devido ao desenvolvimento de tecnologias mais adequadas

para a lavra e beneficiamento. O Brasil foi um dos países de destaque neste crescimento, já que o mesmo colocou centenas de novos granitos no mercado internacional na década de 1980 (MONTANI, 2014 apud ABIROCHAS, 2014).

A produção estimada de rochas ornamentais no Brasil foi de 10,5 milhões de toneladas em 2013 e abrangeu uma grande tipologia de rochas, tais quais: granitos, mármore, quartzitos, ardósia, pedra-sabão, metaconglomerados, serpentinitos, travertino, calcário e outros tipos comercializados nos mercados interno e externo (ABIROCHAS, 2014; ABIROCHAS 2015). A tabela 1 mostra a produção teórica de rochas ornamentais dos maiores produtores do mundo.

Tabela 1 - Produção teórica mundial de rochas ornamentais

Países	1996		2013		Variação de 2013/2012 (%)
	1.000t	Participação (%)	1.000t	Participação (%)	
China	7500	16,1	39500	30,4	526,7
Índia	3500	7,5	19500	15,0	557,1
Turquia	900	1,9	12000	9,2	13333,0
Brasil	1900	4,1	9000	6,9	473,7
Itália	8250	17,7	7000	5,4	84,8
Iran	2500	5,4	6500	5,0	260,0
Espanha	4250	9,1	5000	3,8	117,6
Egito	1000	2,2	3000	2,3	300,0
EUA	1350	2,9	2750	2,1	203,7
Portugal	1950	4,2	2650	2,0	135,9
Grécia	1800	3,9	1250	1,0	89,4
Arábia Saudita	250	0,5	1200	0,9	480,0
França	1150	2,5	1050	0,8	91,3
Paquistão	200	0,4	1000	0,8	500,0
Subtotal	36500	78,5	111400	85,7	305,2
Outros	10000	21,5	18600	14,3	186,0
Total mundial	46500	100,0	130000	100,0	279,6

Fonte: Montani (2014 p. 3, apud ABIROCHAS, 2014).

A produção brasileira em 2014 foi de 6,7 milhões de toneladas e 3,4 milhões de toneladas, comercializadas no mercado interno e externo, respectivamente (MONTANI, 2014 apud ABIROCHAS, 2014). Em Janeiro de 2015, as exportações brasileiras de rochas ornamentais e de revestimento somaram USD 66,7 milhões e 123.674,24 toneladas, representando aumento de 2,13% no

faturamento e perda de 7,1% da produção, comparando-se com o mesmo mês de 2014 (ABIROCHAS 2015).

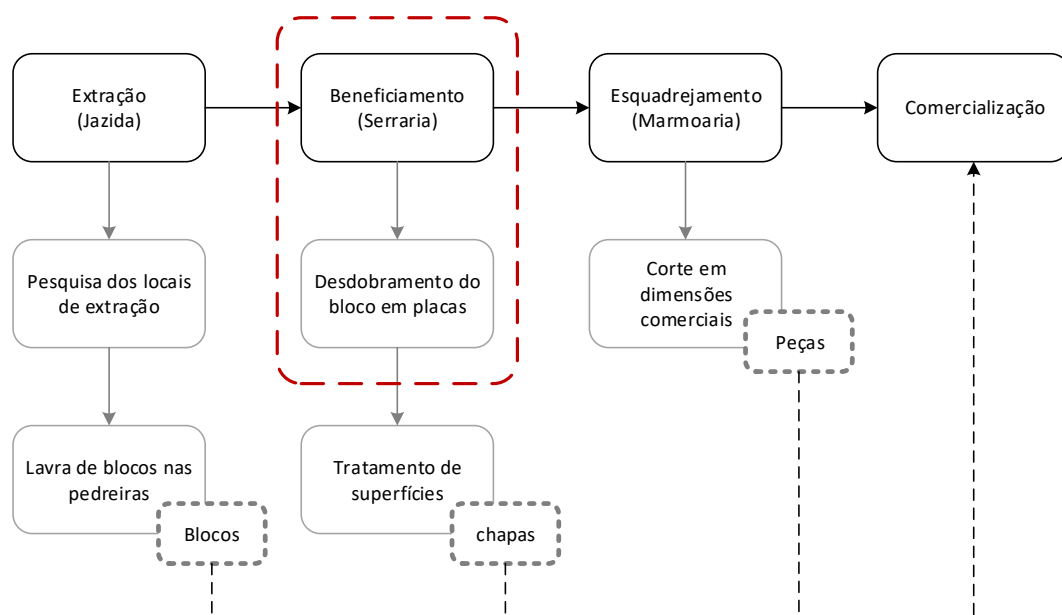
Mais de 90% dos investimentos do parque industrial brasileiro do setor de rochas ornamentais são efetivados no Espírito Santo, considerado líder na produção nacional de rochas. O setor de rochas ornamentais emprega cerca de 130 mil capixabas e possui por volta de 900 teares com capacidade para extrair 52 milhões de metros quadrados de chapas, o que representa cerca de 57% da capacidade nacional (SARDOU FILHO *et al.*, 2013).

O setor de rochas ornamentais possui dois núcleos principais no Espírito Santo: em Cachoeiro de Itapemirim e na região noroeste, em torno de Nova Venécia, Ecoporanga e Barra de São Francisco (SARDOU FILHO *et al.*, 2013). Ademais, o Espírito Santo em conjunto com Minas Gerais, Bahia, Ceará e Rio Grande do Norte realizaram vendas superiores a US\$ 10 milhões. Sendo o Espírito Santo correspondente à 75% do volume físico e 81% do total de faturamento das exportações brasileiras (ABIROCHAS, 2017).

2.1 PROCESSO PRODUTIVO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

O processo produtivo das rochas ornamentais é descrito na figura 2.

Figura 2 - Esquema de produção das rochas ornamentais



Fonte: Adaptado de Gonçalves (2000)

Segundo Gonçalves (2000), a primeira etapa de produção de rochas ornamentais é a pesquisa e definição dos locais de extração dos blocos, seguida da retirada dos mesmos. Na etapa de extração, gera-se o resíduo da lavra, isto é, pedaços de rochas não aproveitados ou rochas fissuradas. Após a extração, os blocos cortados com volumes de 5-10 m³ são transportados para as beneficiadoras (BASTOS *et al.*, 2013).

Após a extração os blocos de rochas ornamentais passam por um processo de transformação em chapas ou placas semi-acabadas, com espessuras que variam de 1 a 3 cm, mediante ao uso de teares que podem ser de dois tipos: lâminas metálicas ou fios diamantados (Figura 3) (BASTOS *et al.*, 2013; ULIANA, 2014).

Figura 3 - Tear de lâminas metálicas (A) e tear de fio diamantado (B)



(A)



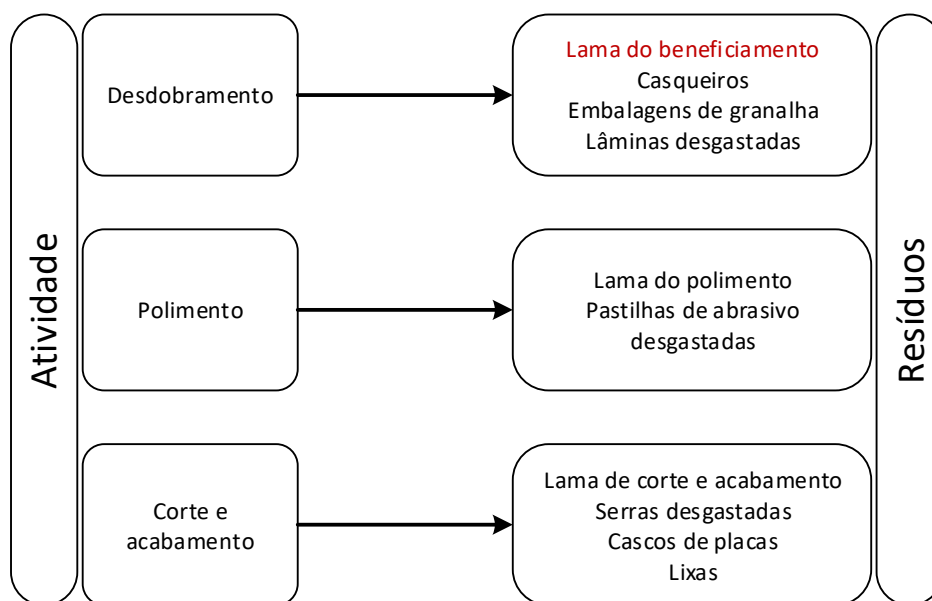
(B)

Fonte: Grupo Ventowag [s.d]

Gonçalves (2000) cita que após a serragem ocorre o descarregamento do tear, tendo como produto a chapa bruta serrada com espessura de 20 mm e as mesmas são encaminhadas para o acabamento, onde a chapa é polida na politriz até o nível de acabamento necessário. Neste processo gera-se um resíduo, denominado resíduo de acabamento.

A figura 4 traz um fluxograma que relaciona as atividades de beneficiamento com os resíduos gerados em cada atividade.

Figura 4 - Fluxograma da relação entre as etapas de beneficiamento e resíduos gerados



Fonte: Adaptado de Buzzi, 2008

2.2 RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO

A Lei 12.305 (BRASIL, 2010. Art 3º), define resíduos sólidos como:

(...) material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Mediante do uso de ensaios de lixiviação e testes do pH da LBRO, Buzzi (2008) classificou a LBRO de acordo com a NRB 10.004:2004, isto é, em perigosos (Classe I) e não perigosos (Classe IIA e Classe IIB – não inertes e inertes, respectivamente). Buzzi obteve como resultado que 75% das amostras testadas foram classificadas como Classe IIA, mediante do uso da metodologia descrita na NBR 10.006:2004.

Segundo Uliana (2014), o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais é classificado e separado de acordo com sua composição. Dessa forma, tem-se a Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais contendo granelha (LBRO G),

proveniente do corte com teares tradicionais e a Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais sem granalha (LBRO D) proveniente do corte com fio diamantado (ULIANA *et al.*, 2013)

Cabe salientar que em torno de 20 a 30% das rochas são transformados em pó no processo de serragem das mesmas (FREIRE; MOTTA, 1995; GONÇALVES, 2000), este resíduo é misturado com água e outros componentes, transformando-se em uma lama acinzentada (BASTOS *et al.*, 2013). Estima-se que no Brasil gera-se 1.600.000 toneladas por ano de resíduos apenas na etapa de desdobramento das rochas ornamentais (ULIANA *et al.*, 2013).

2.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA

Segundo Sardou Filho (2013), a composição das rochas ornamentais é variável, por exemplo: as rochas denominadas granitos são ricas em silicatos, possuindo mais de 65% de sílica em sua composição. Por outro lado, os mármore possuem calcita e dolomita como principais componentes. Uliana (2014) acrescenta que a composição química do resíduo de rochas ornamentais é decorrente do perfil de produção das empresas de onde o material é coletado.

Uliana (2014) cita que no Espírito Santo usualmente as empresas de rochas ornamentais atuam com blocos de diferentes origens e não separam o resíduo de acordo com a classificação do tipo de rocha, somente quanto à presença ou não de granalha. No entanto, as propriedades dos resíduos provenientes do tear tradicional e do tear diamantado são bastante semelhantes, excetuando-se as micro-fagulhas de aço (ULIANA *et al.*, 2013).

Uliana *et al.* (2013) realizaram a coleta da LBRO em uma empresa da grande Vitória, segundo a especificação da norma de amostragem (NBR 10007:2004) e verificaram a composição química das tipologias de LBRO pelo método de fluorescência de raios X. Outrossim, Santos, Destefani e Holanda (2013) investigaram a caracterização química dos resíduos de diferentes etapas do beneficiamento através da espectroscopia de raios-X de energia dispersiva (EDX) (Tabela 2).

Tabela 2 - Composição química do LBRO D e a LBRO G

Referência	Uliana <i>et al.</i> (2013)		Santos, Destefani e Holanda (2013)	
Metodologia	Fluorescência de raios X		Espectroscopia de raio X (EDX)	
Tipo de LBRO	LBRO G	LBRO D	LBRO G	LBRO D
FE ₂ O ₃	7,57%	3,79%	8,06%	-
SiO ₂	63,75%	66,80%	53,52%	92,06%
Al ₂ O ₃	14,55%	13,50%	19,41%	3,26%
CaO	3,72%	3,44%	6,89%	1,07%
MgO	0,31%	0,93%	-	-
TiO ₂	0,22%	0,16%	0,82%	-
Na ₂ O	3,58%	3,50%	-	-
K ₂ O	5,01%	3,83%	8,61%	0,93%
P ₂ O ₅	0,07%	0,07%	-	-
SO ₃	0,06%	0,06%	1,57%	1,73%
PF	0,69%	3,50%	-	-

LBRO G: Lama do beneficiamento de rochas ornamentais com gralha LBRO D: Lama do beneficiamento de rochas ornamentais sem gralha

Fonte: Elabordo pela autora

Além disso, Uliana *et al.* (2013) realizaram a averiguação das características físicas dos diferentes tipos de LBRO, os resultados estão demonstrados na tabela 3

Tabela 3 - Caracterização física da LBRO

Ensaio	LBRO G	LBRO D
Umidade (como recebido)	34,44%	38,27%
Massa específica	2,4804 g/cm ³	2,5253 g/cm ³
Massa unitária	814,850*10 ³ kg/m ³	766,284*10 ³ kg/m ³
Finura - Permeabilidade ao ar	7277,8 cm ² /g	6179,3 cm ² /g
Finura - Peneira 75 µm (nº 200)	8,56%	3,08%
Finura - Peneira 44 µm (nº 325)	18,00%	7,00%

LBRO G: Lama do beneficiamento de rochas ornamentais com gralha LBRO D: Lama do beneficiamento de rochas ornamentais sem gralha

Fonte: Uliana *et al.* 2013 (p.5)

Cabe salientar que a lama gerada pelo processamento de rochas ornamentais, com ou sem gralha possui grande potencial, podendo ser reutilizada desde materiais de construção (ULIANA *et al.*, 2015) até correção de solo ácido (RAYMUNDO *et al.*, 2013).

2.4 IMPACTOS AMBIENTAIS DA LBRO

O resíduo das rochas ornamentais é classificado como não perigoso e não inerte (MANHÃES; HOLANDA, 2008; BUZZI, 2008) e é um potencial poluidor do meio ambiente (SILVA; PAES; HOLANDA, 2011). Moreira, Manhães e Holanda (2008) destacam que o resíduo de rochas ornamentais é um material não biodegradável e que vem sendo disposto no meio ambiente sem processos adequados. Nas regiões onde há o processamento de rochas ornamentais, os resíduos provenientes da atividade podem contaminar os rios e o solo (SILVA, 1998; MOREIRA, MANHÃES; HOLANDA, 2008).

Por outro lado, Silva (2011) discorre que os materiais beneficiados pelo setor de rochas ornamentais são utilizados em edificações sem apresentar periculosidade, e que o processo de beneficiamento é aparentemente limpo. Dessa forma, os resíduos gerados se assemelham aos resíduos de construção civil e urbana. O autor afirma que culturalmente no Brasil esses resíduos são considerados de baixa impacto ao meio ambiente, o que torna comum o uso de depósitos de lama a céu aberto e sem revestimento de fundo, com as águas da lama infiltrando o solo ou direcionadas para corpos d'água superficiais, comprometendo a qualidade das mesmas, através do aumento da turbidez e cor (SILVA, 2011).

Silva (2011) destaca que o setor produtivo, o órgão de controle ambiental estadual Instituto Estadual do Meio ambiente (IEMA) e alguns órgãos municipais somaram esforços desde 2005 para minimizar os impactos causados, implementando principalmente aterros industriais específicos para dar destino adequado aos resíduos de rochas ornamentais.

No entanto, deve-se salientar que o aterro industrial não é a solução definitiva e nem deve ser considerada única. Silva (2011) discorre que as áreas licenciadas têm em média uma vida útil de 10 anos e o processo de planejamento, licenciamento e construção de um aterro é demorado. Ademais, a destinação final em aterro não agrega valor aos resíduos de imediato.

Uliana *et al.* (2015), destacam que devido aos custos do transporte, destinação correta do resíduo e ao impacto ambiental que pode ser causado pelo grande

volume processado, diversos estudos vem sendo realizados examinando o potencial do reuso e reciclagem do mesmo na construção civil. Para que isso ocorra, o resíduo precisa ser desidratado, já que, o mesmo possui de 20 a 30% de umidade (BUZZI, 2008).

2.5 TRATAMENTO DA LBRO

Buzzi (2008) destaca que o armazenamento temporário da LBRO nas empresas de beneficiamento, usualmente ocorrem nas estruturas de tratamento. Dessa forma, as empresas que utilizam os tanques escavados no solo para desidratação das lamas, também os utilizam para o armazenamento temporário, até a disposição final, o que também ocorre nos leitos de secagem.

Para empresas que utilizam os sedimentadores de fluxo horizontal, as lamas são enviadas para o tanque escavado no solo e, a posteriori, para a disposição final.

Outra possibilidade é a existência do filtro-prensa que desidrata as lamas que são enviadas diretamente para aterros industriais, logo após o armazenamento temporário. A autora destaca ainda que o sistema que combina sedimentador de fluxo vertical e filtro-prensa é mais eficiente que os demais, embora apresente alto custo de instalação (BUZZI, 2008).

2.6 APLICAÇÃO DO LBRO

Moreira, Manhães e Holanda (2008) observaram as características de cerâmica vermelha após a inserção de 20% da LBRO. Os autores identificaram as características físicas e mecânicas do material produzido e observaram que o resíduo de rochas ornamentais é um material polimérico não plástico, rico em quartzo, feldspato, calcita e outros materiais. Como resultado, o estudo apresenta que o resíduo de rochas ornamentais é adequado para inserção em cerâmica vermelha.

Uliana *et al.* (2015) identificaram o desempenho da LBRO após tratamento térmico e moagem, baseando-se no potencial de aplicação como substituto parcial do cimento. Os autores caracterizaram, fundiram e moeram o resíduo para produção de material vítreo e analisaram o desempenho mecânico e a atividade pozolânica com substituição parcial do cimento pelo resíduo na

condição natural e após tratamento térmico. Os resultados foram positivos e verificou-se que após o tratamento o resíduo possui características de pozolanicidade. Diversos estudos são realizados com a inserção da lama em materiais de construção, o quadro 1 apresenta exemplos destes.

Quadro 1 – Aplicação de lama do beneficiamento de rochas ornamentais

Produto/aplicação	Descrição	Referência
Porcelana	O estudo substituiu porcentagens do feldspato natural utilizado em porcelanas até 35%. Obteve como resultado que pode-se substituir até 10% do feldspato natural sem que haja perda das propriedades da porcelana.	(SILVA; PAES; HOLANDA, 2011)
Produção de fibras de isolamento acústico	Os autores realizaram a mistura resíduo de corte de granito, bórax, carbonato de cálcio, e óxido de magnésio para obter uma lâ vitrea e observaram que, embora seja possível realizar a fabricação do produto, é necessário misturar o resíduo com outras matérias primas.	(ALVES <i>et al.</i> , 2015)
Azulejos	Os autores adicionaram até 47,5% de resíduo e realizaram os procedimentos padrões de fabricação. O estudo apresenta como conclusão que a adição de 47,5% de LBRO traz melhora nos azulejos em menores temperaturas.	(SOUZA; PINHEIRO; HOLANDA, 2010)
Correção da acidez do solo	O estudo utilizou amostras de solo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico e três materiais testados em quatro diferentes níveis (75, 100, 150, 300% e testemunha) de uma recomendação padrão de correção de solo. Percebeu-se que os resíduos apresentaram bom potencial para utilização como corretor da acidez, com reatividade inicial superior à do calcário comercial.	(RAYMUNDO <i>et al.</i> , 2013)
Concretos	Os autores substituíram de 0-15% do cimento pelo resíduo para avaliar as propriedades dos concretos produzidos. O estudo demonstrou que o teor de 5% apresentou os melhores resultados	(DEGEN <i>et al.</i> , 2013)

Fonte: Elaborado pela autora

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

3. MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

3.1 AREIA

Segundo MME (2009), a produção de areia é um setor básico na cadeia da indústria da construção civil e caracteriza-se pela produção de grandes volumes. O transporte corresponde a dois terços do preço da areia, o que destaca a importância de produzir a areia próxima a aglomerados urbanos.

A areia pode se apresentar na forma de sedimento não consolidado ou sofrer um processo de litificação que gera rochas areníticas, no primeiro caso, a areia é encontrada nos leitos de rios atuais e nas planícies e terraços aluviais e em dunas litorâneas. Já no segundo, a areia é encontrada na forma de arenitos ou quartzitos (MME, 2009).

A extração da areia é realizada no leito de rios, várzeas, depósitos lacustres, mantos de decomposição de rochas pegmatitos e arenitos decompostos. No Brasil, cerca de 70% da areia produzida é extraída de leitos de rios, o que diminui a quantidade de área utilizada para a atividade (MME, 2009).

O método de extração da areia é decorrente da forma de ocorrência da mesma e do cascalho e pode ser realizado das seguintes maneiras:

- Desmonte hidráulico: Um jato de água de alta pressão é direcionado mediante ao uso de um monitor sobre a base do talude e, por conseguinte, o material desmorona de maneira controlada, formando uma polpa composta de 15% de material sólido. Este método possui alta produção e baixo custo operacional, porém depende de grande quantidade de água e é limitado a depósitos que se desagregam hidráulicamente (MME, 2009).
- Dragagem: A polpa na superfície de ataque do leito submerso é succionada por um sistema de bombeamento, a draga pode possuir sistema desagregador na ponta para facilitar a formação da polpa. O sistema de bombeamento pode ser montado sobre uma barça móvel ou uma barça com ancoragem fixa (MME, 2009).

- Desmonte mecânico: método recomendado para locais secos e trata-se da escavação mecânica direta do minério, por equipamentos de escavação (MME, 2009).

A figura 5 mostra os diferentes tipos de extração de areia.

Figura 5 - Diferentes tipos de extração de areia



(A)



(B)



(C)

(A) Desmonte hidráulico (B) Dragagem e (C) Desmonte mecânico.

Fonte: Anepac (2016)

Já no beneficiamento, tem-se como objetivo tornar o mineral próprio para a utilização como agregado na construção civil, dessa forma, 95% da massa total deve possuir de 4,8mm a 0,075mm. Em beneficiamentos mais simples, a areia é peneirada e o material retido (predominantemente cascalho e matéria orgânica) é encaminhado para uma pilha de cascalho e rejeito. Em seguida, o material em forma de polpa segue para a pilha desaguadora. O material fino e a água desaguada seguem por canaletas até um tanque de clarificação. Por último, o material passa por uma caixa de dissipação de energia e retornam ao curso d'água. A pilha de areia desaguada e seca será carregada e encaminhada para os clientes (MME, 2009).

Em beneficiamentos mais elaborados, o minério passa por uma peneira fixa que seleciona os grãos mais finos que 4.8mm e o passante segue para silos desaguadores. As partículas finas presentes na polpa são carregadas com a água no *overflow* e ocorre uma lavagem da areia. A água do *overflow* é encaminhada para o tanque de clarificação e a areia é descarregada dos silos diretamente para os caminhões, ou pilhas de estocagem (MME, 2009).

Em caso de material menos nobre, o material dragado passa por uma peneira vibratória de dois decks, sendo a primeira para retenção de cascalho mais grosso (tamanho superior a 9,5mm), que é encaminhado a uma pilha de estocagem de cascalho grosso. A segunda peneira seleciona as partículas menores que 4,8mm e o material retido é direcionado para uma pilha de estocagem de cascalho fino. O passante passa por um cone desaguador e depois para um lavrador de rosca, no qual os finos tendem a ser carregados com a água como sobrenadante e são direcionados para a bacia de rejeitos. Já as partículas mais grossas, afundam e seguem para a correia transportadora formando uma pilha de estocagem (MME, 2009).

3.2 ARGILA

Devido ao baixo valor agregado da argila, o segmento constitui uma atividade econômica vinculada à sua indústria de transformação, isto é, as unidades produtoras abastecem as próprias cerâmicas ou são vendidas nos mercados locais. O baixo valor agregado dos produtos dificulta investimentos em equipamentos, tecnologia e qualificação da mão de obra (MME, 2009).

Na mineração de argila, predominam os empreendimentos de pequeno porte, com produção de 1.000 a 20.000 t/mês. As minas usualmente possuem escavação mecânica e são descobertas (MME, 2009). Para a lavra da argila, não se utiliza a água, isto é, os processos de escavação mecânica são a seco, a água é apenas utilizada na umidificação das vias não pavimentadas, para redução das partículas em suspensão.

O processo de extração de argila é realizado em cava fechadas, isto é, mediante a formação de lagoas não interligadas diretamente aos cursos d'água. A lavra é realizada por retroescavadeira e dragas de sucção: plataformas flutuantes sobre

as quais instala-se conjuntos motor-bomba acoplados a tubulações de recalque para transporte da argila (REIS *et al.*, 2005).

3.3 FÍLER

O fíler, segundo Bernucci *et al.* (2010), é um material no qual pelo menos 65% das partículas é menor que 0,075mm, correspondente à peneira de nº 200. O fíler calcário é um material proveniente do calcário que possui a propriedade de preencher os vazios da mistura e dar maior estabilidade à mistura (RESENDE; VIEIRA, 2016).

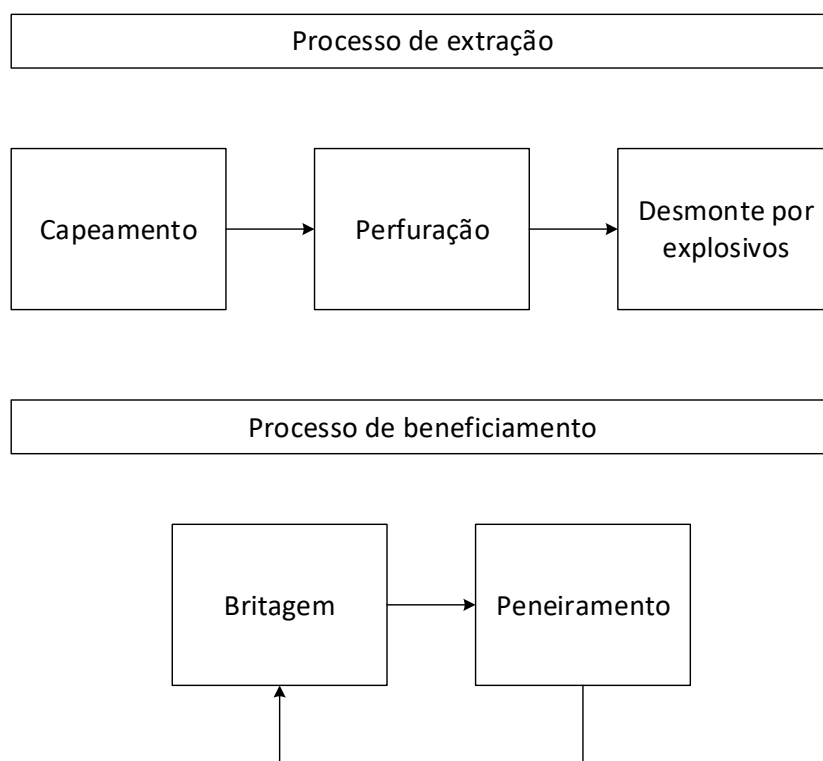
Segundo MME (2009), o calcário é extraído de pedreiras e depósitos formados por conchas e esqueletos de microrganismos aquáticos, comprimidos sobre a pressão, que variam em idade, desde o Pré-Cambriano até o Holoceno,

O calcário é lavrado a céu aberto, e sua lavra inclui as seguintes etapas: capeamento, perfuração, desmonte por explosivos e transporte até a usina de processamento. A britagem ocorre em circuitos multiestágios que incluem combinações de britadores de mandíbulas ou giratórios em grandes operações além de britadores cônicos secundários e terciários (MME, 2009).

O processamento do calcário depende do uso e especificações do produto final. Dessa forma, pode-se utilizar a lavra seletiva, a cavação manual, a britagem e o peneiramento para obtenção de produtos. A cominuição do calcário pode ser feita via seca, segundo as etapas de britagem, classificação, moagem em moinho de rolos tipo Raymond ou em moinhos tubulares com bolas (MME, 2009).

A figura 6 traz a esquematização do processo de produção do Fíler proveniente do calcário.

Figura 6 – Processo de extração e beneficiamento do Fíler de calcário



Fonte: Elaborado pela autora

CAPÍTULO 4 – AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

4. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Segundo Finnveden e Moberg (2005), diversas ferramentas de avaliação de impacto ambiental estão disponíveis e cada metodologia possui diferentes objetos de análise, o que dificulta que as mesmas sejam intercambiáveis. O quadro 2 traz diferentes métodos utilizados na análise de impacto ambiental e suas respectivas definições.

Quadro 2 - Ferramentas de análise de impacto e suas descrições

Nome da ferramenta	Descrição
Estudo de impacto ambiental (EIA)	Ferramenta utilizada para realizar a avaliação dos impactos de um projeto. É específica para o local e tempo, isto é, identifica os efeitos ambientais de uma atividade em uma dada localização e período de tempo (FINNVEDEN et MOBERG, 2005; UNEP, 1996).
Contabilidade do fluxo de material (MFA)	Trata-se de uma família de diferentes métodos, na qual estão inseridos: materiais totais requeridos (TMR), quantidade de material por unidade (MIPS) e análise do fluxo de substância (SFA). Estas metodologias possuem enfoque no fluxo de matérias, principalmente os inseridos na cadeia produtiva (FINNVEDEN et MOBERG, 2005).
Auditoria ambiental (EA)	Ferramenta descritiva, que usualmente inclui os impactos ambientais, bem como o uso de recursos (FINNVEDEN et MOBERG, 2005).

Fonte: Elaborado pela autora

O Estudo de Impacto Ambiental (EIA) é comumente utilizada para comparar diferentes localizações de um empreendimento e é requerido nas regulamentações de diversos países (FINNVEDEN et MOBERG, 2005), incluindo-se o Brasil que traz a metodologia citada na norma CONAMA Nº 001/86 (BRASIL, 1986). Além disso, como o EIA é uma ferramenta processual e burocrática, funciona como uma das barreiras para o projeto ser aprovado (ZHANG; KØRNØV; CHRISTENSEN, 2013). Usualmente o EIA inclui os impactos ambientais bem como o uso de recursos e pode-se sugerir a inclusão de aspectos econômicos e sociais para uma avaliação de sustentabilidade (FINNVEDEN; MOBERG, 2005). No Brasil, deve-se elaborar um RIMA (Relatório

de Impacto Ambiental) que descreve as conclusões obtidas no EIA (BRASIL, 1986).

Segundo Finnveden e Moberg (2005), a avaliação dos Materiais Totais Requeridos (TMR) tem como o principal objeto de estudo a nação e possui enfoque em calcular todos os fluxos de materiais inseridos em uma sociedade. A avaliação da Quantidade de Materiais Requeridos (MIPS) também possuem enfoque no material inserido em um sistema, mas, neste caso, o objeto de estudo é uma cadeia produtiva ou um serviço, característica em comum com a ACV. As Análise de Fluxos de Substância (SFA) possuem enfoque em uma substância seja em uma dada região ou do berço ao túmulo.

Oliveira (2014) destaca que a auditoria ambiental é focada na prevenção ao dano ambiental, uma vez que a mesma pode servir para minimizar os impactos, atuando de maneira conjunta com a gestão ambiental dos auditados.

Para definir a ACV, deve-se conhecer inicialmente o conceito de ciclo de vida. O ciclo de vida completo de um produto fabricado pelo homem trata-se de estágios sucessivos e encadeados de um sistema de produto (SILVA *et al.*, 2015) que abrange a obtenção de matéria-prima, a manufatura, a utilização e a disposição final do mesmo (MATTHEWS; HENDRICKSON; MATTHEWS, 2015; SILVA *et al.*, 2015).

A ACV é uma ferramenta para avaliar o impacto ambiental de um produto ao longo do seu ciclo de vida (UNEP, 1996; VIEIRA; CALMON; COELHO, 2016), isto é, o impacto de um produto ou sistema é avaliado desde a extração da matéria prima até o uso, disposição final e reciclagem (VIEIRA; CALMON; COELHO, 2016). Segundo Baitz *et al.* (2012), a ACV é reconhecida como uma abordagem confiável, científica e inteligível para abordar a sustentabilidade ambiental das atividades humanas.

Matthews, Hendrickson e Matthews (2015) destacam que as estimativas da ACV levam a resultados com maior precisão do que outros estudos com escopos mais limitados e que a mesma é ferramenta analítica útil para o suporte da tomada de decisão.

Outrossim, deve-se usar a ACV como ferramenta de análise, pois a mesma é: orientada à produto, que é o eixo em torno do qual a indústria gira; é uma ferramenta integrativa, isto é, analisa os impactos ao longo do ciclo de vida inteiro; e, é uma ferramenta científica e quantitativa (UNEP, 1996).

4.1 DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DA ACV

Embora a comunidade científica tenha percebido a complexidade dos problemas ambientais nos anos 60, a metodologia da ACV foi concebida por volta dos anos 70 (HUNT et FRANKLIN, 1996; GUINÉE *et al.*, 2011; KLOPFFER, 1997).

O primeiro estudo analítico, do que se tornaria uma ACV, foi realizado por Harry E. Teasley Jr. em 1969, no instituto *Midwest Research* – localizado no Kansas, Estados Unidos – sendo este relativo às embalagens de refrigerante da Coca-Cola (HUNT et FRANKLIN, 1996; KLOPFFER, 1997; GUINÉE *et al.*, 2011). Nesta época, o aumento da utilização de energia gerou o desenvolvimento de políticas nacionais por razões econômicas. Teasley enxergou que os recursos energéticos eram relacionados com o uso de materiais e queria saber as implicações da utilização de diversos tipos de embalagem (HUNT et FRANKLIN, 1996).

Klopffer (1997) discorre que a ACV se desenvolveu na Europa logo após seu surgimento – em *Batelle Frankfurt*, na abertura da Universidade da Inglaterra, nos laboratórios federais Suíços e, em Sundstrom na Suécia.

Em 1970, surge a denominação histórica REPA – em inglês: *Resource and Environmental Profile Analysis* (Análise do perfil ambiental e de recursos) (HUNT et FRANKLIN, 1996; GUINÉE *et al.*, 2011).

Em 1972 publicou-se o relatório do Clube de Roma intitulado “Os limites do crescimento” (KLOPFFER, 1997), livro que possuía o objetivo de examinar os problemas complexos de diversas nações, como a pobreza, a degradação ambiental, perda da fé em instituições, urbanização descontrolada, alienação da juventude, rejeição de valores tradicionais e a inflação e outros problemas econômicos (MEADOWS *et al.*, 1972).

Um ano depois, ocorreu a primeira crise do petróleo, devido a um ataque da Síria em conjunto com o Egito para reaver terras perdidas para Israel em 1967. Após

o estopim da guerra, sucedeu-se a criação do grupo de produtores árabes de petróleo a Organização de Exportadores Árabes de Petróleo (OPEC) e a decisão conjunta dos membros da OPEC de aumentar o preço do petróleo (DARMSTADTER, 2013).

O relatório do clube de Roma e a primeira crise do petróleo demonstraram que os recursos são finitos e o crescimento exponencial econômico pode resultar em um desastre social e ambiental (KLOPFFER, 1997). Além disso, estes acontecimentos expuseram a vulnerabilidade do sistema econômico global (KLOPFFER, 2003).

Ademais, em 1973 o primeiro software de ACV foi desenvolvido por um cliente do Instituto *Midwest Research* (HUNT et FRANKLIN, 1996).

Klopffer (1997) descreve que após a segunda crise do petróleo em 1979, com o encerramento do cartel da OPEC e a diminuição dos preços do petróleo, as atividades no que se refere à ACV continuaram de maneira moderada, mas sem apresentar um crescimento real.

Em 1980 houve o ressurgimento da ACV, tendo como objetos de estudo não somente as embalagens, mas também, outros produtos que foram analisados do berço ao túmulo (KLOPFFER, 1997). Além disso, o laboratório federal Suíço de testes de materiais e pesquisa publicou um estudo que apresentava a lista de todos os dados necessários para um estudo de ACV e um método de análise de impacto dividindo as emissões atmosféricas e aquáticas por padrões semipolíticos e agregando-as, respectivamente em ‘volumes críticos’ de ar e ‘volumes críticos’ de água (GUINÉE *et al.*, 2011).

Devido a diversos fatores que culminaram no debate nacional e atenção da mídia para os problemas ambientais, em 1988 decorreu-se o reestabelecimento da consciência ambiental nos Estados Unidos. Um dos acontecimentos mais importantes foi a “barcaça de lixo” em 1987 (HUNT et FRANKLIN, 1996). Evento que trouxe à tona a crise da disposição dos resíduos sólidos, um problema de muitos anos que alcançou pouca atenção pública (GUTIS, 1987). Além disso, a atividade ambientalista na Europa exercia pressão nas empresas (HUNT et FRANKLIN, 1996).

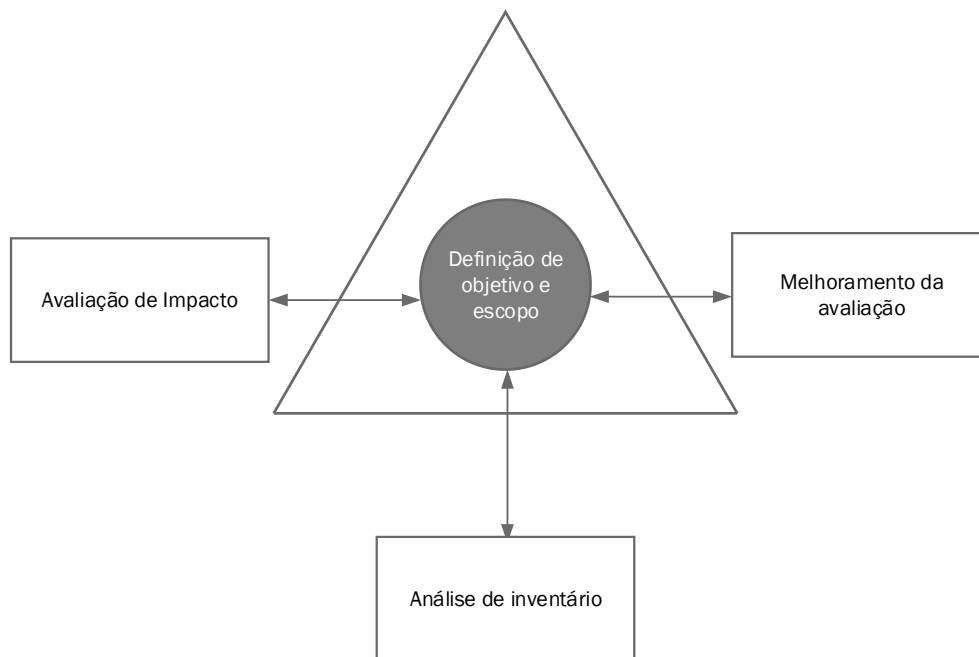
Nesta época, a REPA era considerada um método de estudo para avaliar os efeitos ambientais caso as alternativas de reciclagem, substituição de material e reuso fossem implementadas. Dessa forma, o conceito de REPA ficou conhecido em organizações públicas e privadas (HUNT et FRANKLIN, 1996).

Guinée *et al.* (2011) denomina o período de 1970 até 1990 como o período de concepção da ACV, no qual existia uma lacuna evidente nas discussões científicas e nas trocas de plataformas. Sendo assim, os resultados obtidos apresentavam grande variação, mesmo quando os objetos de estudo eram os mesmos, o que impedia que a metodologia fosse mais aceita e utilizada como uma ferramenta analítica.

A década de 1990 é denominada por Guinée *et al* (2011) como o período de normatização da ACV, no qual houve crescimento notável nas atividades científicas e de coordenação, refletidas no número de *workshops* e fóruns organizados, bem como no número de publicações de guias e livros, como por exemplo: Avaliação de Ciclo de Vida de Produtos, publicado em Copenhague em 1992; Avaliação do Ciclo de Vida, publicado em Washington em 1993 e Avaliação Ambiental de produtos, impresso em Londres, 1998. Além disso, publicações científicas começaram a aparecer nos periódicos *Journal of Cleaner Production*, *Resources, Conservation and Recycling*, *International Journal of LCA*, *Environmental Science & Technology*, *Journal of Industrial Ecology* (GUINÉE *et al.*, 2011).

De 1990 até 1993 a SETAC – *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (Sociedade de toxicologia ambiental e química) – organizou workshops importantes para estruturação da ACV, tais quais: A estrutura da ACV, em Vermont – 1990; SETAC – Europa, em 1991; ACV - Avaliação de impacto importantes, na Florida – 1992; e Qualidade dos dados da ACV, 1992 em Virginia; que culminaram no chamado “Código de prática” em 1993, Portugal (KLOPFER, 1997; GUINÉE *et al.*, 2011). A figura 7 ilustra o resultado obtido em 1993 sobre a estrutura da ACV.

Figura 7 – Triângulo da SETAC



Fonte: Adaptado de Klopffer (1997)

Em 1994 a Organização internacional de padronização (ISO) adotou a tarefa de padronizar os métodos e procedimentos, enquanto os grupos trabalhando na SETAC focaram no desenvolvimento de métodos de harmonização. Neste período a ACV também se tornou parte da legislação em diversas localidades, como na Europa e no Japão (GUINÉE *et al.*, 2011).

Guinée *et al.* (2011) definem o presente da LCA como a década de elaboração. Em 2002, a UNEP e a SETAC nominou uma força tarefa internacional com o objetivo de determinar uma estrutura para a metodologia orientada à *midpoints* e *endpoints* (JOLLIET *et al.*, 2004). Já em 2005, a plataforma europeia de Avaliação do Ciclo de Vida foi estabelecida para promover a viabilidade, troca, e uso de dados com qualidade garantida, métodos e estudos para dar suporte à tomada de decisões em políticas públicas e negócios. Ademais, nos Estados Unidos a Agência de Proteção Ambiental (EPA) começou a promover o uso da ACV. Outros sistemas de Avaliação do Ciclo de Vida foram estabelecidos nesta mesma época, tais quais: a rede australiana de ACV e o centro americano de ACV (GUINÉE *et al.*, 2011).

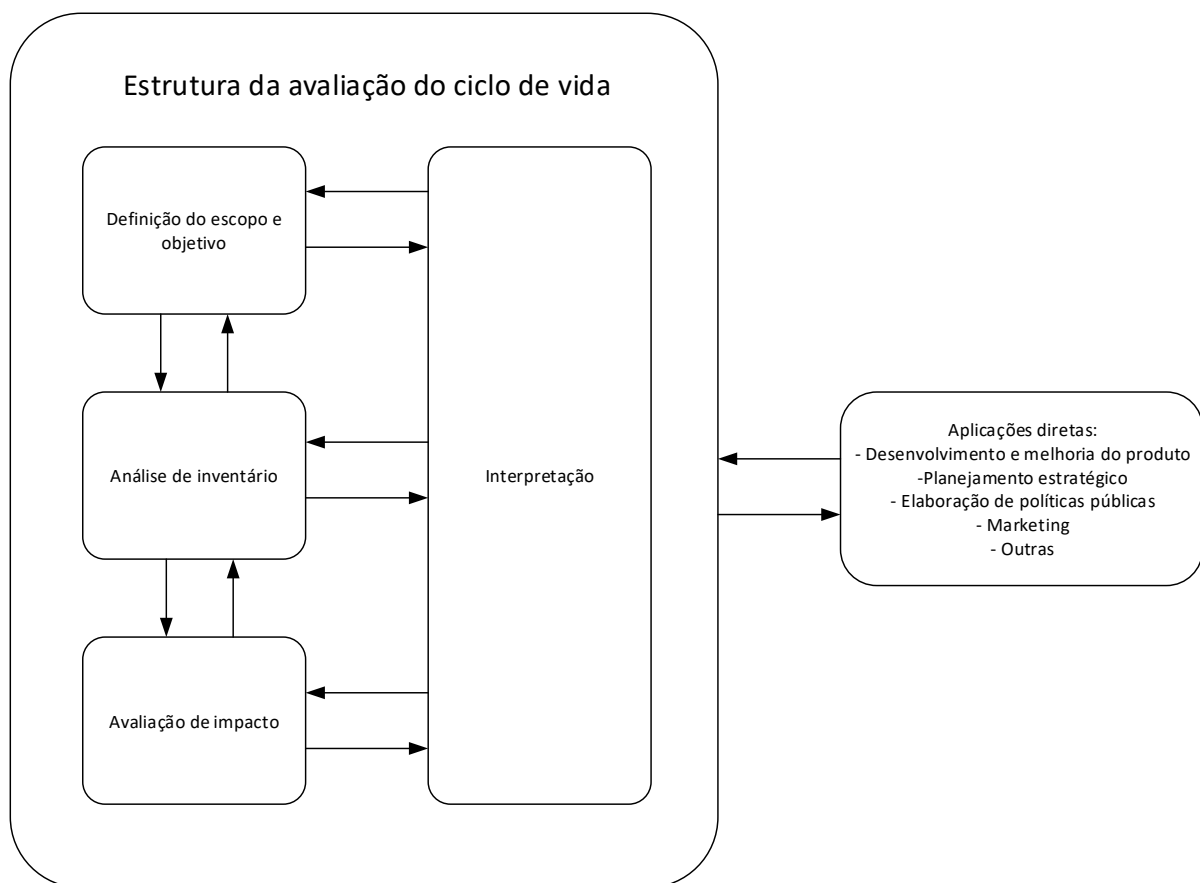
4.2 NORMATIZAÇÃO DA ACV

O debate internacional na normatização da metodologia da ACV iniciou-se na América do Norte no final dos anos oitenta e se espalhou na Europa Ocidental com a SETAC (GABATHULER, 1997).

A normatização da ACV possui uma estrutura clara, que essencialmente remete à SETAC e consiste dos seguintes componentes: definição do escopo e objetivo, análise do inventário, avaliação de impacto e interpretação (KLOPFER, 2003).

A figura 8 traz as etapas da ACV conforme a norma ISO 14040:2006.

Figura 8 – Etapas da ACV



Fonte: ISO 14040: 2006 (p.8)

Pode-se observar que as etapas descritas pela ISO 14040:2006 são as mesmas descritas pelo triângulo da SETAC em 1997 (Figura 8), exceto a etapa de interpretação, descrita previamente como melhoramento da análise. Outrossim,

as fases descritas na figura 8 são interligadas demonstrando a possibilidade de redefinição dos passos prévios.

Segundo a ISO (2006), as normas de ACV surgiram em 1997 (ISO 14040:1997), seguida pelas normas ISO 14041:1998, ISO 14042:2000 e ISO 14043:2000. Atualmente as normas reguladoras utilizadas são: ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 que substituíram as previamente citadas, com o intuito de facilitar a leitura, e manter os requerimentos e conteúdos técnicos inalterados, exceto pelos erros e inconsistências.

Segundo Finkbeiner (2012), antes da normatização em massa da ACV, podia-se fazer menção às mesmas como “série ISO 40”. No entanto, devido ao avanço da regulamentação, esta referência não pode mais ser utilizada, já que, as normas ISO para ACV se estendem até a série 70.

A quadro 3 traz a evolução normas citadas e os tópicos abordados nas mesmas.

Quadro 3 – Evolução das normas ISO para ACV

Nome e ano da norma	Tópicos abordados na norma
ISO 14040:1997 (Substituída)	Especifica a estrutura geral, princípios e requisitos para conduzir e relatar estudos da avaliação do ciclo de vida. Não descreve a ACV em detalhes (ISO 14040:1997).
ISO 14041:1998 (Substituída)	Especifica os requerimentos e procedimentos necessários para definição do objetivo e escopo para a ACV e para realizar, interpretar e reportar a análise de inventário (LCI) (ISO 14041:1998).
ISO 14042:2000 (Substituída)	Descreve e orienta a estrutura geral para a fase avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) da ACV e os fatores chave e limitações da LCIA (ISO 14042:2000).
ISO 14043:2000 (Substituída)	Constam os requerimentos e recomendações para conduzir a interpretação da ACV ou estudos de inventário. Não descreve metodologias específicas para a fase de interpretação da LCA e análise de inventário (ISO 14043:2000).

Fonte: Elaborado pela autora

Quadro 3 – (Continuação) Evolução das normas ISO para ACV

Nome e ano da norma	Tópicos abordados na norma
ISO 14040:2006	Descreve os princípios e estrutura para diversas fases da ACV, tais quais: definição de escopo e objetivo, análise de inventário, análise de impacto, interpretação dos resultados, relatório e revisão crítica da ACV, limitações da ACV, relação entre as fases da ACV e, condições para escolhas de valor e elementos opcionais (ISO 14040:2006).
ISO 14044:2006	Cobre os estudos de ACV e análise de inventário (14044:2006).

Fonte: Elaborado pela autora

Vale salientar que este trabalho utilizou como base as normas atualizadas da série ISO, isto é, a ISO 14040:2006 e a ISO 14044:2006.

Além das normas citadas no quadro 3, o desenvolvimento recente da ACV levou à novas derivações, tais quais:

- ACV de única análise: como a ISO 14067:2013 que trata dos requerimentos e diretrizes para ACV de pegada de carbono e a ISO 14046:2014 que trata da pegada hídrica (FINKBEINER; 2012).
- Normas “além da ACV ambiental”: normas para avaliação do custo de vida e análise de eco eficiência (ISO 14045:2012) (FINKBEINER; 2012).

4.3 METODOLOGIA DA ACV

A metodologia da Avaliação do Ciclo de vida é descrita pela ISO 14040:2006 e se divide nas seguintes etapas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação (ISO 14040: 2006).

4.3.1 Definição de objetivo e escopo

A definição do objetivo e escopo é de suma importância para a ACV, pois influencia diretamente no nível de detalhamento dos dados (SILVA *et al.*, 2016).

O objetivo diz respeito à aplicação do estudo, o público a que se pretende comunicar os resultados e se estes serão utilizados de maneira comparativa (ISO 14040:2006).

O escopo, por outro lado, se refere a definição dos seguintes itens: o sistema produtivo a ser estudado; a função do(s) produto(s) ou sistema(s) a ser(em) estudado(s); a unidade funcional; as fronteiras do sistema; os processos de alocação; as categorias de impacto selecionadas, a metodologia de avaliação de impacto e interpretação a ser utilizada; os dados requeridos; as limitações e suposições; o requerimento de qualidade dos dados inicial; tipo de revisão crítica (se houver); e, o formato do relatório a ser apresentado com os resultados do estudo (ISO 14040:2006).

- Unidade funcional: Define a quantificação das funções identificadas do produto ou sistema e serve para dar uma referência para a qual os *inputs* e *outputs* estão relacionados. Dessa forma, garante a comparabilidade dos resultados de ACV (ISO14040:2006; MATTHEWS; HENDRICKSON; MATTHEWS, 2015).
- Fronteiras do sistema: Define os processos que serão inclusos na ACV (ISO 14040:2006), de maneira a facilitar a mesma (MATTHEWS; HENDRICKSON; MATTHEWS, 2015).
- Processos de alocação: Caso o produto estudado na ACV provenientes de um processo de fabricação que possui coprodutos, ou que não seja possível realizar a coleta de informações de inventário separadamente para cada um, deve-se realizar uma divisão artificial das entradas e saídas, denominada alocação (SILVA *et al.*, 2016). A alocação pode ser realizada utilizando propriedade físicas como critério (como a massa dos coprodutos), bem como com a utilização de critérios econômicos para realizar a divisão (SAADE, 2011).

4.3.2 Análise de inventário

A ICV trata-se de um inventário de dados de entrada e saída no que tange o sistema a ser estudado. É a etapa na qual coleta-se os dados para alcançar os objetivos definidos no estudo (ISO 14040:2006).

A construção do inventário para a ACV requer os seguintes passos: preparação para coleta de dados baseada no objetivo e escopo; coleta de dados; validação

dos dados; alocação dos dados; relação dos dados com a unidade funcional; e, agregação dos dados (MATTHEWS; HENDRICKSON; MATTHEWS, 2015).

Segundo MATTHEWS; HENDRICKSON e MATTHEWS (2015), os dados do inventário podem ser divididos em dois tipos:

- Dados de primeiro plano (*foreground data*): dados que são provenientes diretamente da entidade que os coleta e/ou analisa para encontrar o resultado.
- Dados de segundo plano (*background data*): dados são reutilizados ou citados de uma fonte primária.

Cabe salientar que, devido ao aumento do número de organizações utilizando a ACV, tornou-se imperativo o desenvolvimento de guias para garantir a consistência dos dados da ICV (EDELLEN; INGWERSEN, 2016). A qualidade dos dados, segundo a ISSO 14040:2006, se refere à habilidade do dado de satisfazer os requerimentos definidos.

O quadro 4 mostra diferentes bancos de dados utilizados na ICV.

Quadro 4 – Diferentes bancos de dados utilizados na ICV

Banco de dados	Desenvolvedor	País de origem	Principal fonte de dados
GaBi	PE Internacional	Alemanha	Dados industriais / Dados da literatura / Outros bancos de dados
Ecoinvent	Centro de Inventário de ciclo de vida da Suíça	Suíça	Dados industriais / Dados da literatura
IBO	Instituto Austríaco de Construção Ecológica	Áustria	Dados industriais / Dados da literatura / Outros bancos de dados
CFP	Associação das Idústrias do Japão	Japão	Dados industriais / Dados da literatura
Synergia	Instituto Finlândes do Meio Ambiente	Finlândia	Dados industriais / Dados da literatura

Fonte: COELHO, 2016 (p. 51)

O banco de dados *Ecoinvent* usa ambos dados retirados da literatura como dados retirados da indústria e cobre uma grande gama de tecnologias de

processo. Contém dados de ICV dos dois tipos de agregação: tanto de ICV unitários, como de ICV cumulativos e possui diferentes escolhas de tecnologias para cada caso. Dessa forma, o analista pode escolher a combinação mais apropriada de dados de ICV e estar consciente das limitações do seu estudo (DE EICKER *et al.*, 2010).

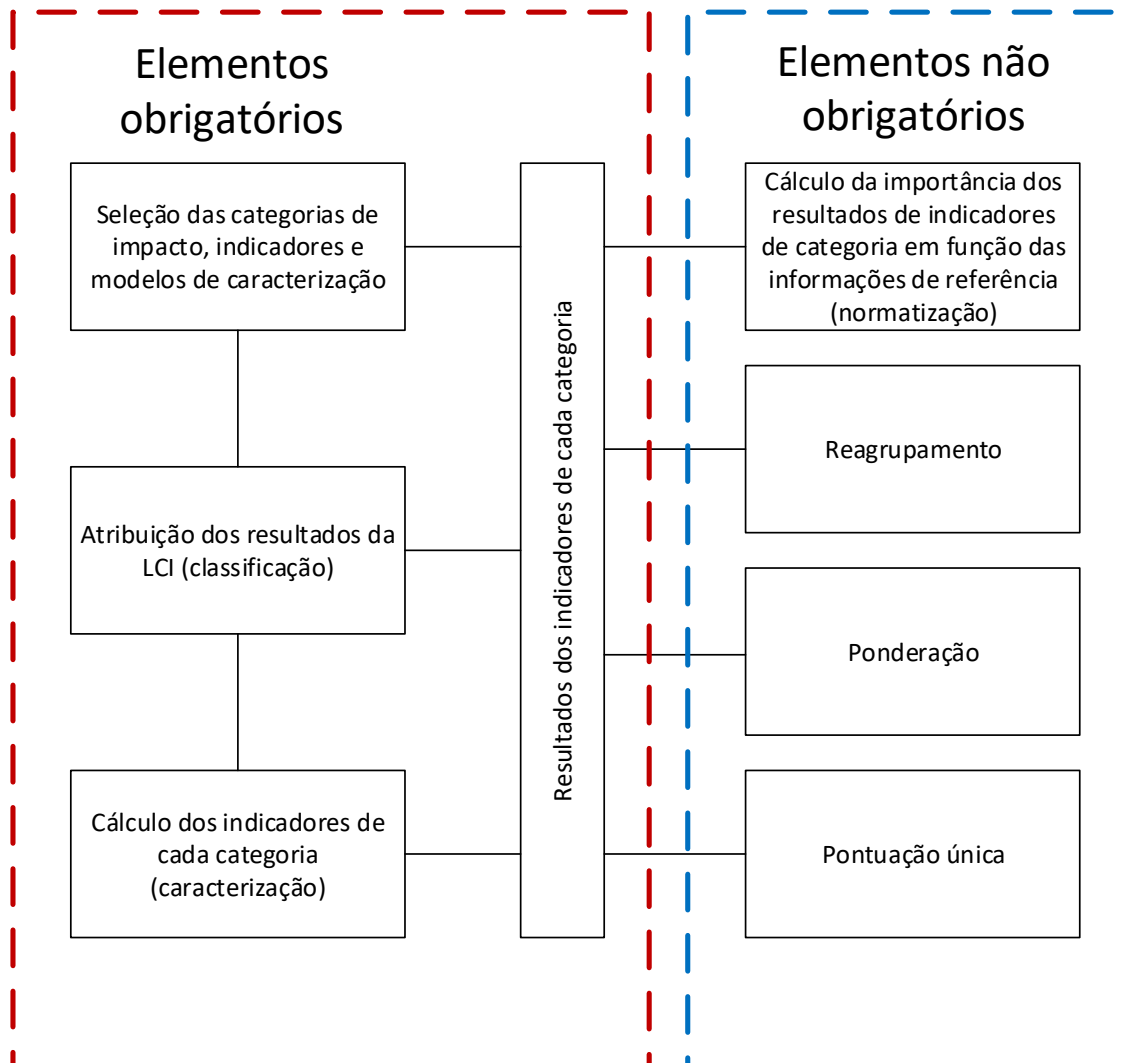
No Brasil, O Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV) é um dos serviços oferecidos pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT), e é formado por inventários bases da produção industrial e agronegócio nacional. No entanto o mesmo está em fase inicial de desenvolvimento, sendo ainda muito limitado. (SILVA; MASONI, 2016).

4.3.3 Análise de impacto

Trata-se da fase da ACV na qual objetiva-se entender e avaliar a magnitude e significância dos impactos ambientais potenciais para um sistema ou produto ao longo de seu ciclo de vida. Este processo envolve a associação dos dados do inventário com categorias específicas de impacto ambiental e indicadores dos mesmos. Ademais, esta etapa fornece embasamento para a fase de interpretação (ISO 14040:2006).

A figura 9 mostra os elementos da AICV que podem ser divididos em obrigatórios e não obrigatórios.

Figura 9 – Elementos da AICV



Fonte: Adaptado de ISO 14040:2006

Os métodos de avaliação de impacto podem ser divididos em três tipos: métodos clássicos de avaliação de impacto ou direcionados à problema (*midpoints*); métodos orientados a danos (*endpoints*); e, métodos que combinam ambos citados (JOLLIET *et al.*, 2004).

- **Métodos clássicos de AICV ou orientados à problema (*midpoints*):** a análise quantitativa é interrompida antes do final do caminho do impacto, isto é, a AICV é ligada aos *midpoints* definidos, como por exemplo, a depleção de ozônio ou acidificação. Embora a depleção da camada de ozônio seja um problema ambiental, a maior atenção é dada para os

dados subsequentes para humanos, flora e fauna (JOLLIET *et al.*, 2004). Um exemplo de método orientado à problema é o CML (MORAGA *et al.*, 2016).

- **Métodos orientados a danos (*endpoints*):** possuem enfoque nos resultados que são mais facilmente interpretados, tais quais: danos à saúde humana, meio ambiente, recursos naturais e mudanças climáticas. Exemplos desta abordagem são: *Ecoindicator99*, *Goedkoop*, *Spriensma* (JOLLIET *et al.*, 2004).
- **Métodos que combinam ambas as abordagens:** métodos que conciliam ambas as abordagens descritas anteriormente. Alguns exemplos são: Impact 2002+ e ReCiPe (JOLLIET *et al.*, 2004).

O quadro 5 mostra as principais ferramentas de AICV utilizadas.

Quadro 5 – Principais Ferramentas de AICV utilizadas

Metodologia	Desenvolvedor	País de origem	Abordagem
CML 2002	CML	Holanda	Endpoint
Eco- indicator 99	Pré consultants	Holanda	Endpoint
EDIP97 - EDIP2003	DTU	Dinamarca	Midpoint
EPS 2000	IVL	Suécia	Endpoint
Impact 2002+	EPFL	Suiça	Midpoint/ Endpoint
LIME	AIST	Japão	Midpoint/ Endpoint
LUCAS	CIRAIG	Canadá	Midpoint
ReCiPe	RUN + PRé + CML + RIVM	Países baixos	Midpoint/ Endpoint

Fonte: COELHO, 2016 (p. 54)

Segundo a ISO 14040 (2006), a AICV estuda somente as categorias de impactos especificados pelo objetivo e escopo, não sendo, portanto, uma avaliação completa de todos os impactos ambientais do sistema produtivo estudado. Além disto, a AICV não pode sempre demonstrar diferenças significantes entre as categorias de impacto e os resultados do indicador relacionado de sistemas de produto alternativos.

4.3.4 Interpretação

A interpretação da ACV é a fase final na qual os resultados AICV são discutidos e resumidos como uma base para conclusões, recomendações e tomada de decisão (ISO 14040:2006). Outrossim, a fase de interpretação pode ser utilizada para verificar os parâmetros utilizados no objetivo e escopo do estudo, podendo analisar se o sistema de fronteiras definidos é apropriado ou não (MATTHEWS; HENDRICKSON; MATTHEWS, 2015).

4.4 SIMAPRO

Coelho (2016) destaca que existem diversos softwares para a realização da ACV, conforme mostra o quadro 6.

Quadro 6 – Softwares utilizados na ACV

Softwares de ACV	País de origem	Softwares de ACV	País de origem
Boustead	Reino Unido	Miet	Holanda
Eco-it	Holanda	Pems	Estados Unidos
Ecopro	Holanda	SimaPro	Holanda
Ecoscan	Holanda	Team	França
KCL Eco	Finlandia	Wisard	França
Gabi	Alemanha	Umberto	Alemanha
LCAit	Suécia	LCA PIX	Estados Unidos

Fonte: COELHO, 2016 (p. 54)

Dentre os *softwares* citados no quadro 6, os mais utilizados no mundo são o SimaPro e o Gabi. O SimaPro é um *software* de modelagem para produtos e sistemas desenvolvido e distribuído pela empresa *Pré-consultants*, localizada na Holanda (HERRMANN; MOLTESEN, 2015).

Goedkoop *et al.* (2013) destacam que o SimaPro possui o banco de dados Ecoinvent, resultante do esforço de diferentes instituições suíças para atualizar e integrar diversos inventários de ciclos de vida.

O SimaPro possui diversas ferramentas de AICV, tais quais o *Eco-Indicator 99*, EDIP 1997 e 2003, EPS 2000 e o *Impact 2002+*. O Software permite a visualização das etapas do ciclo de vida em diferentes escalas e a disposição de suas contribuições no impacto total do produto ou sistema. Um ponto importante é que o SimaPro pode ser integrado com o software de Avaliação de Custo Total (TCAce - *Total Cost Assessment*), desenvolvido por Sylvatica e os membros da companhia do Instituto Americano de Engenharia Química (AIChE), do Centro de tecnologias de Redução de Resíduos (CWRT), que mostra os custos associados com o processo de fabricação de um produto, realizando a integração da ACV e do risco associado ao cenário para complementar a metodologia da ACV (PIERAGOSTINI; MUSSAT; AGUIRRE; 2012).

4.5 APLICAÇÃO DA ACV

Desde o desenvolvimento da ACV, muitos estudos foram realizados utilizando esta ferramenta. O quadro 7 traz alguns exemplos de aplicações da ACV em diferentes produtos e sistemas

Quadro 7 – Exemplos de aplicação da ACV

Produto ou Sistema	Software utilizado	AICV	Fronteira	Referência
Blocos de Cerâmica e blocos de concreto	SimaPro 7.3	Impact 2002+	<i>cradle-to-grave</i>	Souza <i>et al.</i> (2016)
Bloco de concreto estrutural	Simapro 8.1.1.16	ReCiPe	<i>cradle-to-grave</i>	Silva <i>et al.</i> (2016)
Eco-blocos de pavimentação	SimaPro 8.0.1	Impact 2002+	<i>cradle-to-site</i>	Hossain <i>et al.</i> (2015)
Alvenarias em blocos	SimaPro 7.1.8	Eco-indicator 99 v2.05	<i>cradle-to-grave</i>	Sansão; Aguilar e Marques (2012)
Bloco com resíduo de construção e blocos de concreto	Umberto	Diagrama Sankey	<i>cradle-to-grave</i>	Surgelas; Roman (2010)
Bloco cerâmico estrutural	Simapro	EDIP 97	<i>cradle-to-grave</i>	Vinhal <i>et al.</i> (2016)
Paredes de vedação	Simapro	CML 2001	<i>cradle-to-grave</i>	Condeixa, Haddad e Boer (2014)

Fonte: Elabora pela autora

Quadro 7 – (Continuação) Exemplos de aplicação de ACV

Produto ou Sistema	Software utilizado	AICV	Fronteira	Referência
Parapeito de concreto com agregados reciclados	Simapro	CML 2001	<i>cradle-to-grave</i>	Gayarre <i>et al.</i> (2016)
Metodologias de gestão de resíduos sólidos	IWM Model-1	IWM Model-1	-	Ozeler, Yetis e Demirer (2006)
Polímeros "verdes"	SimaPro	TRACI 2 v.3.01	<i>cradle-to-grave</i>	Tabone <i>et al.</i> (2010)
Concreto ecológico	SimaPro	Impact	<i>Cradle-to-grave</i>	Vieira, Calmon, Coelho (2016)
Concreto autoadensável	SimaPro	Impact 2002+	<i>Cradle-to-gate</i>	Mello, Calmon (2016)

Fonte: Elaborado pela autora

4.6 A ACV NO BRASIL

No Brasil a ACV teve início no ano 1994, com a criação do grupo GANA – Grupo de Apoio à Normatização Ambiental (SEO et KULAY, 2006). Em 1997 e 1999 surgiram as primeiras publicações brasileiras: o livro *Análise de Ciclo de Vida: Produtos – Ferramenta Gerencial da ISO 14000*, de José Ribamar Brasil Chehebe (CHEHEBE, 1997); e o primeiro resultado de pesquisa intitulada *Avaliação do Ciclo de Vida de Embalagens para o Mercado Brasileiro*, pesquisa realizada Centro de Tecnologia de Embalagem do Instituto de Tecnologia de Alimentos, respectivamente (GARCIA *et al.*, 1999).

A primeira normatização brasileira foi a NBR ISO 14040:2001, equivalente à ISO 14040:1997. Um ano depois, criou-se a Associação Brasileira de Ciclo de Vida, a ABCV (SEO et KULAY, 2006).

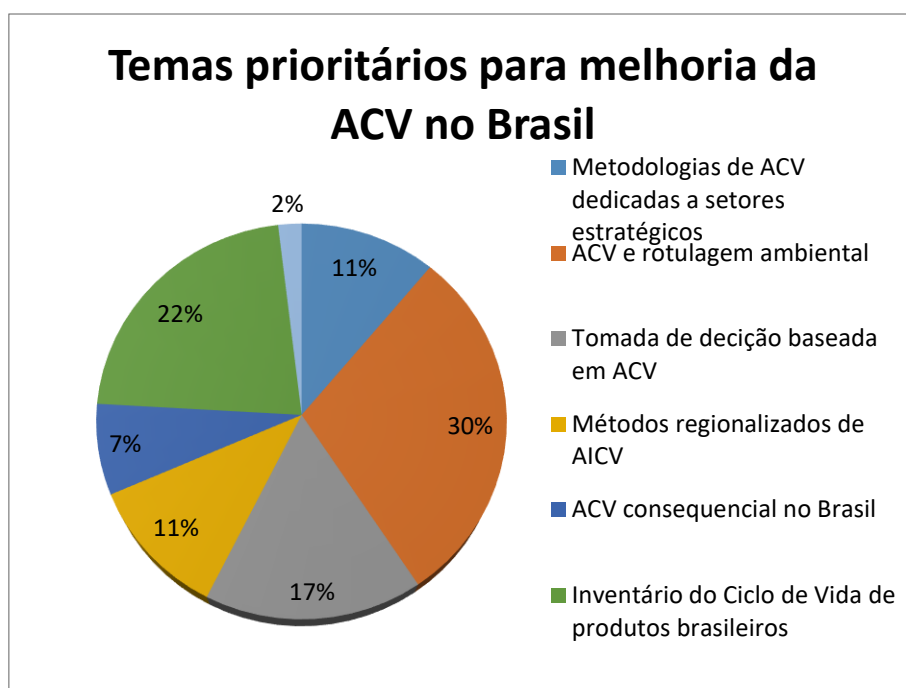
Atualmente o Brasil possui a série de relatórios BRACV – publicados bianualmente com o escopo de compilar e divulgar os resultados do trabalho realizado ao longo do Fórum Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida. Este grupo é constituído por representantes da academia, do governo e da iniciativa privada

para discutir temáticas da ACV. A principal meta destes encontros é identificar os problemas e pensar em soluções de maneira conjunta (RELATÓRIO BRACV, 2016).

Segundo o Relatório de 2016 da BRACV, o número de publicações científicas, dissertações e teses brasileiras utilizando a ACV como ferramenta de avaliação de impactos vem crescendo. No entanto, ainda existem diversos avanços necessários para a melhoria dos métodos utilizados na aplicação da ACV.

A figura 10 mostra os temas definidos como prioritários para o melhoramento da técnica da ACV no Brasil.

Figura 10 - Temas prioritários para o melhoramento da ACV no Brasil



Fonte: Adaptado de: Relatório BRACV, 2016

Ademais, publicou-se em 2016 a Ontologia Terminológica da Avaliação do Ciclo de Vida, livro que visa fornecer um vocabulário de conceitos, termos e relações com os quais pode-se modelar um domínio. Destaca-se ainda que delimitar o uso de termos e definir conceitos e relações de uma área de conhecimento de forma compartilhada e consensual, assegura que a comunidade utilize a mesma linguagem de maneira à organizar, armazenar e apresentar informações de forma concisa (SILVA *et al.*, 2015).

CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA

5. METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa está dividida em quatro partes: coleta de dados, banco de dados, ferramenta computacional utilizada e o método de análise de impacto.

5.1 COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada utilizando-se *background* e *foreground* data. Os primeiros serão coletados da literatura. Os dados de primeira mão foram coletados junto às empresas visitadas, mediante ao envio de questionário por e-mail. Para aferir as distâncias de transporte, bem como para traçar os diferentes cenários utilizados na análise de sensibilidade, utilizar-se-á o *Google Maps*.

Para a escolha dos cenários de estudo, o critério utilizado foi a disponibilidade e qualidade dos dados.

5.2 BANCO DE DADOS

O banco de dados utilizado para o estudo aqui descrito é o ECOINVENT 3.2, considerado pela comunidade científica o mais qualificado pela elevada transparência e abrangência, além de permitir ajustes para cenários alternativos.

No SimaPro escolheu-se a biblioteca intitulada '*Ecoinvent 3 – allocation, default – unit*'.

5.3 FERRAMENTA COMPUTACIONAL UTILIZADA

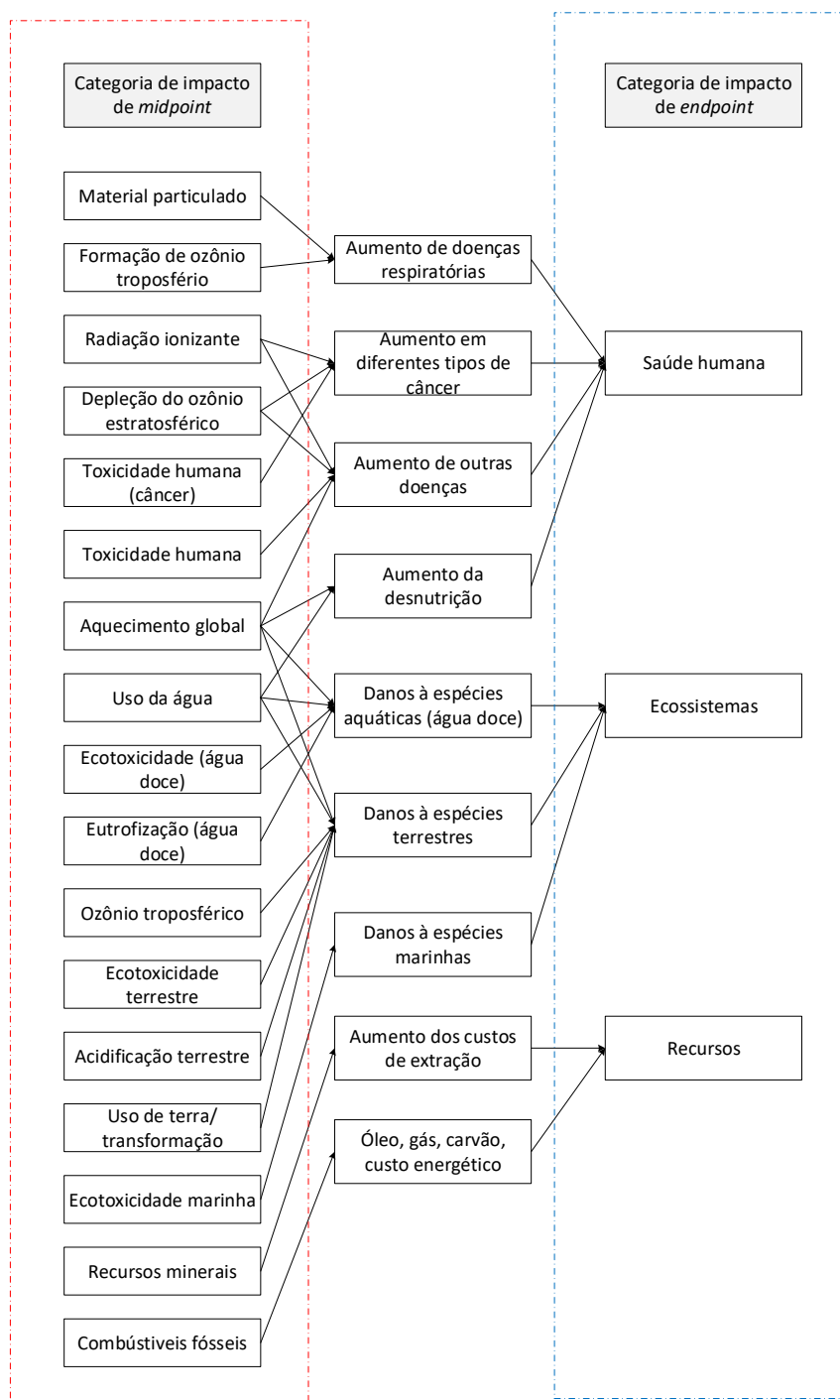
O software utilizado para a ACV será o SIMAPRO FACULTY 8.3, considerado a ferramenta mais utilizada no meio acadêmico devido à flexibilidade na adaptação a vários objetivos sua capacidade para promover a análise detalhada por meio de modelagem e armazenamento, sua capacidade de avaliação e seu grande número banco de dados atrelados com as fontes de diferentes regiões e indústrias (COELHO, 2016).

5.4 MÉTODO DE ANÁLISE DE IMPACTO

Para a análise de impacto utilizar-se-á a ferramenta ReCiPe v1.3, desenvolvido pela *Pré-Consultants*. Esta metodologia é detalhada no relatório Recipe de 2013 (GOEDKOOOP et

al., 2013) e foi escolhida pois as categorias de impacto são mais representativas da realidade brasileira. A figura 11 mostra a metodologia empregada.

Figura 11 – Metodologia de análise de impacto (ReCiPe)



Fonte: Adaptado de Pré Consultants, [s.d]

5.5 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

Para testar como os *inputs* de energia e as distâncias de transporte interferem nos impactos ambientais dos produtos avaliados, realizou-se a análise de sensibilidade quanto às distâncias para a areia, argila fíler e LBRO e uma análise quanto a inserção de energia no sistema, avaliou-se apenas a LBRO.

5.5.1 Análise de sensibilidade quanto às distâncias

Para a análise de sensibilidade quanto às distâncias, considerou-se um cenário de localização para areia, argila e fíler e 4 cenários de localização para a CETR-AAMOL. O quadro 8 resume as localizações testadas.

Quadro 8 – Localização dos processos de manufatura da areia, argila, fíler e LBRO

Produto	Localizações
Areia	Aracruz
Argila	São Roque do Canaã
Fíler	Castelo
Lbro	Serra, Cachoeiro de Itapemirim, Barra de São Francisco, São Domingos do Norte

Fonte: Elaborado pela autora

Além disso, utilizou-se quatro cenários de recebimento do material: Vila Velha, Vitória, Serra e Cariacica. As distâncias foram calculadas através do *Google Maps* e utilizou-se um ajuste de 10% para as mesmas.

5.5.2 Análise de sensibilidade quanto à inserção de energia no sistema

Para a análise de sensibilidade quanto à inserção de energia do sistema de produção da LBRO, considerou-se que as umidades de entrada variam em até 25% e que o input de energia varia em 25%.

CAPÍTULO 6 – APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

6. APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

A indústria de tratamento de LBRO utilizada nesta pesquisa é a CETR-AAMOL (Central de tratamento de resíduos – Associação Ambiental Monte Líbano), localizada próximo à Cachoeiro de Itapemirim, na fazenda Monte Líbano.

A CETR – AAMOL é composta de uma área administrativa, área de recebimento, armazenamento e triagem de diversos resíduos e, sistemas de recebimento e desidratação da lama abrasiva e de polimento (CALMON, BRAGA; PREZOTTI, 2006).

Segundo Calmon, Braga e Prezotti (2006), a CETR – AAMOL recebe LBRO em um raio de 20 km (Tabela 4).

Tabela 4 – Distâncias dos diferentes setores à CETR - AAMOL

Setores	Nº de empresas	Distâncias em relação à CETR - AAMOL (Km)
Setor 1 - Soturno/Santa Rosa	13	2 a 9
Setor 2 - Aeroporto / Rod Cachoeiro e Atílio Viváqua	18	16,5 a 24
Setor 3 - Duas barras/ Pacotuba	7	10 a 24
Setor 4 - Rod. Cachoeiro X Frade	2	21 a 22
Setor 5 - São Joaquim / Morro Grande	17	1 a 12
Setor 6 – Gironde	6	10 a 14
Setor 7 – Metropolitana	18	12 a 30

Fonte: Calmon, Braga e Prezotti (p.72, 2006)

Toda a LBRO descartada do processo industrial deve ser coletada e transportada em caminhões apropriados, e encaminhada a CETR – AAMOL, onde é identificada, juntamente com o seu estado físico e a quantidade em peso obtida no controle da entrada da central. Após a pesagem, a LBRO é encaminhada para o tratamento e destinação de acordo com o estado físico e fonte de geração (CALMON, BRAGA E PREZZOTTI, 2006).

- Lama fluida do processo de desdobramento, e também misturada (processo de desdobramento, polimento e corte/acabamento): descarregadas em tanques de equalização específicos para cada um dos tipos de lamas e são bombeadas para o sistema de desidratação.
- Lama fluida proveniente apenas do processo de polimento/corte e acabamento: são armazenadas em baias específicas, para disposição no aterro industrial ou em células individuais, para a fábrica de beneficiamento.
- Lama desidratada proveniente do processo de desdobramento, e também misturada (processos de desdobramento, polimento, corte e acabamento): podem ser encaminhadas diretamente para a disposição em células individuais implantadas no interior da célula principal, ou para o beneficiamento na fábrica modelo
- Lama desidratada proveniente apenas do processo de polimento/corte e acabamento: de acordo com a quantidade, poderão ser misturadas com a lama desidratada na central, em proporção que possibilite o seu encaminhamento para a célula, ou para o beneficiamento na fábrica modelo.

6.1 DEFINIÇÃO DO ESCOPO E OBJETIVO

O **objetivo** deste estudo é realizar uma avaliação do ciclo de vida da LBRO de maneira comparativa aos processos produtivos dos materiais que a mesma pode substituir, isto é: a areia, argila e fíler. Além disso, objetiva-se destacar a etapa de maior impacto ambiental no processamento da LBRO para os cenários simulados.

O quadro 9 explicita o detalhamento do escopo deste estudo.

Quadro 9 – Detalhamento do escopo do trabalho

Itens da definição do escopo	Definição
Unidade funcional	Kg
Limites do Sistema	Os sistemas foram avaliados na perspectiva cradle-to-grave, isto é, desconsiderou-se a inserção dos mesmos em materiais de construção, vida útil, demolição e possível reciclagem.
Procedimentos de alocação	Para a LBRO considerou-se que a mesma entra com impacto zero no sistema de beneficiamento.
Metodologia de análise do impacto do ciclo de vida	ReCiPe V 1.3 H
Categorias de impacto avaliadas	Mudanças climáticas, Depleção de ozônio, acidificação terrestre, Eutrofização dos corpos d'água, Eutrofização marinha, Toxicidade humana, Formação de oxidantes fotoquímicos, Formação de material particulado, Ecotoxicidade marinha, Ecotoxicidade terrestre, Ecotoxicidade aquática, Radiação ionizante, Ocupação de terras agriculturáveis, Ocupação de terras urbanas, Transformação natural das terras, depleção da água, Depleção de metais e depleção dos combustíveis fósseis.

Fonte: Elaborado pela autora

6. LIMITAÇÕES DESTE ESTUDO

As limitações deste estudo são:

- Desconsiderou-se a infraestrutura dos processos produtivos dos materiais, devido à falta de dados quanto a mesma.
- Utilizou-se de dados secundários, extraídos do banco de dados *Ecoinvent* 3.2 ou da literatura.

- Dados da literatura foram extraídos em anos diferentes.
- Extrapolação de dados de São Paulo para o Espírito Santo para a Argila e a Areia.
- Não realizou a análise de qualidade dos dados, conforme recomendado pela EPA (EPA, 2016).
- Desconsiderou-se a emissão de particulados no pátio, decorrente do manuseio dos materiais, principalmente areia e LBRO, devido à falta de dados desta etapa.

CAPÍTULO 7 – ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

7. ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

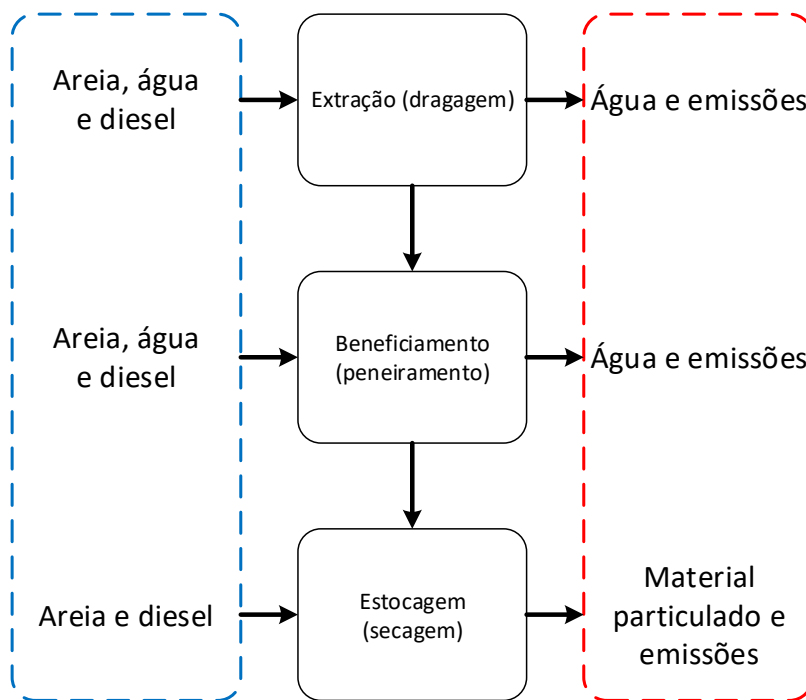
Para a construção do inventário do ciclo de vida, utilizou-se a biblioteca *Ecoinvent 3 – allocation, default – unit*, que integra o banco de dados v3 do Ecoinvent.

7.1 AREIA (DRAGAGEM)

A areia é extraída mediante ao uso de uma draga fixa e uma draga móvel, sendo estas uma plataforma e um barco, respectivamente. O beneficiamento da areia ocorre no próprio local da extração, sendo a mesma bombeada sobre uma peneira suspensa de tubos de policloreto de polivilina de 1,3cm que separa o cascalho da areia. Em seguida, o material é peneirado novamente através de uma malha dupla de aço, com 97mm e 7mm, respectivamente. Na etapa de secagem, a areia fina é encaminhada ao pátio, mediante do uso de uma pá-carregadeira (SOUZA, 2012).

A figura 12 ilustra o processo considerado para análise do ciclo de vida.

Figura 12 – Processo produtivo da areia



Fonte: Elaborado pela autora

7.1.1 Extração

Para a extração considerou-se que ambas as dragas possuem uma bomba hidráulica com 130cv de potência e que para cada 1m³ bombeado, apenas 0,35m³ são areia e o restante é água. O consumo médio de diesel para as dragas fixa e móvel foi averiguado como 2L/m³. Ademais, considerou-se que o barco móvel realiza 7 viagens por dia, percorrendo 3km, totalizando 200m³ de areia por dia (SOUZA, 2012). Considerou-se a densidade da areia como 1680 kg/m³, conforme constatado por Riva (2005). Outrossim, considerou-se a densidade do diesel como 0,85kg/L e que o combustível possui 42,8MJ/kg (Souza, 2012).

Os dados foram adaptados na biblioteca '*Sand {CH}| gravel and quarry operation*'. As modificações no banco de dados foram:

- Modificação da entrada '*gravel*' para '*sand, quartz*', para melhor adaptação à realidade brasileira.
- Exclusão dos processos de ocupação da lavra e infraestrutura, para que o processo seja comparável com os outros produtos.
- Exclusão dos dados referentes ao beneficiamento da areia.
- Exclusão dos dados referentes ao consumo de energia, pois nesta etapa há somente consumo de diesel nas dragas que realizam a extração.
- Modificação da fonte de água de '*Water unspecified origin, CH*' para '*Water, unspecified origin BR*'.
- Inserção da emissão de efluente '*Water BR*'.

A tabela 5 traz os dados fornecidos por Souza (2012).

Tabela 5 – Dados de entrada da areia extraída por dragagem por m³ de areia

Entrada/saída	Parâmetro	Valor	unidade
Entrada	Água	1,86E+03	kg/m ³
	Diesel	1,7	kg/m ³

Fonte: Adaptado de Souza (2012)

Para os dados de entrada no SimaPro, realizou-se a transformação dos dados acima para as unidades estabelecidas no banco de dados (Tabela 6).

Tabela 6 - Dados de entrada do processo de extração (dragagem) da areia por kg de areia

Entrada/saída	Parâmetro	Valor	Unidade
Entradas	<i>Sand, quartz</i>	1	Kg
	<i>Water, unspecified natural origin, BR</i>	1,11E-06	m ³ /kg
	<i>Diesel, burned in building machine {GLO} market for Alloc Def, U</i>	4,33E-2	mJ/kg
Saída	<i>Water, BR</i>	2,38E-04	m ³

Fonte: Adaptado de Souza (2012)

Cabe salientar que o banco de dados do diesel utilizado para todos os produtos já engloba as emissões devido à queima do combustível.

7.1.2 Beneficiamento

Para o beneficiamento, considerou-se que o consumo de diesel na draga fixa foi de 2L/m³ e que 65% da polpa é constituída de água. O consumo de água superficial e diesel é igual ao consumo disposto na tabela 7, de extração, isto é, devido ao fato de que os motores das dragas são idênticos (SOUZA, 2012).

Conforme realizado na extração, os dados foram adaptados tendo-se como base a biblioteca '*Sand {CH}| gravel and quarry operation*' e as modificações realizadas foram iguais as realizadas acima, devido à semelhança do processo de extração com o de beneficiamento. No entanto, a entrada utilizada para o processo de beneficiamento não foi '*sand, quartz*', mas sim o processo adaptado de extração, isto é, '*Sand Extraction – Dredging*'.

Tabela 7 – Dados de entrada do processo de beneficiamento da areia, extraída através de dragagem

Entrada/saída	Parâmetro	Valor	Unidade
Entrada	<i>Sand Extraction – Dredging</i>	1	kg
	<i>Water, unspecified natural origin, BR</i>	1,11E-06	m³/kg
	<i>Diesel, burned in building machine {GLO} market for Alloc Def, U</i>	4,33E-2	MJ/kg

Fonte: Adaptado de Souza (2012)

7.1.2 Estocagem

Na etapa de estocagem utiliza-se uma pá carregadeira que consome 300mL/m³. Nesta etapa ocorre a secagem do material (SOUZA, 2012).

A tabela 8 indica a quantidade de diesel utilizada para transporte de um quilo de areia.

Tabela 8 - Dados de entrada do processo de estocagem (secagem) da areia por kg de areia

Parâmetro	Valor	Unidade
<i>Diesel, burned in building machine {GLO} market for Alloc Def, U</i>	6,50E-03	MJ/kg

Fonte: Adaptado de Souza, 2012

Ademais, utilizou-se como dados de entrada do processo de estocagem o '*Sand Processing (dredging)*', resultado da adaptação descrita na seção 9.1.2.

7.2 AREIA (CAVA SUBMERSA)

Castro *et al.* (2015) discorrem que o banco de dados *Ecoinvent*, provenientes da suíça, não são condizentes com a extração de areia brasileira. A produção de areia considerada no estudo utilizou de dados de primeira mão obtidos com uma mineradora que faz a extração mediante a cava submersa em leito de rio. Dessa forma, adaptou-se o banco de dados existente no *Ecoinvent* com as seguintes considerações:

- Exclusão do consumo de água, devido à recirculação do insumo promovido pela mineradora;

- Adoção de índices de consumo de diesel e energia de acordo com os dados do artigo de Castro *et al.* (2015);
- Alteração de *gravel in ground* para *sand quartz in ground*.
- Alteração da matriz energética para a brasileira.

A tabela 9 mostra os dados de entrada utilizados para a areia de cava submersa.

Tabela 9 – Dados de entrada utilizados na modelagem da areia de cava submersa

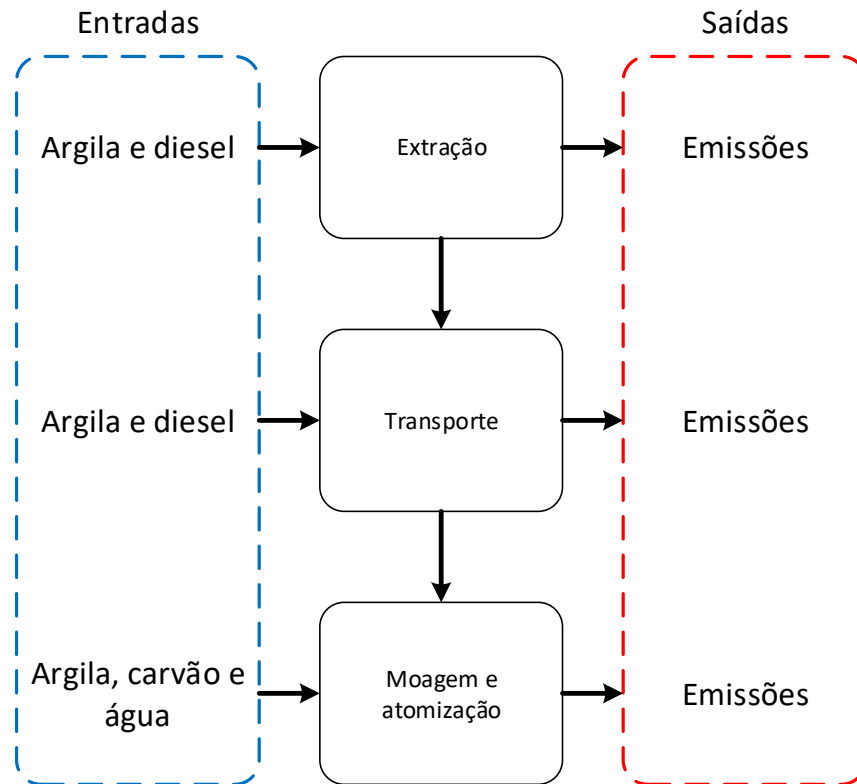
Parâmetro	Valor	Unidade
<i>Sand, quartz</i>	1,00	kg
<i>Diesel, burned in building machine {GLO} market for Alloc Def, U</i>	7,41E-02	MJ/kg
<i>Electricity, medium voltage {BR} market for Alloc Def, U</i>	1,30E-04	kWh

Fonte: Castro *et al.* (2015)

7.3 ARGILA (MINA CATIVA)

A figura 13 traz o esquema do processo de produção da argila utilizado neste trabalho.

Figura 13 – Processo de produção da argila



Fonte: Elaborado pela autora

7.3.1 Extração

Para a extração de argila em mina cativa, o MME (2009) traz a relação de consumo de 0,8L diesel por tonelada de argila, consumo que considera além do dispêndio de energia da mineração da argila, o transporte dentro da mina e estocagem. Na fase de extração, considerou-se haver apenas o consumo de diesel. Considerou-se a densidade do diesel como 0,85kg/L e que o diesel possui poder calorífico de 42,8MJ/kg. A tabela 10 traz os dados de entrada utilizados para a entrada para a extração da argila

Tabela 10 – Dados de entrada da extração de argila em mina cativa

Parâmetro	Valor	Unidade
<i>Diesel, burned in building machine {GLO} market for Alloc Def, U</i>	0.029104	MJ/kg

Fonte: MME (2009)

Os dados da argila foram adaptados da biblioteca '*Clay {CH} | clay pit operation*' e as modificações realizadas foram:

- Exclusão dos processos relacionados com a infraestrutura da mina;

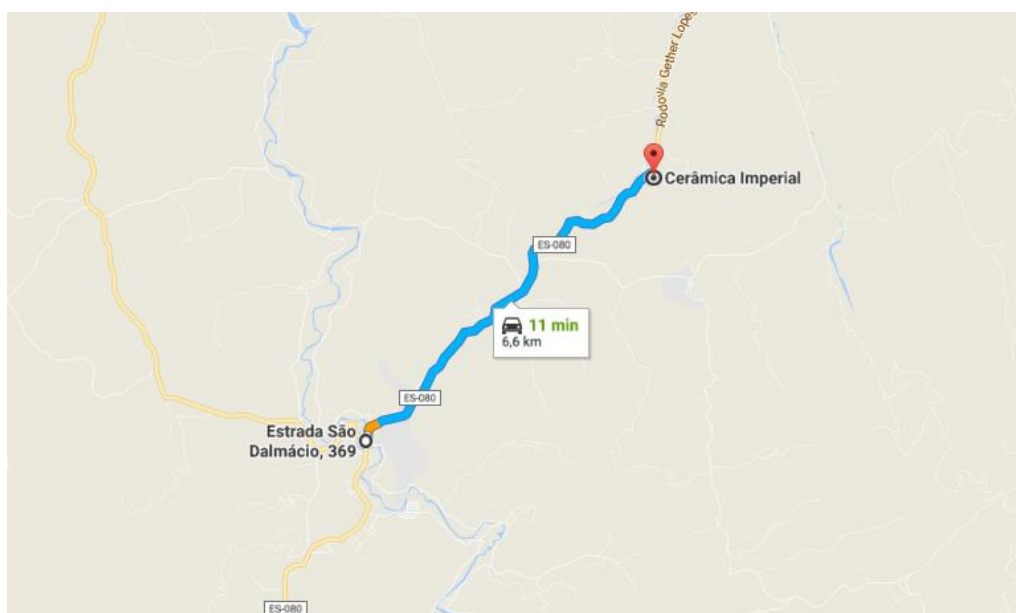
As emissões são contabilizadas dentro da biblioteca *Diesel, burned in building machine {GLO} | market for | Alloc Def, U.*

7.3.2 Transporte

Para adoção de um cenário condizente com o Espírito Santo, considerou-se que a mina cativa e a fábrica de beneficiamento da argila eram ambas localizadas em São Roque de Canaã. Ferreira *et al.* (2012), apresentam que uma das lavras de São Roque do Canaã está localizada nas coordenadas 19° 44' 23" S e 40° 39' 24" W. Neste cenário fictício, utilizou-se como destino uma fábrica de cerâmica, na qual considera-se haver também o beneficiamento da argila como insumo.

A figura 14 traz a distância de transporte calculada pelo *Google Maps*.

Figura 14 – Distância da lavra até a fábrica de argila



Fonte: Google Maps

Dessa forma, inseriu-se nos dados de entrada em *Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW}*| *transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 | Alloc Def, U 6,6E-03km*. A utilização da frota EURO 3 justifica-se por ser a mais condizente com a realidade brasileira em termos de tecnologia. Ademais, escolheu-se o menor caminhão por tratar-se de uma pequena extração de argila.

7.3.3 Moagem e atomização

Para a argila de mina cativa, são necessário 10500kg para realização da moagem e 5600L de água. Dessa forma, são utilizados 0,000533m³/ kg de argila (PEREIRA, 2004).

Para a atomização da argila de mina cativa, isto é, secagem da mesma, utiliza-se do carvão como fonte de energia, 1000kg de carvão são utilizados para 10000kg de argila, totalizando 0,1kg de carvão por 1kg de argila. Considerando-se que o carvão brasileiro possui baixa qualidade, seu poder calorífico, dado pelo *Ecoinvent* é de 20,9 MJ/kg. Dessa forma, a entrada de carvão no processo é de 2,09MJ/kg (PEREIRA, 2004).

7.4 ARGILA (LAVRA DE MÉDIO PORTE)

7.4.1 Extração

Para a extração de argila em uma pequena mina, não cativa, o MME traz a relação de diesel por kg de argila de 0,4L/kg (MME, 2009).

A tabela 11 traz o consumo de diesel por kg de argila.

Tabela 11 – Dados de entrada da extração de argila em pequena lavra não cativa

Parâmetro	Valor	Unidade
<i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i> <i>market for Alloc Def, U</i>	0,014552	MJ/kg

Fonte: MME (2009)

7.4.2 Transporte

Para o cenário de transporte adotou-se a mesma distância utilizada para a mina cativa.

7.4.3 Moagem e atomização

Para a argila de pequena lavra não-cativa, o moedor comporta 25503kg de argila, utilizando no processo 5101L de água. Dessa forma, utiliza-se 0,000200016 m³ de água por kg de argila (PEREIRA, 2004).

Para a atomização da argila utilizou-se 1,842415385 MJ de carvão por kg de argila (PEREIRA, 2004).

7.5 ARGILA – EXTRAÇÃO INTERMEDIÁRIA

Para o terceiro cenário de argila, considerou-se um gasto de diesel intermediário entre a mina cativa e a lavra de médio porte. A tabela 12 traz os dados de entrada utilizados na extração e transporte do terceiro cenário de argila.

Tabela 12 – Dados de entrada da argila, cenário intermediário

Parâmetro	Valor	Unidade
<i>Diesel, burned in building machine {GLO} market for Alloc Def, U</i>	0,0215712	MJ/kg
<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW} transport, freight, lorry 3.5- 7.5 metric ton, EURO3 Alloc Def, U</i>	6,6E-3	tKm

Fonte: Elaborado pela autora

7.5.1 Moagem

Segundo Alves, Melchiades e Boschi (2007), consome-se 10,15kcal/kg de energia elétrica na moagem da argila. Dessa forma, têm-se que o consumo de energia na moagem é de 0,01180kWh para cada kg de argila produzida. O consumo de água na moagem foi estimado a partir da média do cenário de argila em mina cativa e lavra de médio porte. A tabela 13 traz os dados de entrada utilizados para a moagem

Tabela 13 – Dados de entrada, moagem da argila (cenário intermediário)

Parâmetro	Valor	Unidade
<i>Water, unspecified natural origin, BR</i>	0,000200016	M ³
<i>Electricity, medium voltage {BR} market for Alloc Def, U</i>	0,01180	kWh

Fonte: Elaborado pela autora

7.5.2 Atomização

Para a atomização Alves, Melchiades e Boschi (2007), consideram que o consumo médio por kg de argila produzida é de 424kcal.kg⁻¹, o que soma um total de 1,774016 MJ/kg. No estudo dos autores citados, a atomização não é realizada mediante ao uso de carvão, mas sim de gás natural (Tabela 14).

Tabela 14 – Dados de entrada para atomização da argila (cenário intermediário)

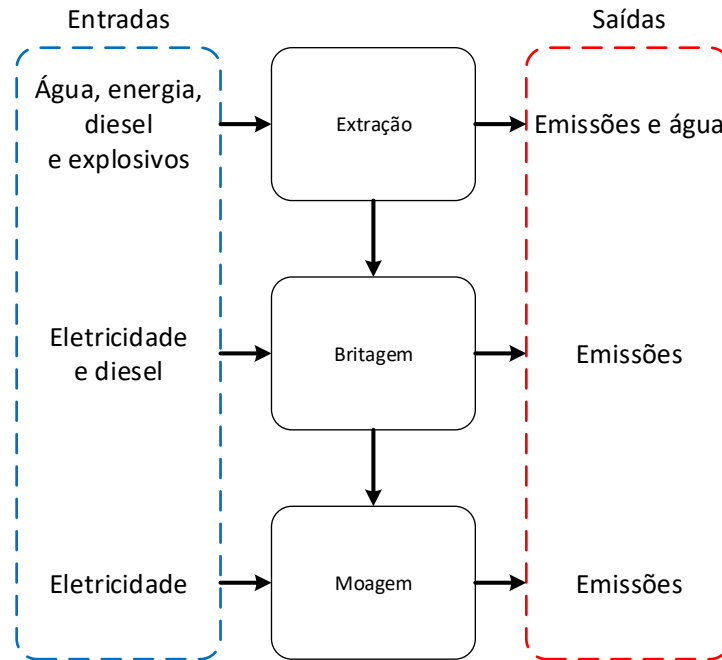
Parâmetro	Valor	Unidade
<i>Heat, district or industrial, natural gas {RoW} heat production, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW Alloc Def, U</i>	1,774016	kWh

Fonte: Elaborado pela autora

7.6 FÍLER

A figura 15 ilustra o processo produtivo do fíler calcário utilizado neste trabalho.

Figura 15 – Processo produtivo do fíler calcário



Fonte: Elaborado pela autora

7.6.1 Extração

A extração do fíler foi adaptada a partir da biblioteca *Limestone, unprocessed {CA-QC}| limestone quarry operation | Alloc Def, U*, que mais se assemelha à extração brasileira de calcário.

Para a extração de calcário adaptou-se o banco de dados do ecoinvent da seguinte maneira:

- Realizou-se a exclusão de todos os itens relacionados com a infraestrutura da mina;
- Adaptou-se a fonte de água para a brasileira;
- Adaptou-se a energia para a matriz brasileira.

7.6.2 Britagem

A britagem foi adaptada a partir da biblioteca *Limestone, crushed, for mill {CA-QC}| production | Alloc Def, U*.

Para britagem adaptou-se o banco de dados doecoinvent da seguinte maneira:

- Utilização da matriz energética brasileira;
- Utilização do banco de dados da extração adaptados anteriormente.

7.6.3 Moagem

A moagem do fíler foi adaptada a partir da biblioteca *Lime {RoW}| production, milled, loose | Alloc Def, U*. A tabela 15 traz a relação dos moinhos utilizados na moagem do fíler na empresa visitada.

Tabela 15– Relação dos moinhos utilizados para moagem do fíler e suas respectivas potências

Moinho	Potência
1	202,1kWh
2 (IMETEC à martelo)	323,6kWh
3	238,7kWh
4	260kWh
5	292kWh
6	198,2kWh
Total	1514,6kWh

Fonte: Elaborada pela autora

Além dos moinhos a empresa conta com um filtro de manga de 120,4 kWh. Dessa forma, a potência total é de 1635kW. A empresa de fíler forneceu que o moinho 1 permanece ligado durante 3036 horas por ano e extrapolou-se os dados deste para os demais, considerando que os 6 moinhos e o filtro de manga trabalham simultaneamente. Por conseguinte, o consumo anual de energia para a moagem do fíler é de 4.963.860kW.

Segundo o Anual Mineral Brasileiro (DNPM, 2010), a Provale contribui com 2,47% do ganho em dinheiro da produção mineral do Espírito Santo, representando R\$10.464.514,29 do mercado de minério do ES. A produção da Provale corresponde a

26,41% do mercado total de calcário comercializado. Considerando que o mercado total de calcário em 2009 foi de 296.771 toneladas (Equação 1)

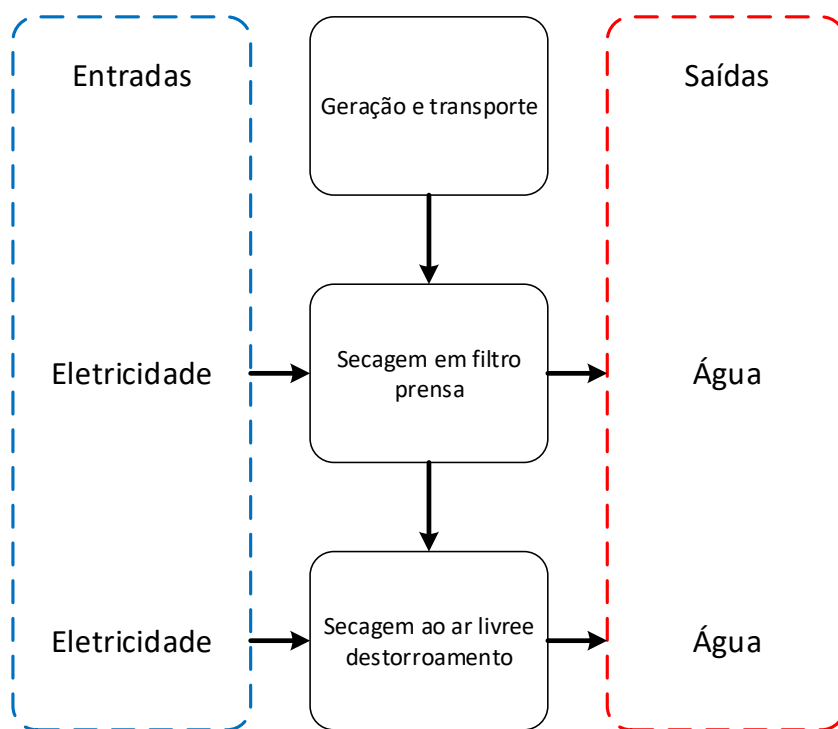
$$P_{provale} = \frac{26,41}{100} * 296.771 = 78.370,27055 \text{ toneladas} \quad (\text{Equação 1})$$

Dessa forma, o consumo energético por tonelada é de 63,34kW/t ou 0,06334kW/kg. Além disso, adaptou-se do banco de dados o tipo de energia utilizada para a matriz brasileira e deletou-se o consumo de água devido a recirculação do insumo para produção de fíler.

7.7 LAMA DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

A figura 16 mostra o processo de beneficiamento da LBRO.

Figura 16 – Processo de beneficiamento da LBRO da CTR-AAMOL



Fonte: Elaborado pela autora

7.7.1 Geração e transporte

A LBRO é gerada no processo de desdobramento dos blocos de rochas em placas. Dessa forma, optou-se por considerar o impacto da geração da lama como nulo, sendo

todo o impacto do desdobramento alocado nas placas, produto de interesse industrial. O transporte do ponto de geração até a CETR-AAMOL também foi desconsiderado, pois o mesmo seria realizado até um aterro, sendo alocado novamente para as placas de rochas ornamentais. Este procedimento foi adotado por Knoeri *et al.* (2013) que avaliou o ciclo de vida do concreto. Embora não exista norma para ACV de produtos com resíduos provenientes do processamento de rochas ornamentais, o procedimento de desconsiderar o transporte da geração do resíduo até o local do tratamento é descrito na ISO 13315-2:2014 que discorre sobre Gestão Ambiental para concreto e estruturas de concreto.

7.7.2 Secagem em filtro prensa

A secagem no filtro prensa é realizada antes do destorroamento e disposição do resíduo ao ar livre. As propriedades da lama estão dispostas na tabela 16.

Tabela 16 – Propriedades da LBRO	
Propriedades da lama	
No tanque de decantação (antes do sedimentador) - RBRO50%	
Teor de umidade (entrada)	50%
Concentração de sólidos	67%
Densidade dos sólidos (t/m ³)	1,6
Densidade da lama RBRO50% (t/m ³)	1,333
No batedor (antes do filtro prensa) - RBRO30%	
Teor de umidade (entrada)	30%
Concentração de sólidos	77%
Densidade dos sólidos (t/m ³)	1,6
Densidade da lama RBRO30% (t/m ³)	1,405

Fonte: Elaborado pela autora

Os teores de umidade foram retirados do relatório da Quimiplan realizados para a CETR-AAMOL. A concentração de sólidos foi calculada mediante ao uso da Equação 2.

$$C_s = \frac{1}{1 + U} \quad (\text{Equação 2})$$

Na qual U é o teor de umidade. A tabela 17 mostra os dados do sedimentador.

Tabela 17 – Dados de entrada do sedimentador e bomba de recalque da LBRO

Sedimentador / Bomba de recalque	
Potência da bomba (cv)	15
Potência da bomba (kW)	11,03
Capac.- Vazão entrada RBRO50%/ hora (m³/h)	150
Capac. - Massa lama entrada RBRO50%/ hora (t/h)	200
Massa lama RBRO50% (entrada)/ dia (t)	389,19
Massa lama RBRO30% (saída)/ dia (t)	337,30
Água reaproveitada/dia (m³)	51,89
Tempo de func. da bomba / dia (h)	1,95
Consumo eletricidade/ dia (kWh)	21,47
Consumo eletricidade/tRBRO30% (kWh)	0,064
Consumo eletricidade/tRBRO15% (kWh) [2]	0,072

Fonte: CETR AAMOL

A tabela 18 traz os dados do filtro prensa

Tabela 18 – Dados do filtro prensa CTR-AAMOL

Filtro prensa	
Potência da bomba (cv)	15
Potência da bomba (kW)	11,03
Volume 1 placa (m³)	0,04
Quantidade de placas	25
Volume lama / ciclo (m³)	1
Tempo total do ciclo (min)	6

Tabela 18 – (Continuação) Dados do filtro prensa CTR-AAMOL

Filtro prensa	
Tempo de func. da bomba / ciclo (min)	4
Ciclos/ hora	10
Tempo de func. da bomba / hora (min)	40
Volume lama RBRO30% (entrada)/ hora (m³)	10
Massa lama RBRO30% (entrada)/ hora (t)	14,05
Massa lama RBRO15% (saída)/ hora (t)	12,43
Densidade RBRO a 15% umidade (saída) (t/m³)	1,60
Volume RBRO15% umidade (saída)/ hora (m³)	7,77
Água recuperada/ hora (m³)	1,62
Água recuperada/ dia (m³)	38,92
Consumo eletricidade/hora (kWh)	7,355
Consumo eletricidade/tRBRO15% (kWh) [1]	0,592

Fonte: Elaborado pela autora

A tabela 19 mostra os dados dos motores adicionais

Tabela 19 – Dados dos motores adicionais CTR AAMOL

Motores adicionais	
Potência de motores adicionais (Movimentação de placas, bandeja e agitador de lama) (cv)	6
Potência de motores adicionais (kW)	4,41
Tempo de func. dos motores / hora (min)	10
Consumo eletricidade/hora (kWh)	0,736
Consumo eletricidade/tRBRO15% (kWh) [3]	0,059

Fonte: CTR-AAMOL

Os dados de entrada utilizados para o SimaPro foram são descritos na tabela 20.

Tabela 20 – Dados de entrada no SimaPro Secagem da Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais

Parâmetro	Valor	Unidade
<i>Electricity, medium voltage {BR} market for Alloc Def, U</i>	0,723E-3	kWh
<i>Water, BR</i>	-0,304E-03	m ³

Fonte: Elaborado pela autora

7.7.3 Secagem ao ar livre e destorroamento

Para a secagem ao ar livre e destorroamento, considerou-se a umidade final de 4%, conforme definido por Quimiplan – Análise e Consultoria. Nesta etapa é necessária a entrada de 1,106kg de LBRO desidratada através do filtro prensa para gerar 1kg de LBRO a 4% de umidade. O transporte interno para estufa de secagem e retorno é de 1,5tkm. Para a estimativa da energia elétrica desta etapa utilizou-se as seguintes informações: a empresa possui um triturador de solo de 1,5kW que beneficia em média 9.600kg de LBRO por hora. Dessa forma, o consumo de energia é de 0,000156kWh. A tabela 21 mostra os dados utilizados no Simapro para a secagem ao ar livre e destorroamento.

Tabela 21 – Dados de entrada da secagem ao ar livre e destorroamento, LBRO.

Entrada/saída	Parâmetro	Valor	Unidade
Entradas	<i>Electricity, medium voltage {BR} market for Alloc Def, U</i>	0,000156	kWh
	LBRO – secagem em filtro prensa	1,106	kg
	<i>Machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, steady-state {GLO}</i>	0,013055556	h
	<i>Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {RER} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 Alloc Def, U</i>	1,5E-03	tkm

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 21 – Dados de entrada da secagem ao ar livre e destorroamento, LBRO.

Entrada/saída	Parâmetro	Valor	Unidade
Saída	Water/m ³	0,106E-3	M ³

Fonte: Elaborada pela autora

7.7.4 Secagens artificiais

Para a LBRO, realizou-se ainda a análise de três cenários fictícios, nos quais há secagem após o destorroamento (*Rotary dryer* e *flash dryer*) ou após a secagem do filtro prensa (*flash dryer*).

(A) Rotary Dryer

Considerou-se que o resíduo entra na *rotary dryer* com 4% de umidade, logo após a secagem ao ar livre. Dessa forma, têm-se 0,04kg de água para cada kg de LBRO que entra neste sistema de secagem. A capacidade média de secagem da *Rotary dryer* é de 0,06kgH₂O/h.m³, com consumo médio de energia de 6900kJ/kgH₂O evaporada. A tabela 22 traz os dados de entrada utilizados para a Rotary dryer (MUJUMDAR, 2015).

Tabela 22 – Dados de entrada da Rotary dryer (LBRO)

Entrada/saída	Parâmetro	Valor	Unidade
Entradas	Heat, district or industrial, natural gas {RoW} heat production, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW Alloc Def, U	0,276	MJ/kg
Saída	Water/m ³	0,04E-3	m ³

Fonte: Elaborado pela autora

(B) Flash Dryer

A *Flash dryer* possui capacidade média de secagem de 70kg H₂O/hm³. O consumo típico de energia é de 6750kJ/kgH₂O (MUJUMDAR, 2015). A tabela 23 traz os dados de entrada da *flash dryer*.

Tabela 23 – Dados de entrada da flash dryer

Entrada/saída	Parâmetro	Valor	Unidade
Entradas	<i>Heat, district or industrial, natural gas {RoW} heat production, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW Alloc Def, U</i>	0,270	MJ/kg
Saída	<i>Water/m³</i>	0,04E-3	m ³

Fonte: Elaborado pela autora

(C) Spray Dryer

Para a spray dryer, como a LBRO vem diretamente da secagem em filtro prensa, a água a ser evaporada é de 0,15kgH₂O/kg e a capacidade do spray dryer é de 1 a 30kg/H₂O/h.m³ e o consumo médio de energia é de 8000kJ/kg H₂O evaporada (MUJUMDAR, 2015). A tabela 24 mostra os dados de entrada utilizados para a spray dryer.

Tabela 24 – Dados de entrada do spray dryer (LBRO)

Entrada/saída	Parâmetro	Valor	Unidade
Entradas	<i>Heat, district or industrial, natural gas {RoW} heat production, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW Alloc Def, U</i>	1,2	MJ/kg
Saída	<i>Water/m³</i>	0,04E-3	m ³

Fonte: Elaborado pela autora

7.8 INPUTS UTILIZADOS NO SIMAPRO

A tabela 25 traz todos os inputs considerados no SimaPro, para cada um dos produtos considerados.

Tabela 25 – Dados de input utilizados no SimaPro

Produto	Etapas	Entrada/saída	Input	Valor	Unidade
Areia (dragagem)	Extração	Entrada	Sand, quartz	1	kg
			Water, unspecified natural origin, BR	1,11E-06	m³
			Diesel, burned in building machine {GLO} market for Alloc Def, U	4,33E-02	MJ
	Beneficiamento	Entrada	Sand Extraction - dredging	1	kg
			Water, unspecified natural origin, BR	1,11E-06	m³
			Diesel, burned in building machine {GLO} market for Alloc Def, U	4,33E-02	MJ
	Estocagem	Entrada	Sand Processing (dredging)	1	kg
			Diesel, burned in building machine {GLO} market for Alloc Def, U	6,50E-03	MJ
	Areia (cava submersa)	Todas as etapas	Entrada	Sand, quartz	1
Diesel, burned in building machine {GLO} market for Alloc Def, U				7,41E-02	MJ
Electricity, medium voltage {BR} market for Alloc Def, U				1,30E-04	kWh
Argila (mina cativa)	Extração	Entrada	Clay, unspecified	1	kg
			Diesel, burned in building machine {GLO} market for Alloc Def, U	0,02904	MJ
	Transporte	Entrada	Transport, freight, lorry 3,5-7,5 metric ton, EURO3 {RoW} transport, freight, lorry 3,5-7,5 metric ton, EURO3 Alloc Def, U	6,60E-03	tkm
			Clay Extraction (case A)	1	kg
	Beneficiamento	Entrada	Water, unspecified natural origin, BR	5,33E-04	m³
			Clay transport (case a)	1	kg
			Lignite briquettes {RoW} production Alloc Def, U	2,09	MJ

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 25 – (Continuação) Dados de input utilizados no SimaPro

Produto	Etapas	Entrada/saída	Input	Valor	Unidade
Argila (lavra de médio porte)	Extração	Entrada	<i>Clay, unspecified</i>	1	kg
			<i>Diesel, burned in building machine {GLO} market for Alloc Def, U</i>	0,014552	MJ
	Transporte	Entrada	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 Alloc Def, U</i>	6,60E-03	tkm
		Entrada	<i>Clay Extraction (case B)</i>	1	kg
	Beneficiamento	Entrada	<i>Water, unspecified natural origin, BR</i>	2,00E-04	m³
			<i>Clay transport (case B)</i>	1	kg
			<i>Lignite briquettes {RoW} production Alloc Def, U</i>	1,842415385	MJ
Argila (extração intermediária)	Extração	Entrada	<i>Clay, unspecified</i>	1	kg
			<i>Diesel, burned in building machine {GLO} market for Alloc Def, U</i>	0,0215712	MJ
	Transporte	Entrada	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {RoW} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 Alloc Def, U</i>	6,6 E-03	tkm
		Entrada	<i>Clay Extraction (case C)</i>	1	kg
	Moagem	Entrada	<i>Water, unspecified natural origin, BR</i>	0,000200016	m3
			<i>Clay transport (case C)</i>	1	kg
			<i>Electricity, medium voltage {BR} market for Alloc Def, U</i>	0,0118	kWh
	Atomização	Entrada	<i>Clay processing (case C - moagem)</i>	1	kg
			<i>Heat, district or industrial, natural gas {RoW} heat production, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW Alloc Def, U</i>	1,774016	MJ

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 25 – (Continuação) Dados de input utilizados no SimaPro

Produto	Etapa	Entrada /saída	Input	Valor	Unidade
LBRO (CETR-AMOL)	Filtro prensa	Entrada	Electricity, medium voltage {BR} market for Alloc Def, U	7,23E-04	kWh
			Water, BR	-3,04E-04	m³
	Secagem ao ar livre e destorroamento	Entrada	Electricity, medium voltage {BR} market for Alloc Def, U	1,56E-04	kWh
			Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {RER} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 Alloc Def, U	1,5	kgkm
			LBRO - Filtro prensa 15%	1,106	kg
			Machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, steady-state {GLO} market for Alloc Def, U	1,31E-05	hr
		Saída	Water/m3	1,06E-04	m³
LBRO (rotary dryer)	-	Entrada	LBRO - Secagem ao ar livre e destorroamento	1,04	kg
			Heat, district or industrial, natural gas {RoW} heat production, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW Alloc Def, U	0,276	MJ
		Saída	Water/m3	4,00E-05	m³
LBRO (Flash dryer)	-	Entrada	LBRO - Secagem ao ar livre e destorroamento	1,04	kg
			Heat, district or industrial, natural gas {RoW} heat production, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW Alloc Def, U	0,27	MJ
		Saída	Water/m3	4,00E-05	m³
LBRO (spray dryer)	-	Entrada	Heat, district or industrial, natural gas {RoW} heat production, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW Alloc Def, U	1,2	MJ
			LBRO - Filtro prensa 15%	1,15	kg
		Saída	Water/m3	1,50E-04	m³

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 25 – (Final) Dados de input utilizados no SimaPro

Produto	Etapa	Entrada/saída	Input	Valor	Unidade
Fíler (calcário)	Extração	Entrada	<i>Water, unspecified natural origin, BR</i>	2,14E-05	m ³
			<i>Calcite</i>	1	Kg
			<i>Blasting {GLO} market for Alloc Def, U</i>	1,82E-05	Kg
			<i>Diesel, burned in building machine {GLO} market for Alloc Def, U</i>	0,033329744	MJ
			<i>Electricity, medium voltage {BR} market for Alloc Def, U</i>	2,73E-05	kWh
		Saída	<i>Water/m3</i>	2,14E-05	m ³
	Britagem	Entrada	<i>Limestone, extraction</i>	1	Kg
			<i>Electricity, medium voltage {BR} market for Alloc Def, U</i>	0,000255163	kWh
			<i>Diesel, burned in building machine {GLO} market for Alloc Def, U</i>	0,003402821	MJ
		Saída	<i>Particulates, > 2.5 um, and < 10um</i>	7,51E-05	kg
			<i>Particulates, > 10 um</i>	0,000148	kg
			<i>Particulates, < 2.5 um</i>	7,51E-05	kg
	Moagem	Entrada	<i>Limestone, crushed</i>	1	kg
			<i>Electricity, medium voltage {BR} market for Alloc Def, U</i>	6,33E-02	kWh

Fonte: Elaborado pela autora

CAPÍTULO 8 – AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA

8. ANÁLISE DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA

8.1 COMPARAÇÃO ENTRE AREIA, ARGILA, FÍLER CALCÁRIO E LAMA DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Inicialmente comparou-se os processos que não possuíam grande dispêndio de energia, isto é, os dois processos produtivos de areia, o processo produtivo da argila intermediário até a moagem, a produção de fíler calcário e o beneficiamento da LBRO. A tabela 26 traz os resultados caracterizados da ACV efetuada através do SimaPro 8.3.

Tabela 26 – Resultados da ACV para Areia, Argila, Fíler e LBRO – Caracterização

Categoria de impacto	Unidade	Areia (Cava submersa)	Areia (dragagem)	Fíler	LBRO	Argila (moagem – caso intermediário)
Mudanças climáticas	kg CO2 eq	0,00685	0,008575	0,01573	0,000764	0,007699
Depleção do ozônio	kg CFC-11 eq	1,25E-09	1,57E-09	1,9E-09	1,26E-10	1,2E-09
Acidificação terrestre	kg SO2 eq	5,51E-05	6,91E-05	8,31E-05	3,39E-06	4,22E-05
Eutrofização aquática (água doce)	kg P eq	3,11E-07	3,82E-07	3,88E-06	9,41E-08	1,15E-06
Eutrofização marinha	kg N eq	3,24E-06	4,07E-06	5,07E-06	1,89E-07	2,42E-06
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	0,000386	0,000477	0,003648	0,000157	0,001664
Formação de fotoquímicos oxidants	kg NMVOC	9,41E-05	0,000118	8,81E-05	4,44E-06	5,75E-05
Formação de material particulado	kg PM10 eq	2,84E-05	3,56E-05	0,000192	1,64E-06	2,12E-05
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq	2,79E-07	3,17E-07	1,32E-05	3,25E-07	3,49E-06
Ecotoxicidade aquática (água doce)	kg 1,4-DB eq	1,34E-05	1,63E-05	0,000231	5,17E-06	5,94E-05
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DB eq	1,28E-05	1,55E-05	0,000205	5,38E-06	5,94E-05
Radiação ionizante	kBq U235 eq	0,000473	0,00059	0,001802	6,81E-05	0,000675

Fonte: Elaborado pela autora

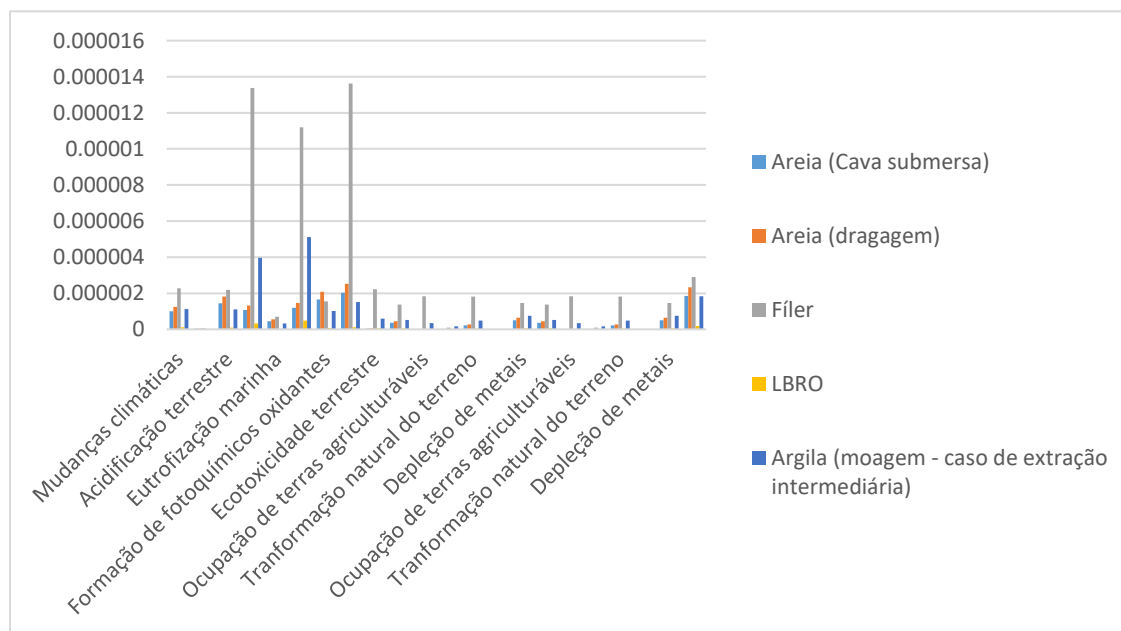
Tabela 26 – (Continuação) Resultados da ACV para Areia, Argila, Fíler e LBRO – Caracterização

Categoria de impacto	Unidade	Areia (Cava submersa)	Areia (dragagem)	Fíler	LBRO	Argila (moagem - CASO intermediário)
Ocupação de terras agriculturáveis	m ² a	4,56E-05	3,16E-05	0,010005	0,000155	0,001908
Ocupação de solo urbano	m ² a	1,53E-05	1,9E-05	7,87E-05	1,58E-05	0,000134
Tranformação natural do terreno	m ²	2,64E-06	3,26E-06	2,19E-05	5,32E-07	5,85E-06
Depleção da água	m ³	1,69E-05	-0,00046	0,001639	0,000362	0,000513
Depleção de metais	kg Fe eq	0,000227	0,000283	0,000649	2,95E-05	0,000337
Depleção de combustíveis fósseis	kg oil eq	0,002385	0,00299	0,003737	0,000243	0,002371

Fonte: Elaborado pela autora

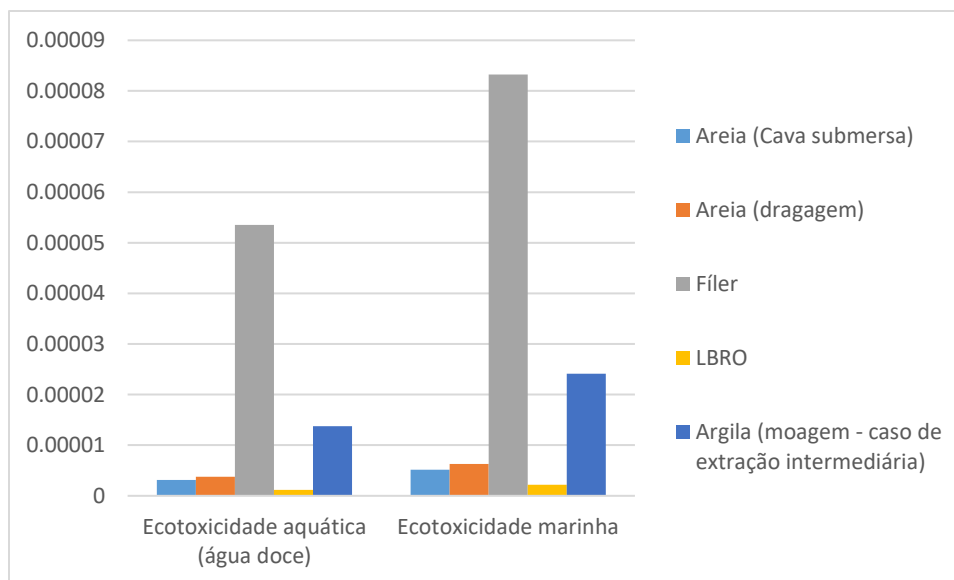
Os resultados acima foram normalizados para que seja possível a comparação entre os mesmos (Figuras 17 e 18).

Figura 17 – Resultados obtidos para a ACV da Areia, Argila, Fíler e LBRO – Normalização



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 18 – Resultados obtidos para a ACV da Areia, Argila, Fíler e LBRO – Normalização (ecotoxicidade marinha e aquática)



Fonte: Elaborado pela autora

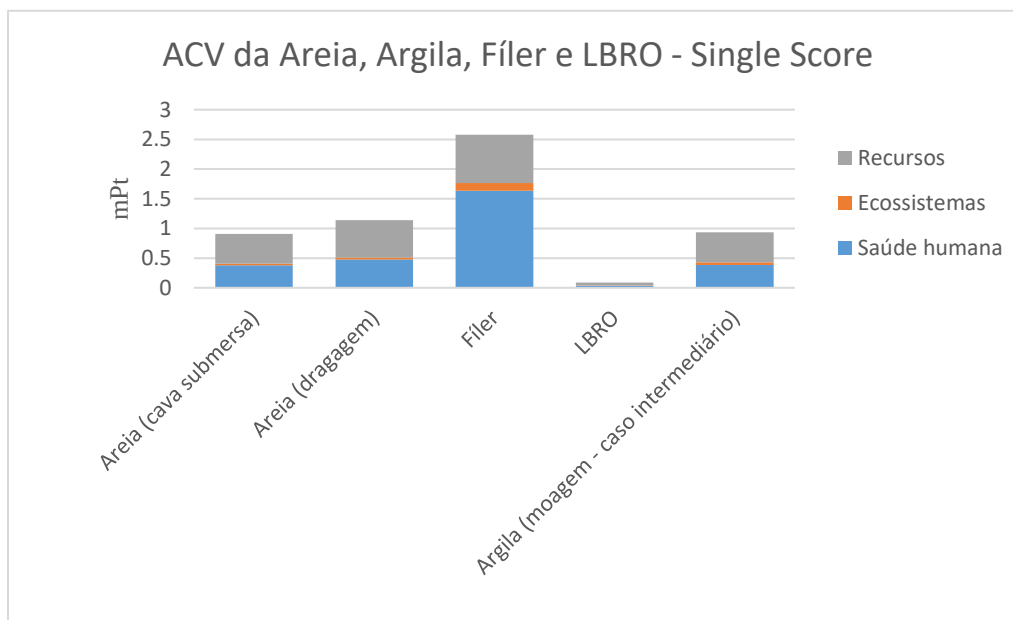
Pode-se observar através das figuras 17 e 18 que o Fíler apresentou o maior impacto em todas as categorias, excetuando-se a formação de fotoquímicos oxidantes, categoria liderada pela areia produzida através da dragagem. O maior impacto observado é o impacto decorrente do fíler para a categoria de ecotoxicidade marinha, fato devido ao grande dispêndio de energia na britagem e moagem do fíler.

Após a comparação dos impactos observados para os diferentes produtos analisados com a LBRO, observou-se que a mesma apresenta impacto maior que a areia de cava submersa em ecotoxicidade terrestre, na ocupação de terras agriculturáveis e ocupação de solo urbano, apresentando 14%, 71% e 3% a mais de impacto, respectivamente. Por outro lado, a areia proveniente da dragagem apresentou menor impacto ambiental para ecotoxicidade terrestre e ocupação de terras agriculturáveis, 3% e 80% menor. Para ecotoxicidade terrestre e ocupação de terras agriculturáveis, o impacto maior da LBRO é devido ao gasto de energia na etapa do filtro prensa. Não obstante, o impacto de ocupação de solos urbanos é principalmente proveniente do manuseio da LBRO no pátio de secagem. Dessa forma, recomenda-se utilizar a prensa apenas com sua máxima

capacidade, de maneira a evitar capacidade ociosa. Outra forma de diminuir o consumo energético é realizando-se a troca do maquinário por um mais eficiente.

Após a análise de *midpoints*, realizou-se a análise de *endpoints* e os resultados de single score estão dispostos na figura 19.

Figura 19 – Resultados obtidos para a ACV da Areia, Argila, Fíler e LBRO – *Single Score*



Fonte: Elaborado pela autora

Nota-se que todos os produtos, exceto o Fíler, apresentaram o maior impacto na categoria de recursos. O fíler, por outro lado, apresentou o maior impacto na categoria de saúde humana, devido às emissões que ocorrem na etapa de moagem da pedra calcária. Para as areias, tanto a extraída por dragagem quanto a extraída por cava submersa, o impacto é principalmente proveniente da utilização do diesel, nas etapas de extração e processamento. O impacto ambiental da argila é principalmente proveniente do transporte da mesma do local de lavra até o local de tratamento da argila.

No que tange a comparação entre os produtos, a LBRO apresentou melhor desempenho ambiental que os demais sistemas analisados. O impacto total da LBRO foi 896% menor que o da areia com cava submersa, 1148% menor que o da areia extraída através da dragagem, 2727% menor que o impacto do fíler e 927% menor que o da areia moída

para o caso intermediário de extração. A tabela 27 mostra a comparação efetuada para os diferentes produtos com a LBRO.

Tabela 27 – Comparação entre os impactos da Areia, Fíler, Argila com LBRO – Single score

Categoria de dano	Areia (cava submersa)	Areia (dragagem)	Fíler	Argila (moagem - caso intermediário)
Total	896%	1148%	2727%	927%
Saúde humana	973%	1245%	4530%	986%
Ecosistemas	544%	702%	3039%	958%
Recursos	871%	1117%	1471%	884%

Fonte: Elaborado pela autora

Mediante a observação da tabela 27, pode-se inferir que a menor diferença entre a LBRO e um produto foi na categoria de ecossistemas, comparado com a Areia extraída por cava submersa e a maior foi na categoria de saúde humana, para o fíler calcário.

8.2 COMPARAÇÃO ENTRE LBRO E ARGILA

A segunda simulação corresponde aos produtos que tiveram um tratamento de secagem artificial após sua manufatura, isto é, a argila de mina cativa, argila de lavra de médio porte, argila intermediária até atomização e a LBRO após processo de secagem em *Rotary*, *flash* ou *spray dryer*. A secagem artificial da lama após o processo de secagem natural é necessária para inserção da mesma em materiais cerâmicos, mas não é necessária para materiais cimentícios. A tabela 28 traz os resultados obtidos para a caracterização da comparação entre a LBRO e argila.

Tabela 28 – Resultados da comparação entre LBRO e Argila - caracterização

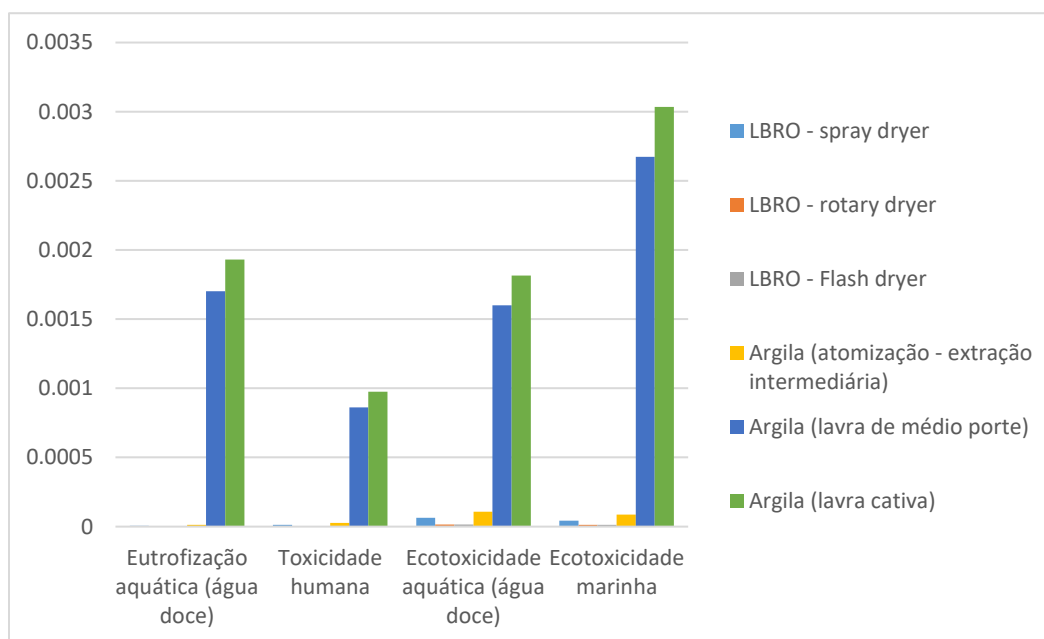
Categoria de impacto	Unit	LBRO - spray dryer	LBRO - rotary dryer	LBRO - Flash dryer	Argila (atomização - extração intermediária)	Argila (lavra de médio porte)	Argila (lavra cativa)
Mudanças climáticas	kg CO2 eq	0,07548	0,018119	0,017742	0,119047	0,044325	0,050973
Depleção do ozônio	kg CFC-11 eq	5,5E-09	1,39E-09	1,37E-09	9,32E-09	2,99E-09	3,53E-09
Acidificação terrestre	kg SO2 eq	0,000211	5,2E-05	5,1E-05	0,000354	0,000213	0,000249
Eutrofização aquática (água doce)	kg P eq	1,6E-06	4,54E-07	4,46E-07	3,44E-06	0,000493	0,00056
Eutrofização marinha	kg N eq	1,95E-06	6,36E-07	6,27E-07	5,25E-06	0,000108	0,000123
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	0,004587	0,001208	0,001185	0,008378	0,280452	0,318081
Formação de fotoquímicos oxidants	kg NMV OC	7,81E-05	2,25E-05	2,21E-05	0,000172	0,000148	0,00018
Formação de materiais fotoquímicos	kg PM10 eq	5,23E-05	1,37E-05	1,34E-05	9,81E-05	0,000157	0,000182
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq	3,88E-06	1,19E-06	1,17E-06	8,98E-06	2,75E-06	3,03E-06
Ecotoxicidade aquática (água doce)	kg 1,4-DB eq	0,000279	6,9E-05	6,76E-05	0,000468	0,006897	0,007824
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DB eq	0,000109	3E-05	2,95E-05	0,000216	0,006588	0,007472
Radiação ionizante	kBq U235 eq	0,000419	0,000162	0,00016	0,001263	0,005653	0,006459
Ocupação de terras agriculturáveis	m²a	0,000257	0,00019	0,00019	0,002095	0,002014	0,002282
Ocupação de solo urbano	m²a	3,35E-05	2,39E-05	2,37E-05	0,000182	0,000594	0,00066
Tranformação natural do terreno	m²	1,07E-05	2,95E-06	2,9E-06	2,13E-05	1E-05	1,16E-05

Tabela 28 – (Continuação) Resultados da comparação entre LBRO e Argila - caracterização

Categoria de impacto	Unit	LBRO - spray dryer	LBRO - rotary dryer	LBRO - Flash dryer	Argila (atomização - extração intermediária)	Argila (lavra de médio porte)	Argila (lavra cativa)
Depleção da água	m ³	0,000393	0,000382	0,000381	0,000546	0,000614	0,001003
Depleção de metais	kg Fe eq	0,000299	9,79E-05	9,64E-05	0,000769	0,000758	0,000875
Depleção de combustíveis fósseis	kg oil eq	0,02703	0,006462	0,006327	0,042283	0,0575	0,065467

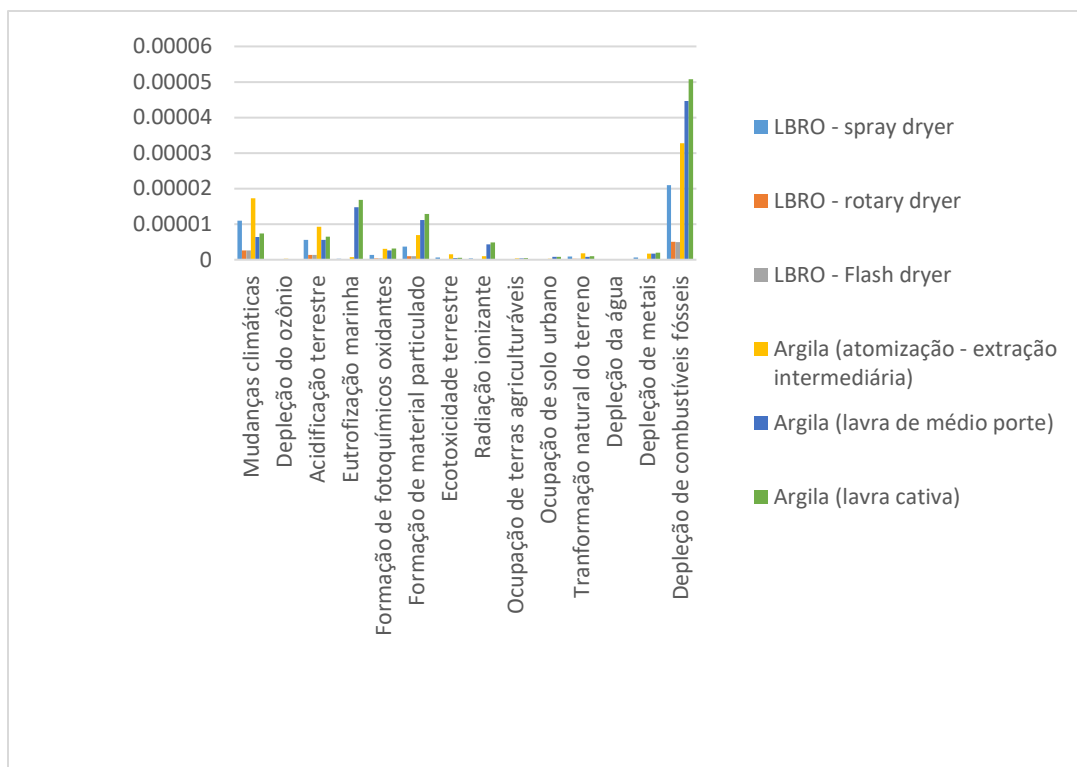
Os resultados descritos na tabela 28 normalizados pelo programa SimaPro 8.3 para permitir a comparação entre as diferentes categorias de impacto e são apresentados nas figuras 20 e 21.

Figura 20 – Resultados da ACV da Argila e LBRO – normalização



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 21 – Resultados da ACV da Argila e LBRO – normalização



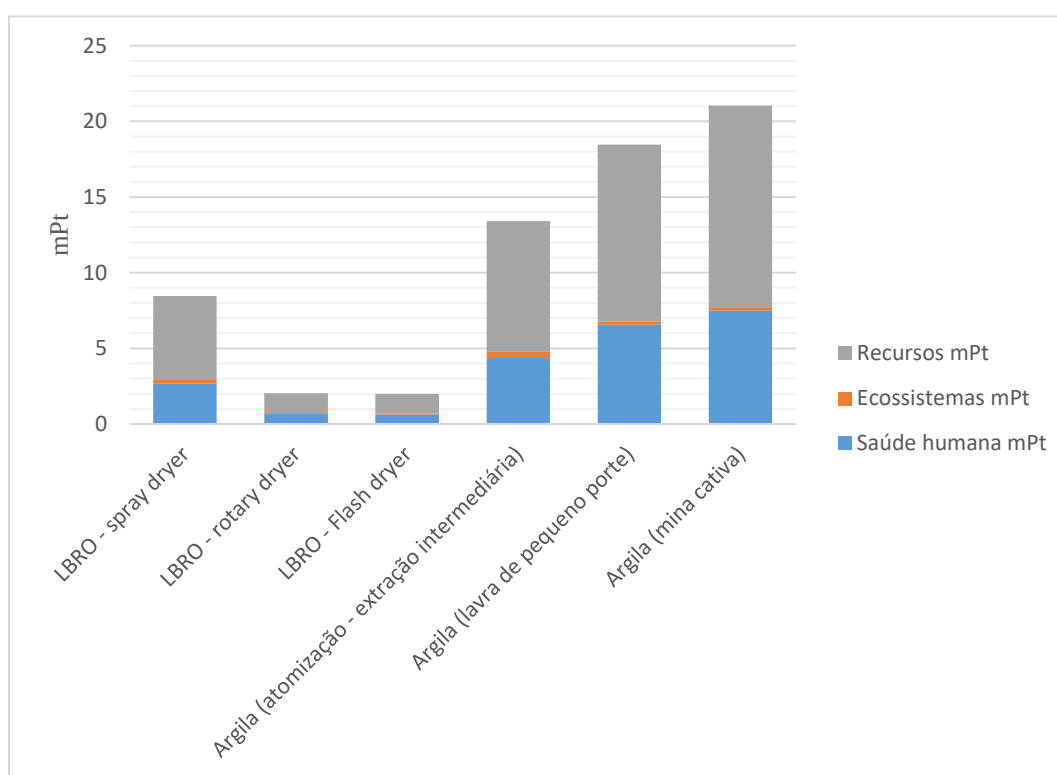
Fonte: Elaborado pela autora

Para as diferentes categorias de impacto, observa-se que as mais significantes são: eutrofização aquática, toxicidade humana, ecotoxicidade aquática e ecotoxicidade marinha (Figura 21). O produto que apresentou maior impacto para estas é a argila de mina cativa, seguido pela argila de lavra de médio porte. Este resultado é decorrente do uso do carvão como fonte de energia no processo de moagem e atomização. Dessa forma, deve-se estudar uma outra fonte de energia para estes processos, que possua menor impacto ambiental. Para a argila de extração intermediária, têm-se que a maior parte do impacto é proveniente do dispêndio de gás natural para moagem e atomização da argila. Os impactos provenientes das diferentes alternativas da LBRO são decorrentes do *input* de energia nos sistemas.

Para todas as categorias de impacto, a LBRO com secagem no *Flash dryer* após secagem ao ar livre e destorroamento, apresentou menor impacto ambiental, sendo seguida pela *Rotary dryer*, resultado condizente com o input de energia desses

processos. Através da observação das figuras 20 e 21 pode-se inferir que a LBRO, mesmo com secagem na *spray dryer*, possui melhor desempenho ambiental quando comparado às argilas, para os parâmetros analisados neste estudo. Ao comparar-se a LBRO com secagem artificial na *spray dryer* com a opção de argila com extração intermediária, notou-se que a mesma apresenta, em média, menor impacto ambiental de 50%. O resultado de single score da comparação entre argila e LBRO é apresentado na figura 22.

Figura 22 – Resultado da ACV da Argila e LBRO – Single Score



Fonte: Elaborado pela autora

Conforme pode-se observar na figura 22, os maiores impactos foram nas categorias de recursos e saúde humana. Para todos os produtos, o impacto ambiental é principalmente proveniente da fonte de energia utilizada e da quantidade do input da mesma. Para a *Spray dryer*, o impacto é quase que inteiramente decorrente da energia inserida no sistema, representando 99,81% do impacto deste produto. A tabela 29 mostra os

resultados obtidos após a comparação entre os produtos com a LBRO seca na *flash dryer*, que apresentou melhor desempenho ambiental.

Tabela 29 – Resultados da comparação da Argila e LBRO com a LBRO seca no Flash Dryer

Categoria de dano	LBRO - spray dryer	LBRO - rotary dryer	Argila (atomização - extração intermediária)	Argila (lavra de pequeno porte)	Argila (mina cativa)
Saúde humana	324%	2%	573%	826%	955%
Ecossistemas	320%	2%	579%	926%	1070%
Recursos	318%	2%	581%	193%	236%

Fonte: Elaborado pela autora

Dessa forma, nota-se que a LBRO, seca no Rotary dryer apresenta apenas 2% de impacto a mais que a LBRO seca na Flash dryer, impacto que corresponde diretamente a diferença do input de energia entre essas duas alternativas.

8.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE LBRO

Para identificar a viabilidade dos tratamentos de secagem artificial para a LBRO em relação ao processo realizado atualmente, efetuou-se a comparação entre os mesmos no SimaPro. A tabela 30 apresenta os resultados de caracterização para os processos acima citados.

Tabela 30 – Resultados da ACV para LBRO – caracterização

Categoria de impacto	Unidade	LBRO - spray dryer	LBRO - Secagem ao ar livre e destorroamento	LBRO - rotary dryer	LBRO - Flash dryer
Mudanças climáticas	kg CO ₂ eq	0,07548	0,000764	0,018119	0,017742
Depleção do ozônio	kg CFC-11 eq	5,5E-09	1,26E-10	1,39E-09	1,37E-09

Fonte: Elaborado pela autora

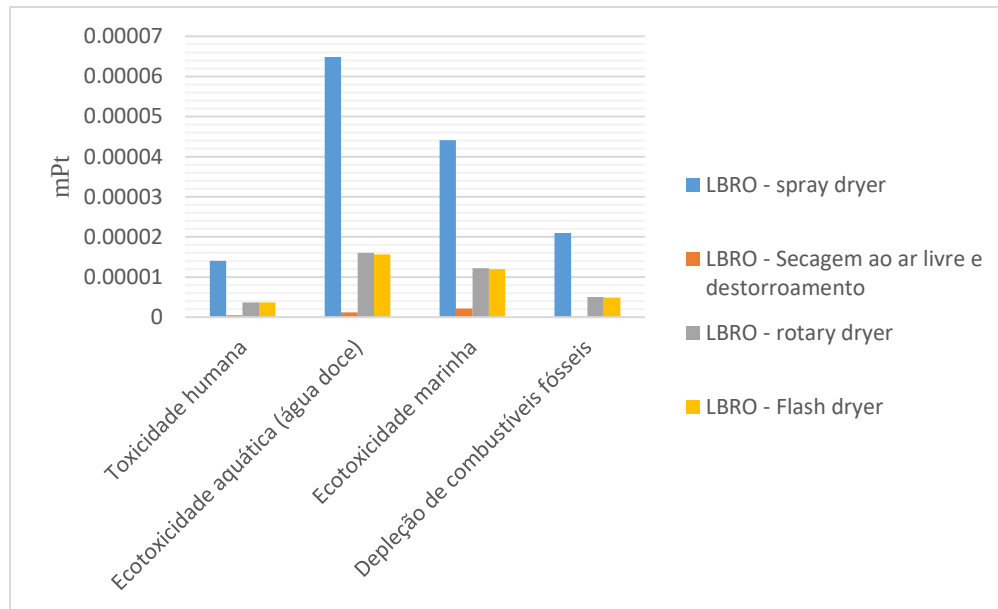
Tabela 30 – (Continuação) Resultados da ACV para LBRO – caracterização

Categoria de impacto	Unidade	LBRO - spray dryer	LBRO - Secagem ao ar livre e destorroamento	LBRO - rotary dryer	LBRO - Flash dryer
Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	0,00021 1	3,39E-06	5,2E-05	5,1E-05
Eutrofização aquática (água doce)	kg P eq	1,6E-06	9,41E-08	4,54E-07	4,46E-07
Eutrofização marinha	kg N eq	1,95E-06	1,89E-07	6,36E-07	6,27E-07
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	0,00458 7	0,000157	0,00120 8	0,00118 5
Formação de fotoquímicos oxidants	kg NMVOC	7,81E-05	4,44E-06	2,25E-05	2,21E-05
Formação de materiais fotoquímicos	kg PM ₁₀ eq	5,23E-05	1,64E-06	1,37E-05	1,34E-05
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq	3,88E-06	3,25E-07	1,19E-06	1,17E-06
Ecotoxicidade aquática (água doce)	kg 1,4-DB eq	0,00027 9	5,17E-06	6,9E-05	6,76E-05
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DB eq	0,00010 9	5,38E-06	3E-05	2,95E-05
Radiação ionizante	kBq U235 eq	0,00041 9	6,81E-05	0,00016 2	0,00016
Ocupação de terras agriculturáveis	m ² a	0,00025 7	0,000155	0,00019	0,00019
Ocupação de solo urbano	m ² a	3,35E-05	1,58E-05	2,39E-05	2,37E-05
Transformação natural do terreno	m ²	1,07E-05	5,32E-07	2,95E-06	2,9E-06
Depleção da água	m ³	0,00039 3	0,000362	0,00038 2	0,00038 1
Depleção de metais	kg Fe eq	0,00029 9	2,95E-05	9,79E-05	9,64E-05
Depleção de combustíveis fósseis	kg oil eq	0,02703	0,000243	0,00646 2	0,00632 7

Fonte: Elaborado pela autora

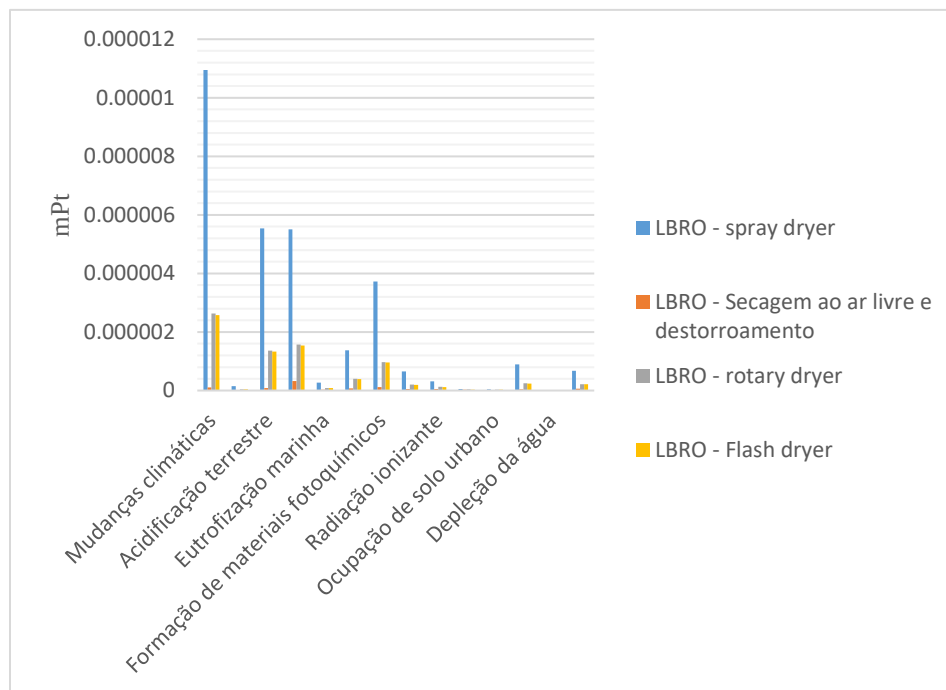
Os resultados obtidos foram normalizados pelo programa SimaPro para que possam ser comparados (Figura 23 e 24).

Figura 23 – Resultado da ACV da LBRO - Normalização



Fonte: Elaborado pela autora

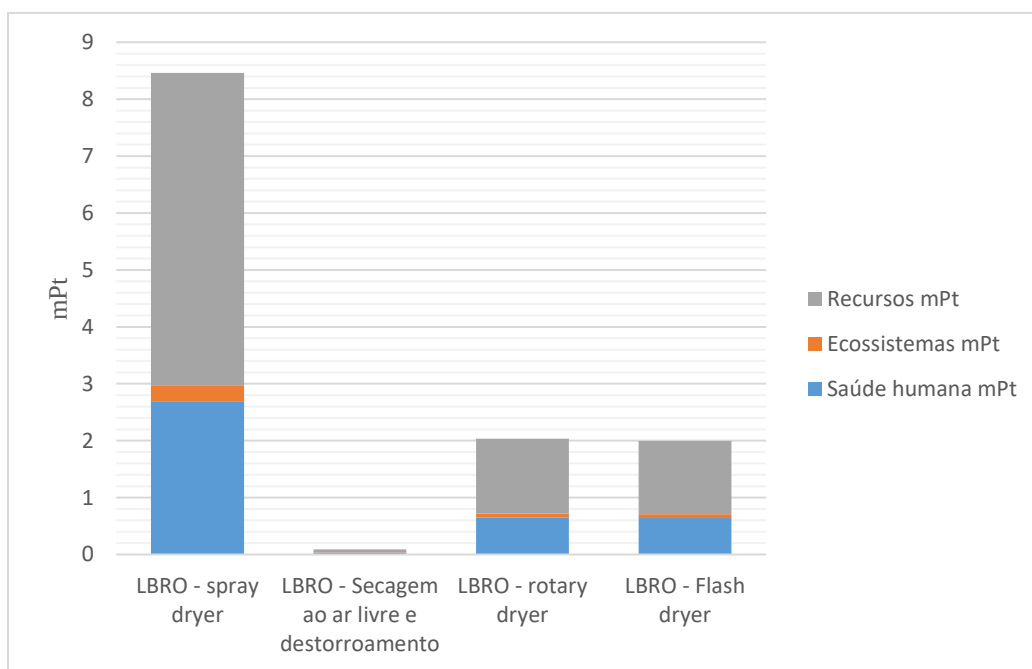
Figura 24 – Resultados da ACV da LBRO – Normalização



Fonte: Elaborado pela autora

Pode-se observar pelas figuras 23 e 24 que os maiores impactos observados foram nas categorias de ecotoxicidade aquática, ecotoxicidade marinha, depleção de combustíveis fósseis e toxicidade humana. Para as alternativas de secagem da LBRO, isto é, *Spray Dryer*, *Flash Dryer* e *Rotary dryer*, este impacto é advindo do consumo de gás natural. Para a LBRO com secagem natural e destorroamento, os impactos nestas categorias foram devido ao gasto de energia no filtro prensa, para ecotoxicidade marinha e aquática e devido ao transporte interno do material para depleção de combustíveis fósseis. Na categoria de toxicidade humana, destacaram-se o transporte interno do material e o gasto de energia do filtro prensa. O resultado de single score é demonstrado na Figura 25.

Figura 25 – Resultado obtido para LBRO – Single Score



Fonte: Elaborado pela autora

Pode-se observar que o impacto ambiental das alternativas de secagem da LBRO são maiores que o da LBRO, apresentando diferenças acima de 1000%: 2087% para a alternativa de *Flash Dryer*, 2134% para a alternativa de *Rotary Dryer* e 9177% para LBRO de *Spray Dryer*. A tabela 31 traz a comparação dos impactos observados para as diferentes categorias de single score.

Tabela 31 – Comparação entre as alternativas de LBRO e a Secagem natural e destorroamento

Categoria de dano	LBRO - spray dryer	LBRO - rotary dryer	LBRO - Flash dryer
Total	9177%	2134%	2087%
Saúde humana	7521%	1752%	1714%
Ecossistemas	6562%	1528%	1495%
Recursos	10514%	2442%	2389%

Fonte: Elaborado pela autora

Mediante a observação da tabela 31, percebe-se que os impactos ambientais das alternativas de secagem da LBRO inviabilizam, do ponto de vista ambiental, a escolha destas alternativas. No entanto, é preciso ressaltar que outras variáveis devem ser consideradas ao realizar a escolha da alternativa para o projeto de uma CETR, tais quais: área disponível e clima da região.

8.4 ETAPAS DO PROCESSO DE MANUFATURA DA LBRO

Nesta parte do trabalho, objetivou-se identificar qual etapa do processamento da LBRO, conforme realizado na CETR AAMOL, possui o maior impacto ambiental. A tabela 32 mostra os impactos aferidos para as diferentes etapas da LBRO.

Tabela 32 – Representação de cada etapa no impacto total da LBRO

Categoria de dano	Electricity, medium voltage {BR} market for Alloc Def, U	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {RER} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 Alloc Def, U	LBRO - Filtro prensa 15%	Machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, steady-state {GLO} market for Alloc Def, U
Total	3%	45%	17%	34%
Saúde humana	4%	44%	20%	31%
Ecossistemas	7%	33%	35%	24%
Recursos	3%	47%	14%	37%

Fonte: Elaborado pela autora

Ao observar a tabela 32, nota-se que o impacto da LBRO é principalmente proveniente do transporte interno e do manuseio da LBRO no pátio de secagem, este fato é decorrente do tipo de maquinário utilizado nestas etapas: máquinas movidas a diesel com grande consumo deste insumo.

Para diminuir o impacto total da LBRO com secagem natural, sugere-se construir uma usina verde com menores distâncias – impactando diretamente no impacto gerado pelo transporte dentro da usina. Outra possibilidade é investigar alternativas de transporte com menor consumo de energia, ou caminhões com maior capacidade de transporte.

8.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE QUANTO ÀS DISTÂNCIAS

8.5.1 Areia

Para a análise de sensibilidade da areia quanto às distâncias de envio do material, considerou-se que a extração ocorre em Aracruz- ES e que a areia é distribuída nos centros de Vila Velha, Serra, Vitória e Cariacica. A tabela 33 traz as distâncias consideradas de envio. Considerou-se um ajuste de 10% nas distâncias encontradas através do *Google Maps*.

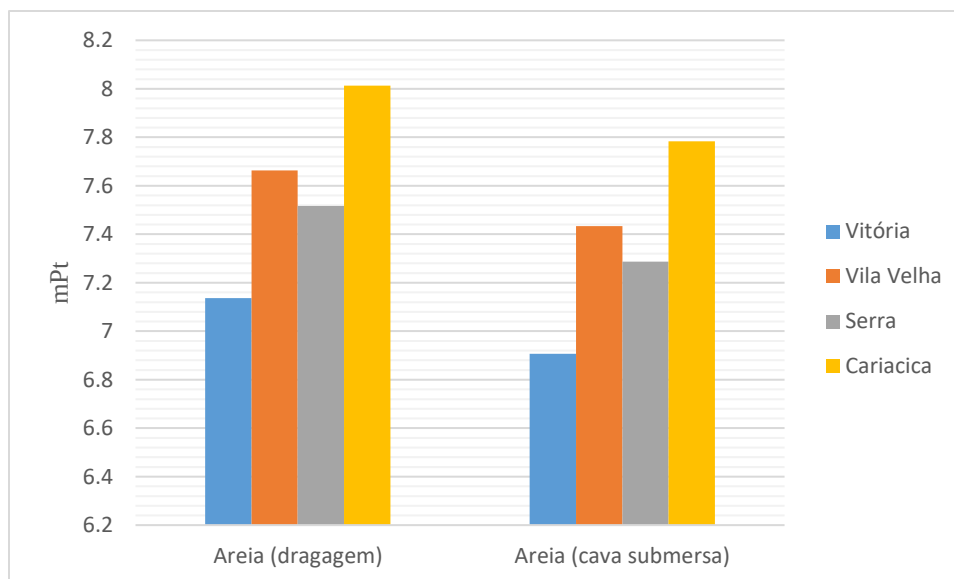
Tabela 33 – Distâncias de envio da areia

Fonte	Destino	Distância (km)	Ajuste	Total (km)
Aracruz	Vila Velha	89,3	10%	98,23
	Serra	87,3	10%	96,03
	Cariacica	94,1	10%	103,51
	Vitória	82,1	10%	90,31

Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados obtidos para a análise de sensibilidade quanto ao transporte, seguem dispostos na Figura 26.

Figura 26 – Resultado da análise de sensibilidade da areia – Single Score



Fonte: Elaborado pela autora

Conforme esperado, o maior impacto ambiental foi para a maior distância percorrida, isto é, transporte de Aracruz até Cariacica. Não obstante, pode-se observar que embora o impacto ambiental corresponda de maneira aproximada ao aumento da distância de transporte, ele não corresponde diretamente. Comparando-se a distância de Cariacica com a de Vitória, têm-se uma diferença de 15%. O impacto ambiental, por outro lado, apresentou diferença de 12 e 13% para a areia extraída por dragagem e por cava submersa, respectivamente.

A tabela 34 traz os resultados das diferentes categorias de impacto analisadas no Single Score na qual pode-se observar que a categoria que mais foi impactada, em termos percentuais, é a categoria de ecossistemas. No entanto, os maiores impactos identificados foram na categoria de recursos.

Tabela 34 – Resultado da análise de sensibilidade da areia – *Single Score*

Categoria	Unit	Areia (dragagem - Vitória)	Areia (dragagem - Vila Velha)	Areia (dragagem - Serra)	Areia (dragagem - Cariacica)	Areia (cava submersa - Vitória)	Areia (cava submersa - Vila Velha)	Areia (cava submersa - Serra)	Areia (cava submersa - Cariacica)
Total	mPt	7,136915	7,663003	7,516867	8,013728	6,907216	7,433304	7,287169	7,784029
Saúde Humana	mPt	2,745028	2,944076	2,888785	3,076774	2,649199	2,848247	2,792956	2,980946
Ecossistemas	mPt	0,227167	0,244226	0,239487	0,255598	0,220738	0,237796	0,233058	0,249169
Recursos	mPt	4,16472	4,474701	4,388596	4,681356	4,037279	4,347261	4,261155	4,553915

Fonte: Elaborado pela autora

8.5.2 Argila

Para a Argila, considerou-se os três casos com atomização e que o transporte é efetuado de São Roque do Canaã até os centros de Vitória, Vila Velha, Serra e Cariacica. A tabela 35 mostra as distâncias utilizadas na simulação.

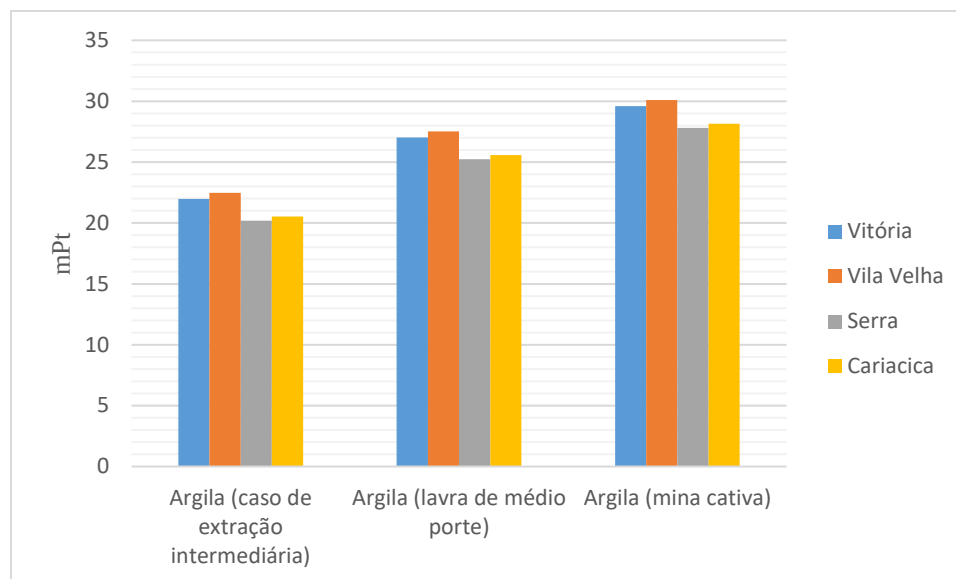
Tabela 35 – Distâncias utilizadas na análise de sensibilidade da argila

Fonte	Destino	Distância (km)	Ajuste	Total (km)
São Roque do Canaã	Vila Velha	124	10%	136,4
	Serra	92,6	10%	101,86
	Cariacica	97,3	10%	107,03
	Vitória	117	10%	128,7

Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados obtidos na análise de sensibilidade quanto ao transporte da argila, seguem dispostos na figura 27.

Figura 27 – Resultados obtidos para análise de sensibilidade da Argila – Single Score



Fonte: Elaborado pela autora

Novamente o resultado foi condizente com a inserção de maiores distâncias no programa. Para a argila, por outro lado, o impacto ambiental total não se aproximou do aumento de distâncias. Por exemplo, comparando-se o cenário da Serra com o de Vila Velha, têm-se um aumento de 34% da distância, não obstante, os impactos ambientais para Vila velha foram 11, 9 e 8% maiores que os do envio para Serra, para a Argila de extração intermediária, Argila de lavra de médio porte e mina cativa, respectivamente.

8.5.3 Fíler

Para a análise de sensibilidade do fíler quanto às distâncias de envio do material, considerou-se que a extração ocorre em Castelo e que o fíler é distribuído nos centros de Vila Velha, Serra, Vitória e Cariacica. A tabela 36 traz as distâncias consideradas de envio. Considerou-se um ajuste de 10% nas distâncias encontradas através do *Google Maps*.

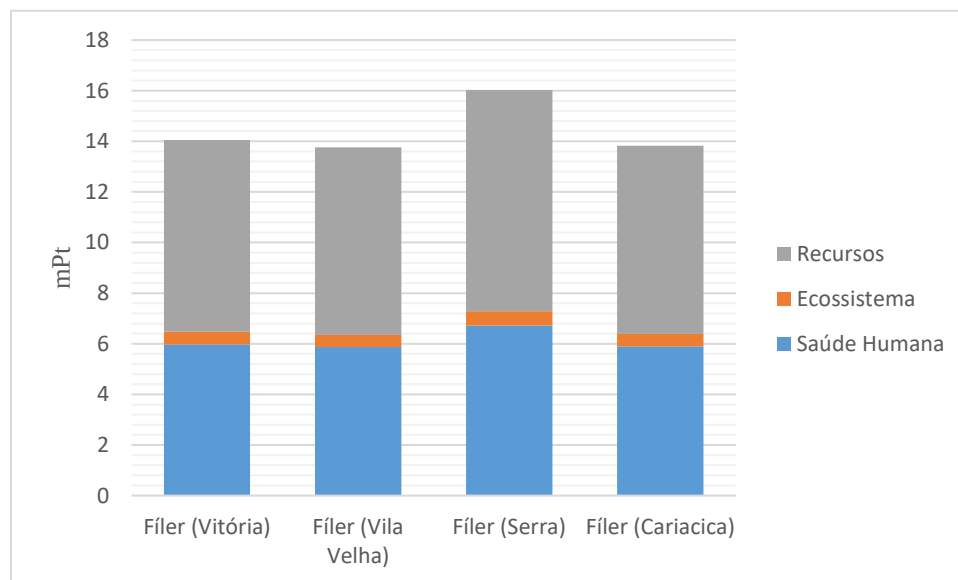
Tabela 36 – Distâncias utilizadas na análise de sensibilidade do fíler

Fonte	Destino	Distância (km)	Ajuste	Total (km)
Castelo	Vila Velha	153	10%	168,3
	Serra	184	10%	202,4
	Cariacica	154	10%	169,4
	Vitória	157	10%	172,7

Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados obtidos para a análise de sensibilidade do fíler seguem dispostos na figura 28. Para o fíler, a correspondência do impacto com o input de distâncias no transporte foi mais direta do que o obtido na argila, apresentando diferença de até de 4% entre o aumento de distância e o aumento do impacto.

Figura 28 – Resultado da análise de sensibilidade do fíler (Single Score)



Fonte: Elaborado pela autora

8.5.4 Lama do beneficiamento de rochas ornamentais

Para a LBRO utilizou-se de 4 cenários de localização da CETR: Serra, Cachoeiro de Itapemirim, Barra de São Francisco e São Domingos do Norte. Essas localizações foram escolhidas por serem os maiores pólos de produção de rochas ornamentais (SARDOU

FILHO *et al.*, 2013). Para encontrar um ponto para a fixação da fábrica utilizou-se a seguinte premissa: que a mesma seria instalada logo ao lado de uma grande indústria de rochas ornamentais. Outrossim, escolheu-se 4 cidades para que o produto seja enviado: Centro de Vila Velha, Centro da Serra, Centro de Cariacica e Centro de Vitória, que correspondem às cidades com maior população do ES. Além disso, para efetuar uma correção no valor obtido através do *Google Maps*, considerou-se variabilidade de 10%. A tabela 37 mostra as distâncias calculadas para o transporte final da LBRO tratada.

Tabela 37 – Distâncias de transporte da LBRO tratada

Fonte	Chegada	Distância (km)	Ajuste	Total (km)
Serra	Vila Velha	17,7	10%	19,47
	Serra	16,1	10%	17,71
	Cariacica	21,3	10%	23,43
	Vitória	10,1	10%	11,11
Cachoeiro de itapemirim	Vila Velha	145	10%	159,5
	Serra	177	10%	194,7
	Cariacica	146	10%	160,6
	Vitória	156	10%	171,6
Barra de são francisco	Vila Velha	245	10%	269,5
	Serra	214	10%	235,4
	Cariacica	250	10%	275
	Vitória	238	10%	261,8
São domingos do norte	Vila Velha	197	10%	216,7
	Serra	166	10%	182,6
	Cariacica	202	10%	222,2
	Vitória	190	10%	209

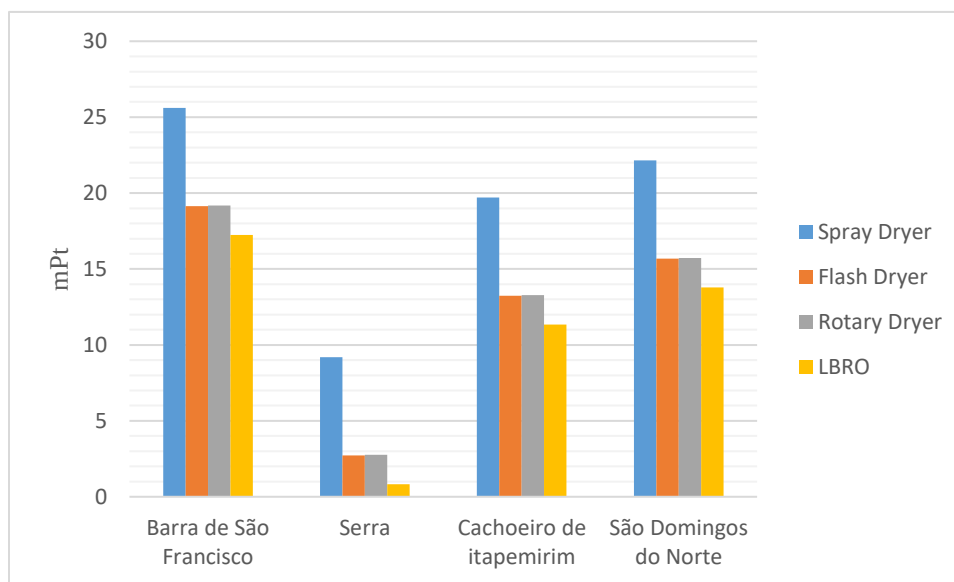
Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados foram separados por local de envio, isto é: Vitória, Vila Velha, Serra e Cariacica. Objetivou-se, por conseguinte, realizar a comparação entre as alternativas de localização da CETR-AAMOL.

(A) Vitória

A figura 29 traz os resultados obtidos para a localização de Vitória. Nota-se que a localidade que apresentou menor impacto ambiental para o envio da LBRO para Vitória é a Serra. Para a análise de sensibilidade quanto ao transporte do produto de LBRO, observa-se que a LBRO produzida na CETR-AAMOL apresenta maior sensibilidade quanto ao input de energia. Comparando-se a distância entre São Domingos do Norte e a Serra, que apresentou melhor desempenho, há uma diferença de 1781%, o impacto por outro lado apresentou 1583% de diferença no impacto total. Para as alternativas de secagem a sensibilidade foi menor: a alternativa spray dryer apresentou 141% a mais de impacto ambiental para São Domingos do Norte comparando-se com a Serra, esta diferença na sensibilidade das alternativas é devida ao grande input de energia das mesmas.

Figura 29 – Resultado da análise de sensibilidade da LBRO para Vitória

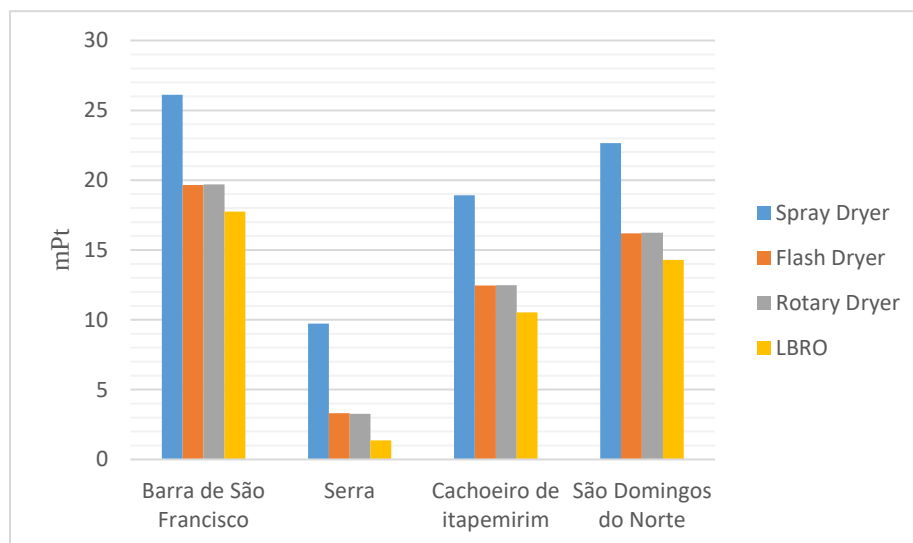


Fonte: Elaborado pela autora

(B) Vila Velha

A figura 30 mostra os resultados obtidos para o envio da LBRO até Vila Velha. Como pode-se observar pela figura 30, a Serra apresentou melhor desempenho que as demais localidades. Outrossim, o impacto ambiental associado à spray dryer e ao transporte de Serra até Vila Velha representa 68% do impacto gerado pela LBRO e seu respectivo transporte de Cachoeiro de Itapemirim até Vila Velha.

Figura 30 – Resultado da análise de sensibilidade da LBRO – Vila Velha

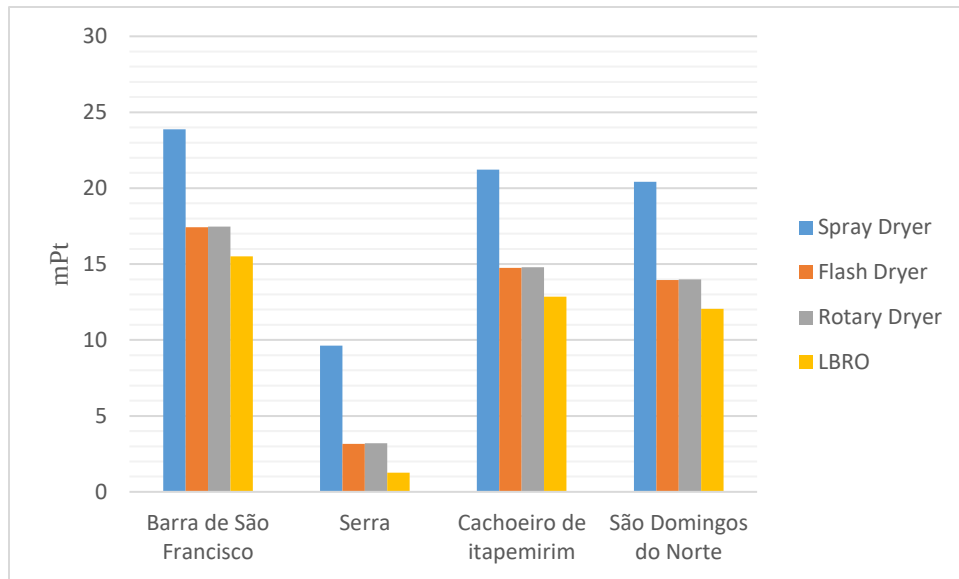


Fonte: Elaborado pela autora

(C) Serra

A figura 31 mostra os resultados da análise de sensibilidade para o envio até o centro da Serra.

Figura 31 – Resultado da análise de sensibilidade da LBRO – Serra



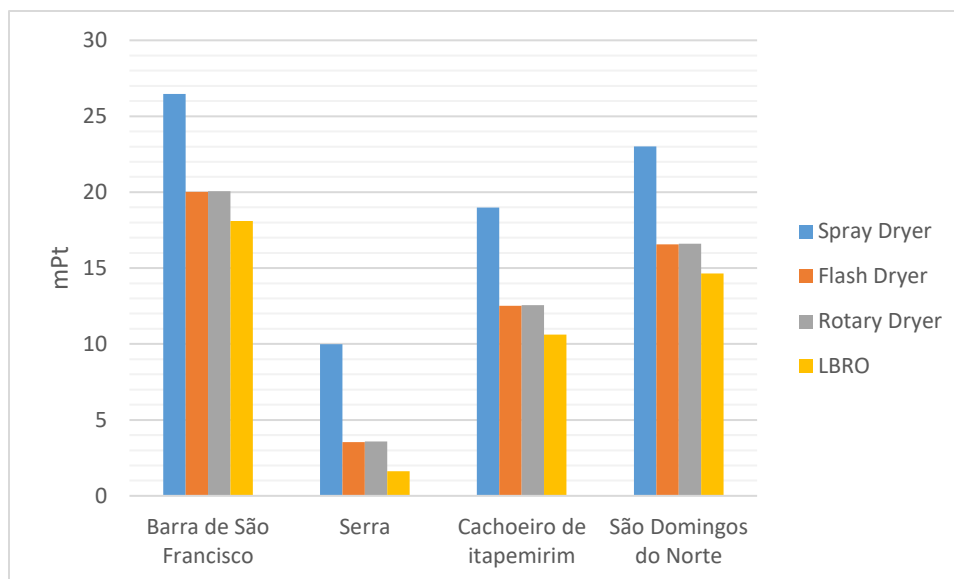
Fonte: Elaborado pela autora

Para o envio para a Serra, conforme o esperado, a localização da CETR-AAMOL na Serra é o melhor cenário. A Spray dryer apresenta apenas 80% do impacto ambiental aferido pela LBRO apenas com secagem natural para a unidade de São Domingos do Norte.

(D) Cariacica

A figura 32 mostra os resultados obtidos para a análise de sensibilidade da LBRO, ao enviar a mesma para Cariacica. Para o envio até Cariacica, o spray dryer proveniente da Serra apresentou 94% do impacto da LBRO produzida em Cachoeiro de Itapemirim e transportada até Cariacica somente com a secagem natural.

Figura 32 – Resultado da Análise de sensibilidade da LBRO – Cariacica

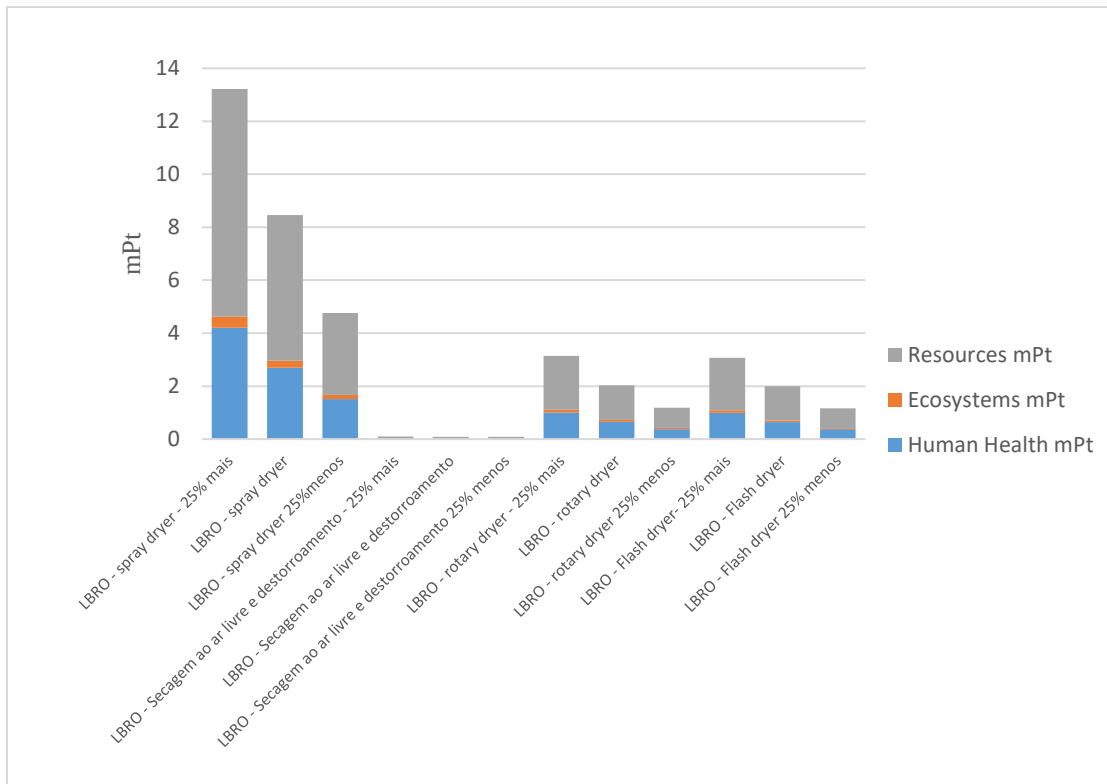


Fonte: Elaborado pela autora

8.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE QUANTO AO INPUT DE ENERGIA

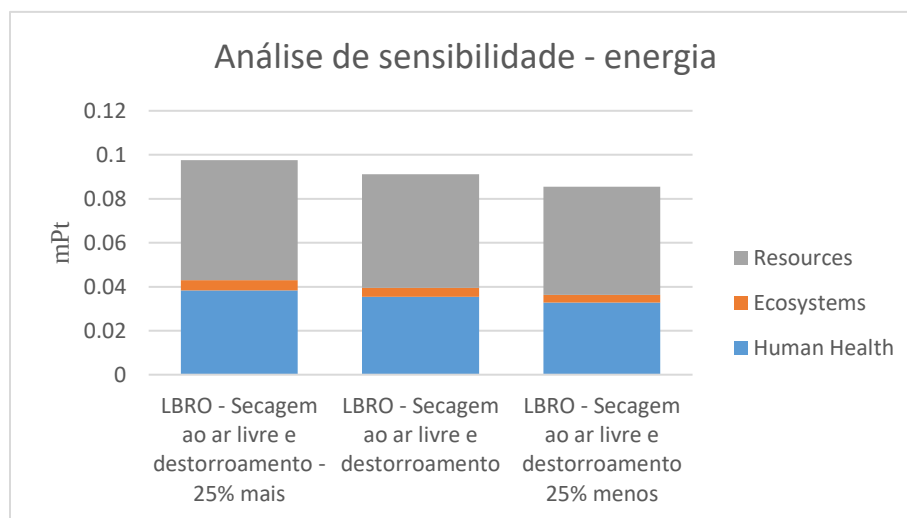
Para a análise de sensibilidade quanto à inserção de energia, considerou-se variabilidade de 25% na umidade de entrada de cada etapa do tratamento. Outrossim, realizou-se a variação de todos os inputs de energia de 25%, devido a variabilidade do consumo da mesma dependendo da produção ou da tipologia do maquinário. As figuras 33 e 34 mostram os resultados obtidos para a análise de sensibilidade quanto ao input de energia.

Figura 33 – Resultado da análise de sensibilidade quanto ao input de energia



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 34 – Resultado da análise de sensibilidade quanto ao input de energia - LBRO



Fonte: Elaborado pela autora

Para a análise de sensibilidade quanto ao input de energia, notou-se que os cenários com maior consumo de energia apresentaram maior sensibilidade ao aumento do mesmo. A alternativa que conta com a *Spray Dryer* apresentou variação de 56% para o maior cenário de consumo em relação ao cenário intermediário e diminuição do impacto de 44% para o cenário de menor consumo. Ambas as alternativas Rotary e flash dryer apresentaram 54% de variação para o cenário de maior consumo e 42% para o cenário de menor consumo. Por outro lado, a LBRO produzida apenas com secagem natural apresentou pouca sensibilidade ao maior consumo de energia: a variação do impacto total foi de cerca de 7% para o cenário de maior consumo e 6% para o cenário de menor consumo.

CAPÍTULO 9 – INTERPRETAÇÃO

9. INTERPRETAÇÃO

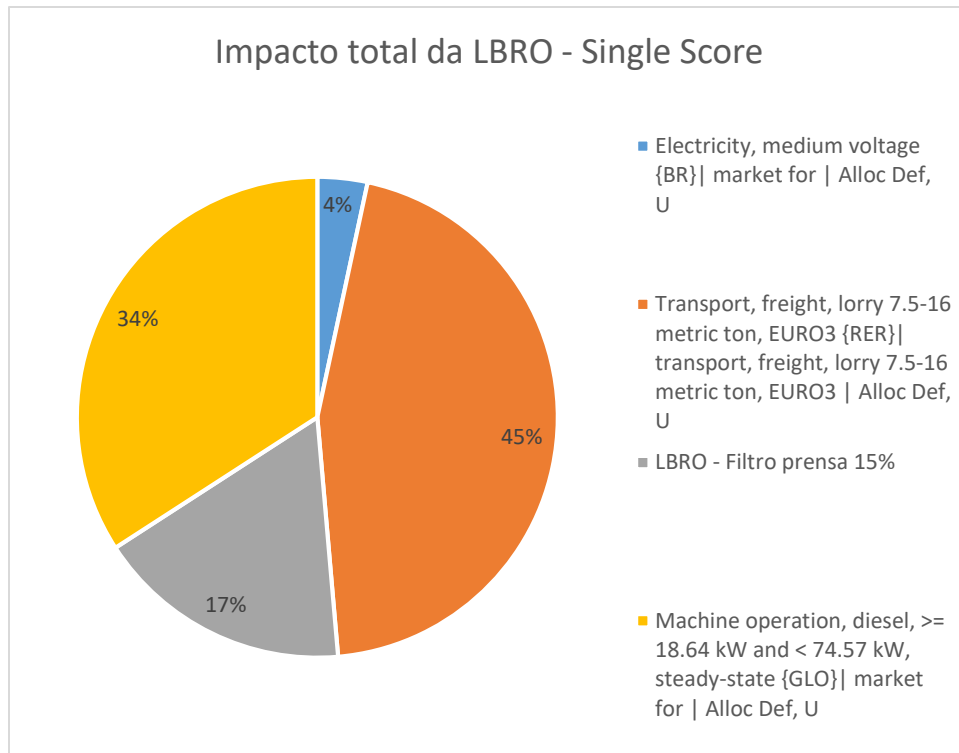
Para a primeira análise, observa-se que a LBRO apresentou melhor resultado que as demais alternativas estudadas, isto é, areia, argila e fíler. A LBRO apresentou diferença de 896% no impacto total em relação a areia, 1148% em relação a areia extraída por dragagem, 2727% do fíler e 927% da argila considerando-se o caso intermediário somente até a moagem.

Para a análise de comparação entre os casos com secagem artificial e a argila com atomização, a LBRO, mesmo no seu pior cenário apresentou resultados mais satisfatórios que a argila com atomização, representando, no cenário de *spray dryer*, apenas 63% do impacto apresentado pela argila de caso de extração intermediário com atomização.

A comparação entre as tipologias de secagem da LBRO apresentou resultados condizentes com o esperado: a LBRO com secagem natural apresentou impacto muito menor que as secagens artificiais: a diferença entre os processos artificiais e a secagem natural foi de 9177%, 2134% e 2087% para *spray dryer*, *Rotary dryer* e *Flash Dryer*, respectivamente.

Ao realizar a análise do processo de manufatura da LBRO com secagem natural, conforme o efetuado na CETR-AAMOL, observou-se que o impacto total é principalmente decorrente do transporte dentro da fábrica e pelo manuseio do produto no pátio de secagem, correspondendo a 45 e 34%, respectivamente (Figura 35).

Figura 35 – Impacto total da LBRO – Single Score



Fonte: Elaborado pela autora

A análise de sensibilidade quanto às distâncias mostrou que, para o envio do produto final para os centros da Serra, Vitória, Vila Velha e Cariacica, a melhor localização da CETR – AAMOL é na Serra. Além disso, notou-se que a LBRO com secagem natural foi a tipologia de LBRO que apresentou maior sensibilidade quanto ao transporte. Para a areia, argila e fíler, a areia apresentou maior sensibilidade quanto ao transporte, sendo a areia de cava submersa a mais sensível. A tabela 28 mostra até onde a LBRO pode ser transportada comparando-se o impacto da mesma com areia, argila e fíler nos seus diferentes cenários desconsiderando-se o transporte destes materiais.

Tabela 38 – Comparação entre a LBRO proveniente da Serra e Cachoeiro de Itapemirim com areia, argila e fíler

Fonte	Produto	Areia (cava submersa)	Areia (dragagem)	Fíler	Argila (extração intermediária)	Argila (mina cativa)	Argila (lavra de médio porte)
Serra	LBRO (secagem natural)	11,11km	11,11km	23,43km	23,43km	23,43km	23,43km
	LBRO (Flash Dryer)	-	-	-	23,43km	23,43km	23,43km
	LBRO (Rotary Dryer)	-	-	-	23,43km	23,43km	23,43km
	LBRO (Spray Dryer)	-	-	-	23,43km	23,43km	23,43km
Cachoeiro	LBRO (secagem natural)	-	-	-	194,7km	194,7km	194,7km
	LBRO (Flash Dryer)	-	-	-	171,6km	194,7km	194,7km
	LBRO (Rotary Dryer)	-	-	-	171,6km	194,7km	194,7km
	LBRO (Spray Dryer)	-	-	-	-	194,7km	-

Fonte: Elaborado pela autora

A análise de sensibilidade quanto à inserção de energia nos sistemas trouxe um resultado surpreendente: a LBRO com secagem natural não apresentou correlação direta com o input de energia, isto é, o aumento em 25% da inserção de energia não acarretou um aumento de 25% no impacto ambiental total aferido, mas sim de cerca de 6%. Isto ocorre, pois o produto não possui grande dispêndio de energia e a maior parte do seu impacto está concentrada no transporte da LBRO dentro da fábrica. Para as alternativas com secagem artificial, por outro lado, apresentaram grande sensibilidade ao input de energia: apresentando aumento de cerca de 50% no impacto total aferido.

CAPÍTULO 10 – CONCLUSÕES

10. CONCLUSÕES

Conclui-se que a LBRO é ambientalmente preferível às alternativas estudadas dentro dos parâmetros analisados. Para a comparação entre a argila moída, fíler, areia de cava submersa e dragagem, e LBRO a LBRO não somente apresentou menor impacto ambiental que os demais materiais de construção, mas também apresentou impacto total na categoria de *endpoint (Single Score)* 896% menor que o impacto da areia com cava submersa, caracterizada como a segunda melhor alternativa em termos ambientais.

Para a avaliação dos cenários fictícios de secagem, *spray dryer*, *flash dryer* e *Rotary dryer*, comparou-se os mesmos com o processo de beneficiamento realizado pela CETR-AAMOL e também com os três cenários de argila com secagem artificial: argila de mina cativa, lavra de pequeno porte e cenário intermediário com atomização. Para a primeira simulação, identificou-se que os resultados da CETR-AAMOL eram mais vantajosos em relação aos demais, sendo o segundo melhor resultado o da *Flash dryer*. Já na segunda simulação obteve-se que a LBRO, mesmo em seu pior cenário, *spray dryer*, apresentava vantagem sobre a argila, com impacto que representa apenas 63% o melhor cenário de argila: argila intermediária com atomização.

Para as análises de sensibilidade observou-se que o melhor cenário de transporte da LBRO para os centros de Vitória, Vila Velha, Serra e Cariacica é para a CETR-AAMOL situada na Serra: pode-se efetuar o transporte da LBRO até Vitória e ainda assim obter um resultado melhor que a produção das areias. Para os demais produtos, a LBRO com secagem natural pode ser enviada a quaisquer um dos pólos citados e ainda assim apresentar ganho ambiental. Na análise de sensibilidade quanto aos inputs de energia aferiu-se que a LBRO com secagem natural não apresentou grande sensibilidade ao aumento de 25% de energia: o impacto total aferido para o pior cenário foi apenas 7% maior que o impacto da categoria média.

10.1 SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS

Para complementar este estudo e para suprir algumas lacunas encontradas ao longo desta pesquisa, sugere-se que sejam realizados os seguintes levantamentos:

- Estudos de inventário nacionais para areia, argila e fíler, que contenham maiores detalhes sobre o processo de fabricação do material.
- Avaliação do Ciclo de vida da inserção da LBRO em algum produto, como a argamassa, por exemplo, podendo assim delimitar as especificações da lama ao final de seu processo de beneficiamento.
- Avaliação do Ciclo de vida da LBRO *cradle-to-grave*.
- Realizar as análises efetuadas para diferentes tipos de fonte de energia.
- Realizar um estudo sobre a emissão de particulados da secagem da LBRO no pátio de secagem.

CAPÍTULO 11 – REFERÊNCIAS

11. REFERÊNCIAS

11.1 BIBLIOGRAFIA CITADA

ABIROCHAS. Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. **Panorama Mundial do Setor de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2013**. São Paulo: Abirochas, 2014. 12 p. Informe 13.

_____. **Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em Janeiro de 2015**. São Paulo: Abirochas. 2015. 9p. Informe: 02.

_____. **Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2016**. São Paulo: Abirochas. 2017. 13p. Informe 01.

ALENCAR, C. R. A.. **Manual de Caracterização, Aplicação, Uso e Manutenção das Principais Rochas Comerciais no Espírito Santo**. Cachoeiro de Itapemirim: Instituto Euvaldo Lodi, 2013. 244 p.

ALVES, J. O.; JUNCA, E.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S.; RESÍDUO DO CORTE DE GRANITO: INOVAÇÃO TECNOLÓGICA PARA A DESTINAÇÃO FINAL. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 12, n. 2, p. 123, 2015.

ALVES, H. J.; MELCHIADES, F. G.; BOSCHI, A. O. Levantamento inicial do consumo de energias térmica e elétrica na indústria brasileira de revestimentos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 12, n. 1/2, p. 17-21, 2007.

ANEPAC. **Areia**. 2016. Disponível em <<http://www.anepac.org.br/agregados/areia-e-brita/item/136-areia>>. Acesso em 17 de Novembro de 2017.

BAITZ, M.; ALBRECHT, S.; BRAUNER, E.; BROADBENT, C.; CASTELLAN, G.; CONRATH, P.; FAVA, J.; FINKBEINER, M.; FISCHER, M.; PALMER, P. F.; KRINKE, S.; LEROY, C.; LOEBEL, O.; MCKEOWN, P.; MERSIOWSKY, I.; MOGINGER, B.; PFAADT, M.; REBITZER, G.; ROTHER, E.; RUHLAND, K.; SCHANSSEMA, A.; TIKANA, L. LCA's theory and practice: like ebony and ivory living in perfect harmony?. **The International**

Journal Of Life Cycle Assessment, [S.l.], v. 18, n. 1, p.5-13, 31 jul. 2012. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-012-0476-x>.

BASTOS, R. S.; ULIANA, J.G; CALMON, J. L; TRISTAO, F.A; VIEIRA, G.K.. Revisão bibliográfica dos estudos sobre a aplicação da lama do beneficiamento de rochas ornamentais na produção de materiais de construção. In: 55º Congresso Brasileiro do Concreto. CBC 2013, Gramado - RS. **Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2013. v.1. p.1-16.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**: Formação básica para engenheiros. 3. ed. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2010. 67 p.

BUYLE, M.; BRAET, J.; AUDENAERT, Amaryllis. Life cycle assessment in the construction sector: A review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 26, p.379-388, out. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.001>.

BUZZI, D. C. **Estudo de classificação e quantificação das lamas geradas no processo de beneficiamento de rochas ornamentais**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. Vitória-ES, 2008.

CALMON, J. L.; BRAGA, F. S.; PREZOTTI, J. C. S. **PROJETO BÁSICO DE CENTRAL DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS GERADOS NO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS**. Vitória: Fest, 2006. 129 p.

CASTRO, A. L.; SILVA, F. B.; ARDUIN, R. H.; OLIVEIRA, L. A.; BECERE, O. H. Análise da viabilidade técnica da adaptação de dados internacionais de inventário de ciclo de vida para o contexto brasileiro: um estudo de caso do concreto para paredes moldadas no local. In: **Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto—CBC2015**. 2015.

CHEHEBE, J. R. **Análise do Ciclo de Vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark Ed., CNI, 1997. 120 p.

COELHO, F.Z. **Avaliação do ciclo de vida cradle-to-gate de traços de concretos autoadensáveis com incorporação de resíduos e subprodutos industriais**.

Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 174p., 2016.

CONDEIXA, K.; HADDAD, A.; BOER, D.. Life Cycle Impact Assessment of masonry system as inner walls: A case study in Brazil. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 141-147, 2014.

DARMSTADTER, J. Recalling the Oil Shock of 40 Years Ago. **Resources For The Future**, Washington, v. 06, n. 13, p.1-7, dez. 2013.

DE EICKER, M. O.; HISCHIER, R.; HURNI, H.; ZAH, R.. Using non-local databases for the environmental assessment of industrial activities: The case of Latin America. *Environmental impact assessment review*, v. 30, n. 3, p. 145-157, 2010.

DNPM. **Departamento Nacional de Produção mineral. Anuário Mineral Brasileiro**. Brasília. MME. 2010.

DEGEN, M K.; VIEIRA, G. L.; CALMON, J. L.; ULIANA, J. G.; BASTOS, R. S.; Concretos produzidos com resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais como substituto parcial de cimento. **Anais do 55º Congresso brasileiro de concreto. IBRACON**, p 1-12. 2013.

EDELEN, A.; INGWERSEN, W. **Guidance on Data Quality Assessment for Life Cycle Inventory Data**. US Environmental Protection Agency (EPA), 2016.

EPA. **Emission Factor Documentation for AP-42 Section 11.19.1**. Sand and Gravel Processing. 1995.

EPA. **Guidance on Data Quality Assessment for Life Cycle Inventory Data**. Version 1. 2016.

FERREIRA, E. P.; PANTALEÃO, F. S.; FERREIRA, J. T. P.; FERREIRA, A. C.; Diagnóstico ambiental das áreas de extração de argila em município produtor de cerâmica vermelha. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.8, N.14; p. - 2012

FINKBEINER, M. From the 40s to the 70s—the future of LCA in the ISO 14000 family. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, [s.i], v. 18, p.1-4, set. 2012.

FINNVEDEN, G.; MOBERG, Å.. Environmental systems analysis tools – an overview. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 13, n. 12, p.1165-1173, out. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.06.004>.

FREIRE, A. S.; MOTTA, J. F. M. Potencialidades para o aproveitamento econômico do rejeito da serragem do granito. In: **Revista Rochas de Qualidade**, São Paulo, ano XXV, Edição 123, p. 98-108, jul./ago. 1995.

GABATHULER, H. LCA History: Centrum voor Milieukunde Leiden (CML): The CML Story How Environmental Sciences Entered the Debate on LCA. **International Journal Of Life Cycle Assessement**, Landsberg, v. 4, p.187-194, 1997.

GARCIA, E. E. C. *et al.* – “Análise de ciclo de vida de embalagens para o mercado brasileiro”. **Relatório Final Confidencial do Projeto FAPESP**, 1999.

GAYARRE, F. L.; PEREZ, J. G.; PEREZ, C. L. C.; LOPEZ, M. S.; MARTINEZ, A. L.; Life cycle assessment for concrete kerbs manufactured with recycled aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 113, p. 41-53, 2016.

GOEDKOOOP, M. OELE, M. LEIJTING, J. PONSIOEN, T. MEIJER, E. **Introduction to LCA with SimaPro**. San Francisco: Pré, 2013. 80 p.

GOEDKOOOP, M. HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; SCHRYVER, A.; STRUIJS, J.; ZELM, R. V.; ReCiPe 2008; A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; **PRÉ-CONSULTANTS**. 2013.

GONÇALVES, J.P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. Dissertação (Mestrado). Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

GUINÉE, J. B.; HEIJUNGS, R. HUPPES, G.; ZAMAGNI, A.; MASONI, P.; BUONAMICI, R.; EKVALL, T.; RYDBERG T.; Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. **Environmental Science & Technology**, [s.l.], v. 45, n. 1, p.90-96, jan. 2011. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/es101316v>.

GUTIS, P. News analysis: garbage barge prods officials. **New York Times**. Nova York. 2 de Maio de 1987. Disponível em <<http://www.nytimes.com/1987/05/02/nyregion/news-analysis-garbage-barge-prods-officials.html>>. Acesso em 9 de Abril de 2017.

HERRMANN, I. T.; MOLTESEN, A.. Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? A comparative assessment of SimaPro and GaBi. **Journal of Cleaner Production**, v. 86, p. 163-169, 2015.

HOSSAIN, M. U.; POON, C. S.; LO, I. M. C.; CHENG, J.C.P. Evaluation of environmental friendliness of concrete paving eco-blocks using LCA approach. **Life cycle sustainability assessment**. [S.l.] 2016, v. 21, p. 70-84. .

HUNT, Robert G.; FRANKLIN, William E.. LCA- How it Came About: Personal Reflections on the Origin and LCA in the USA. **International Journal Of Life Cycle Assessement**, Landsberg, v. 1, p.4-7, 1996.

JOLLIET, O.; WENK, R. M.; BARE, J.; BRENT, A.; GOEDKOOP, R. H; ITSUBO, N.; PEFA, C.; PENNINGTON, D.; POTTING, J.; REBITZER, G.; STEWART, M.; HAES, H. U.; WEIDEMA, B.; The LCIA Midpoint-damage Framework of the UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. **International Journal Of Life Cycle Assessement**, Landsberg, v. 6, p.394-404, 2004.

KLOPFER, Walter. Life Cycle Assessment. **Environmental Science And Pollution Research**, Landsberg, v. 4, p.223-228, 1997.

_____. Life-Cycle Based Methods for Sustainable Product Development. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, Landsberg, v. 3, p.157-159, 2003.

KNOERI, C.; WAGER, P.A.; STAMP, A.; ALTHAUS, H.J.; WEIL, M. Towards a dynamic assessment of raw materials criticality: Linking agent-based demand—With material flow

supply modelling approaches. **Science of the Total Environment**, v. 461, p. 808-812, 2013.

MANHÃES, J.P.V.T., HOLANDA, J.N.F., 2008. Caracterização e classificação de resíduo sólido pó de rocha granítica gerado na indústria de rochas ornamentais. **Química Nova** **31**, 1301 e 1304.

MATHEWS, H. S.; HENDRICKSON, C. T.; MATTHEWS, D. H.. **Life Cycle Assessment: Quantitative approaches for decisions that matter**. Pittsburg, Carnegie Mellon University, 2015. 353 p.

MEADOWS, D.; MEADOWS, D.; RANDERS, J.; BEHRENS, W.; **The limits of growth**. New York: Universe Books, 1972. 211 p.

MELLO, R. Z.; COELHO, F. Z. ; CALMON, J. L. . LCA of waste PET particles as a partial replacement for sand in self-compacting concrete. In: **Sustainable Built Environment 2016 Brazil & Portugal, 2016**, Vitória. Proceedings SBE16 Sustainable Built Environment. v. 1. p. 139-148.

MME. Ministério de Minas e Energia. **Produto 22 agregados para construção civil: Relatório Técnico 31 Perfil de areia para construção civil**. Agosto de 2009.

_____. Ministério de Minas e Energia. **PRODUTO 32 Perfil de argilas para Cerâmica Vermelha: RELATÓRIO TECNICO 32 Perfil da Argila**. Setembro de 2009.

_____. Ministério de Minas e Energia. **PRODUTO RT 72: PERFIL DA CAL**. Setembro de 2009.

MORAES, I. V. M. de. **DOSSIÊ TÉCNICO: MÁRMORE E GRANITO: LAVRA, BENEFICIAMENTO E TRATAMENTO DE RESÍDUOS**. Rio de Janeiro: Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro, 2006. 21 p.

MORAGA,G.; BALDAUF, J.; KIRCHHEIM, A. P.; PASSUELLO, A.; Avaliação do ciclo de vida de paredes de blocos de concreto para empreendimentos habitacionais do

Programa Minha Casa Minha Vida. **V Congresso Brasileiro em Gestão do ciclo de Vida**. 2016, Fortaleza. Anais p. 758-765.

MOREIRA, J. M. S.; MANHÃES, J. P. V. T.; HOLANDA, J. N. F. Processing of red ceramic using ornamental rock powder waste. **Journal of materials processing technology**, v. 196, n. 1, p. 88-93, 2008.

MUJUMDAR, A.S. **Handbook of industrial Drying**. 4ª Edição. 2015. Volume 1. 1334 p.

OLIVEIRA, C. M. **Diretrizes de auditoria ambiental**. São Carlos. EdUFSCar, 2014.

ÖZELER, D.; YETİŞ, Ü.; DEMIRER, G. N. Life cycle assesment of municipal solid waste management methods: Ankara case study. **Environment International**, v. 32, n. 3, p. 405-411, 2006.

PEREIRA, S. W. **Análise ambiental do processo produtivo de pisos cerâmicos: aplicação de avaliação do ciclo de vida**. Dissertação. Florianópolis. 2004.

PIERAGOSTINI, C.; MUSSATI, M. C.; AGUIRRE, Pío. On process optimization considering LCA methodology. **Journal of Environmental Management**, v. 96, n. 1, p. 43-54, 2012.

Pré-consultants. RECIPE. [s.d]. Disponível em <http://www.rivm.nl/en/Topics/L/Life_Cycle_Assessment_LCA/ReCiPe>. Acesso em 17 de Novembro de 2017.

RAYMUNDO, V.; NEVES, M. A.; CARDOSO, M. S. N.; FONSECA, A. B.; Marble cutting wastes as amendment of soil acidity. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 47-53, 2013.

Relatório BRACV: Fórum Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida / **Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia** -- Dez. 2016. Brasília: ibict, 2016.

REIS, F.; FRANCO, A. C. M.; PERES, C. R.; BRONZEL, D.; RAFAELA, E.; PONTOS, E. F. F. GUIZARD, J.; RAFALDINI, M.E.; GIORDANO, L. **Diagnóstico ambiental em**

minerações de areia e argila no Rio Jaguari Mirim, município de São João da Boa Vista (SP). Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia, v. 2, n. 1, 2005.

RESENDE, Diego Rodrigues de; VIEIRA, Sheilla Pereira. Efeitos da substituição de fíler calcário por rocha fosfática na obtenção de concreto autoadensável. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais do XVI Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído.** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

RIVA, R. D. D. **Densidade, porosidade, resistência à penetração de água em resposta ao arranjo e morfometria de partículas da fração areia.** 2005. 77 f. Tese (Doutorado) - Curso de Solos e Nutrição de Plantas, Magister Scientiae, Universidade Federal do Espírito Santo, Viçosa, 2005.

SAADE, M. R. M.; DE OLIVEIRA, B. M.; SILVA, M. G.; GOMES, V.; Aplicação da Análise do Ciclo de Vida na construção civil: discussão sobre alocação de impacto entre o aço e suas escórias. **PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 1, p. 1-17, 2011.

SANSÃO, J. H. AGUILAR, M. T. P. MARQUES, A.C. Análise ambiental de alvenarias em blocos: uma discussão baseada na avaliação do ciclo de vida e no desempenho térmico de envoltórias. **XIV ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído** - 29 a 31 outubro 2012 - Juiz de Fora, p. 3741-3750.

SANTOS, M. M. A; DESTEFANI, A. Z.; HOLANDA, J. N. F. Characterization of ornamental rock wastes from different cutting and beneficiation processes. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 18, n. 4, p. 1442-1450, 2013.

SARDOU FILHO, R.; MATOS, G. M. M.; MENDES, V. A.; IZA, E. R. H. F.; **Atlas de Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo:** Projeto Geologia Minerais do Estado do Espírito Santo. Brasília: CPRM, 2013. 358 p.

SEO, E.S.M., KULAY, L. A. Avaliação do ciclo de vida: Ferramenta gerencial para tomada de decisão. InterfacEHS. **Revista de gestão integrada em saúde do trabalho e meio**

ambiente, 2006. Disponível em:
<<http://www.revistas.sp.senac.br/index.php/ITF/article/viewFile/421/358>>

SILVA, F. ARDUIN, R.; SOUZA, C.; VINHAL, L.; TEIXEIRA, C.; OLIVEIRA, L.; Aspectos metodológicos para a realização de estudos de avaliação de ciclo de vida (ACV) para produtos de construção. In: **encontro nacional de tecnologia do ambiente construído**, 16., 2016, São Paulo. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2016.

Silva, D. A. L.; Masoni, P.; **DIÁLOGOS SETORIAIS BRASIL E UNIÃO EUROPEIA: Análise crítica das principais políticas de gestão, manutenção e uso de bancos de dados internacionais de inventários do ciclo de vida de produto**. Brasília 2016. 1ª edição. Ibict.

SILVA, G. A.; BRASHER, M.; LIMA, J. A. O.; LAMB, C.R. **Avaliação do ciclo de vida: Ontologia Terminológica**. Brasília: Ibict, 2015. 72 p.

SILVA, M. A.; PAES, H. R.; HOLANDA, J. N. F. Reuse of ornamental rock-cutting waste in aluminous porcelain. **Journal of environmental management**, v. 92, n. 3, p. 936-940, 2011.

SIMAPRO. Faculty. **Versão 8.3.0.0**, Desenvolvido pela PRéConsultants. 2016.

SOUZA, A. d. **Avaliação do ciclo de vida da areia em mineradora de pequeno porte, na região de São José do Rio Preto SP**. 2012. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Urbana, Centro Tecnológico, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

SOUZA, A. J.; PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. Processing of floor tiles bearing ornamental rock-cutting waste. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n. 14, p. 1898-1904, 2010.

SOUZA, D. M.; LAFONTAINE, M.; CHARRON – DOUCET, F.; CHAPPERT, B.; KICAK, K.; DUARTE, F.; LIMA, L. ;Comparative life cycle assessment of ceramic brick, concrete brick and cast-in-place reinforced concrete exterior walls. **Journal of Cleaner Production**. 2016, [S.l]. v. 137, p 70-82.

SURGELAS, V.; ROMAN, H. Inventário do ciclo de vida de um metro quadrado de parede com blocos de resíduos de construção e demolição até 20 anos de uso em comparação ao bloco de concreto. **XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. ENTAC. CANELA-RS. 2010.

TABONE, M. D.; CREGG, J. J.; BECKMAN, E. J.; LANDIS, A. E. ;Sustainability Metrics: Life Cycle Assessment and Green Design in Polymers. **Environ. Sci. Technol.** 2010, [S.l.]. v. 44, p. 8264–8269.

ULIANA, J. G.; *et al.* Estudo comparativo da caracterização da lama do beneficiamento de rochas ornamentais com e sem granalha de aço. In: 55 Congresso Brasileiro do Concreto. CBC 2013, Gramado - RS. **Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2013. v. 1. p. 1-13.

ULIANA, J. G.; VIEIRA, G. L.; TEIXEIRA, J.E.S.L.; NUNES, E.; *et al.* Heat treatment of processing sludge of ornamental rocks: application as pozzolan in cement matrices. Revista. **IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, p. 100-123, 2015.

ULIANA, J. G. **Tratamento térmico da lama do beneficiamento de rochas ornamentais: aplicação como pozolana em matrizes cimentícias**. 2014. 214 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

UNEP. **Life Cycle Assessment: What it is and how to do it**. United Nations Publication, 1996. 87 p

VENTOWAG. **Tear multifios**. Disponível em <<http://www.ventowag.com.br/tear-multifios-multiwire-cpx.php>>. Acesso em 17 de Novembro de 2017.

VIEIRA, D. R.; CALMON, J. L.; COELHO, F. Z. Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 124, p.656-666, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.125>.

VINHAL, L. D.; BULHÕES, B. B.; LIMA, T. Q.; OMETTO, A.; BARRETO, D. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de bloco cerâmico estrutural (cradle-to-gate). **V Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida**. Fortaleza – CE, 2016.

ZHANG, J.; KØRNØV, L.; CHRISTENSEN, P. Critical factors for EIA implementation: Literature review and research options. **Journal of environmental management**, v. 114, p. 148-157, 2013.

11.2 NORMAS, LEIS E DECRETOS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. ABNT. **NBR 1007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. ABNT. **NBR 10.006:2004**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. 2004

BRASIL. **Resolução CONAMA Nº 001/86 Ministério do Meio Ambiente**, Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, 1986. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>>.

_____. **Lei nº 12305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.. Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Brasília, 2010.

ISO – International organization for standardization. **ISO standards for life cycle assessment to promote sustainable development**. July, 2006. Disponível em <<https://www.iso.org/news/2006/07/Ref1019.html>> . Acesso em 22 de Abril de 2017.

_____. **ISO 14040**. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework. Geneva: ISO, 1997. 20p.

_____. **ISO 14041**. Environmental management — Life cycle assessment — Goal and scope definition and inventory analysis. Geneva: ISO, 1998. 28p.

_____. **ISO 14042.** Environmental management — Life cycle assessment — Life cycle impact assessment. Geneva: ISO, 2000. 24p.

_____. **ISO 14043.** Environmental management — Life cycle assessment — Life cycle interpretation Geneva: ISO, 2000. 26p.

_____. **ISO 14040.** Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva: ISO, 2006. 28p.

_____. **ISO 14044.** Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines Geneva: ISO, 2006. 46 p.

_____. **ISO 14045.** Environmental management -- Eco-efficiency assessment of product systems -- Principles, requirements and guidelines. Geneva: ISO, 2012. 38p.

_____. **ISO 14046.** Environmental management -- Water footprint -- Principles, requirements and guidelines. Geneva: ISO, 2014. 33p.

_____. **ISO 14067.** Greenhouse gases -- Carbon footprint of products -- Requirements and guidelines for quantification and communication. Geneva: ISO, 2013. 52p.

_____. **ISO 13315-2.** Environmental management for concrete and concrete structures -- Part 2: System boundary and inventory data. Geneva: ISO, 2014. 28p.

NBR ISO 14040. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2001. 10p.

11.3 BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

MELLO, R. Z.. **Avaliação do ciclo de vida de concreto auto adensável: comparação com diferentes teores de adição de escória de alto-forno.** 2015. 109 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.