



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ROBSON ZULCÃO MELLO

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DO
BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM MATERIAIS DE
CONSTRUÇÃO CIVIL À BASE DE CIMENTO**

VITÓRIA
2018

ROBSON ZULCÃO MELLO

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DO
BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM MATERIAIS DE
CONSTRUÇÃO CIVIL À BASE DE CIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Construção Civil.
Orientador: Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama

VITÓRIA
2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

M527a Mello, Robson Zulcão, 1991-
Avaliação do ciclo de vida da utilização do resíduo do
beneficiamento de rochas ornamentais em materiais de
construção civil à base de cimento / Robson Zulcão Mello. –
2018.
160 f. : il.

Orientador: João Luiz Calmon Nogueira da Gama.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Rochas ornamentais – Resíduos industriais. 2. Materiais
de construção. 3. Concreto. 4. Sustentabilidade. 5. Resíduos
como material de construção. 6. Avaliação do ciclo de vida
(ACV). I. Gama, João Luiz Calmon Nogueira da. II. Universidade
Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

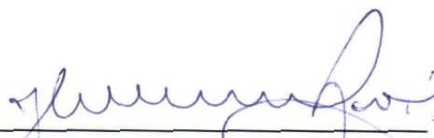
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Avaliação do Ciclo de Vida da Utilização do Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais em Materiais de Construção Civil à Base de Cimento

Robson Zulcão Mello

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Construção Civil.

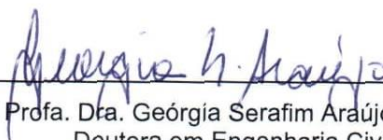
Aprovada no dia **26 de junho de 2018** por:



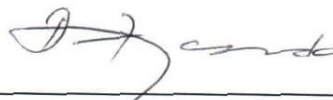
Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama
Doutor em Engenharia Civil
Orientador - UFES



Profa. Dra. Geilma Lima Vieira
Doutora em Engenharia Civil
Examinadora Interna - UFES



Profa. Dra. Geórgia Serafim Araújo
Doutora em Engenharia Civil
Examinadora Externa - UFES



Prof. Dr. Ricardo Franci Gonçalves
Doutor em Engenharia Civil
Examinador Externo - UFES

Vitória – ES, junho de 2018

Aos meus pais,
Nilcea L. Zulcão Mello e
José Luiz M. de Mello

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, por terem me apoiado nessa jornada, apesar das dificuldades, e a meu irmão, família e amigos.

Ao Prof. João Luiz Calmon, pela orientação e ideias na elaboração deste trabalho, bem como pelo apoio e ensinamentos.

Ao Prof. Darli Rodrigues Vieira, pelo acolhimento no Canadá e orientação durante minha estadia pesquisador visitante na UQTR.

Ao Felipe Zanellato, pela camaradagem e anos de colaboração nos estudos em ACV. E à Thais Rebello, pela confiança no meu trabalho de orientação de seu projeto de graduação.

Ao Max Degen, pelo convívio e troca de ideias durante o primeiro ano do mestrado. Junto também ao Sérgio Mittri e Guilherme Guignone, pela colaboração de pesquisa em concretos.

À UFES, pela infraestrutura, e aos professores, pela transmissão do conhecimento.

Aos membros do LABESBIM. Em especial a Thaís Sartori, pelas conversas e café.

A todos os amigos e colegas de mestrado, em geral, que tive o prazer de conhecer e trabalhar em equipe. Entre eles, Douglas, Dainer, Marianne, Karine.

Aos amigos que fiz durante estadia no Canadá, que ajudaram a torná-lo um pouco menos frio. Em especial a Érika, Youssef, Danté e Carlos.

Ao Fabrício de Athayde Rocha, pelo acolhimento nas visitas à AAMOL e pela troca de informações e dados relevantes para esta pesquisa.

À ACV Brasil, pelo fornecimento do *software* SimaPro.

Ao governo do Canadá, pela bolsa de estudos do programa ELAP.

À Provale, em nome de Evilmar e Aparecida, pela visita técnica e pelos dados fornecidos.

« Un homme heureux est trop content du présent pour trop se soucier de l'avenir. »

Albert Einstein,

Em «*Mes Projets d'Avenir* » (1896)

ZULCÃO, R. **Avaliação do ciclo de vida da utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em materiais de construção civil à base de cimento.** 160p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2018.

RESUMO

Estudos técnicos laboratoriais demonstram a viabilidade da utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) para a fabricação de materiais de construção civil. Porém, referente ao aspecto ambiental, ainda há necessidade de justificar seu uso por uma ótica adequada. Portanto, este estudo apresenta a avaliação do ciclo de vida (ACV) do uso do RBRO para produção de materiais de construção civil à base de cimento, visando avaliar a influência do RBRO nos indicadores de impactos ambientais. Ao todo, 127 traços de materiais são analisados, como argamassas, concretos, blocos de vedação e pavimentação. Os impactos do processo de secagem e logística do RBRO são apresentados, bem como de sua queima para produção do resíduo tratado termicamente (RBROTT). O RBRO apresenta-se como uma boa alternativa para redução de impacto ambiental no estado do Espírito Santo (ES), substituindo o fíler calcário, a areia ou pó de pedra. Ele possui potencial para ser utilizado como substituição parcial ao cimento e apresentou resultados satisfatórios quando utilizado em altos teores (acima de 50%) na produção de argamassas de revestimento, assentamento e de concreto autoadensável. Os resultados também mostram que alternativas de secagem artificial implicam em um grande aumento do impacto, e que a queima produz um material (RBROTT) com característica vítrea, possível pozolana, com impacto similar ao do cimento CP II-E. Para produção dos traços, a substituição do cimento foi a abordagem mais comumente utilizada, causando reduções dos indicadores de impacto ambiental de 7,7 a 9,0% a cada 10% de RBRO.

Palavras-chave: Avaliação do ciclo de vida (ACV); Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO); Materiais de construção civil; Concreto; Resíduos; Sustentabilidade.

ZULCÃO, R. **Life cycle assessment of the ornamental stone processing waste use in cement-based building materials.** 160p. Dissertation (Master's in Civil Engineering) – Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Espírito Santo. Vitória, 2018.

ABSTRACT

Laboratory technical studies demonstrate the feasibility of using the ornamental stone processing waste (OSPW) for the manufacturing of construction and building materials. However, regarding the environmental aspect, there is still the need to justify its use from an appropriate point of view. Thus, this study presents the life cycle assessment (LCA) of using OSPW for the manufacturing of cement-based building materials, aiming at assessing the OSPW influence on the environmental impact indicators. Altogether, 127 mixtures are analyzed, such as mortars, concretes, masonry and paving blocks. The impacts of OSPW drying and logistics are presented, as well as the burning to produce the heat-treated waste (HTOSPW). The OSPW is as a good alternative to reduce the environmental impact in the Espírito Santo (ES) district, as a replacement for limestone filler, sand or stone dust. It has potential to be used as a cement partial replacement and presented satisfactory results at high replacement levels (over 50%) in the production of rendering and laying mortars and self-compacting concrete. The results also show that the artificial drying alternatives cause a great increase in the OSPW impact, and that its burning produces a pozzolan (HTOSPW) with impact comparable to that of cement CP II-E. Regarding the mixtures production, the cement replacement was the approach most commonly used, causing a reduction in the environment impact indicators of 7.7 to 9.0% for each 10% of OSPW use.

Key-words: Life cycle assessment (LCA); Ornamental stone processing waste (OSPW); Building materials; Concrete; Wastes; Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fases de uma ACV.	26
Figura 2 – Fluxos, Processos e Sistema.	28
Figura 3 – Mapa das jazidas de rochas ornamentais no ES.	35
Figura 4 – Tear convencional em funcionamento.	36
Figura 5 – Tear multifios em funcionamento.	36
Figura 6 – Sedimentador horizontal.	38
Figura 7 – Sistema de desidratação do RBRO por meio de filtro prensa da AAMOL.	38
Figura 8 – Produção científica em revistas de alto fator de impacto sobre utilização do RBRO por ano.	44
Figura 9 – Produção científica em revistas de alto fator de impacto sobre utilização do RBRO por país de origem.	45
Figura 10 - Produção científica classificada em revistas de alto fator de impacto sobre utilização do RBRO.	45
Figura 11 – Fronteiras do sistema.	60
Figura 12 – Fluxograma do processo a seco para fabricação de CP.	66
Figura 13 – Processo de desidratação pelo filtro prensa. a) Lama fluida no tanque de decantação; b) sedimentador vertical; c) batedor de lama; d) filtro-prensa.	79
Figura 14 – RBRO em aterro temporário AAMOL. a) RBRO após filtro prensa e seco ao ar livre; b) RBRO compactado em aterro.	81
Figura 15 – Diagrama do secador rotativo.	83
Figura 16 – Regiões do ES com a localização dos polos de beneficiamento de rochas.	88
Figura 17 – Opções de secagem RBRO: Comparação com fíler, areia e pó de pedra.	95
Figura 18 – Distância adicional limite para RBRO ($D_{I,RBRO}$) – Comparação com pó de pedra, areia e fíler calcário. Indicadores por kg de material. a) indicador de AG; b) EI; c) IT.	97
Figura 19 – Raios de distância onde RBRO apresenta menor impacto em comparação com fíler calcário, areia e pó de pedra. a) Cenário pessimista. b) Cenário otimista.	98
Figura 20 – Comparação do RBROTT com cimentos e cal.	100

Figura 21 – Distância adicional limite para RBROTT ($D_{I,RBROTT}$) – Comparação com cimentos CP V e CP II-E. Indicadores por kg de material.	101
Figura 22 – Argamassa de assentamento – Substituição da cal. (a) Indicadores (b) Intensidade dos indicadores.....	103
Figura 23 – Argamassa de revestimento – Adição ao cimento. (a) Indicadores (b) Intensidade dos indicadores.....	104
Figura 24 – Argamassa de alta resistência – Substituição do cimento ou areia. (a) Indicadores (b) Intensidade dos indicadores.....	105
Figura 25 – Concreto convencional – Adição e substituição ao cimento. (a) Indicadores - adição (b) Intensidade dos indicadores - adição. (c) Indicadores - substituição (d) Intensidade dos indicadores - substituição.....	106
Figura 26 – Concreto de alto desempenho – Substituição da areia. (a) Indicadores (b) Intensidade dos indicadores.....	108
Figura 27 – Concreto autoadensável – Adição e substituição ao cimento. (a) Indicadores - adição (b) Intensidade dos indicadores - adição. (c) Indicadores - substituição (d) Intensidade dos indicadores - substituição.	109
Figura 28 – Blocos de vedação – Substituição do cimento. (a) Indicadores (b) Intensidade dos indicadores.....	111
Figura 29 – Blocos de pavimentação – Substituição do cimento. (a) Indicadores (b) Intensidade dos indicadores.....	112
Figura 30 – Argamassa com RBROTT – Substituição do cimento. (a) Indicadores (b) Intensidade dos indicadores.....	113
Figura 31 – Concreto com RBROTT – Adição e substituição ao cimento. (a) Indicadores - adição (b) Intensidade dos indicadores - adição. (c) Indicadores - substituição (d) Intensidade dos indicadores - substituição.	115
Figura 32 – Concreto com adição RBROTT com considerações de durabilidade - % de aumento da vida útil/%RBROTT (a) 1%; (b) 2%; (c) 3%.	118
Figura 33 – Redução dos indicadores para substituição do cimento por RBRO.....	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos materiais e traços utilizados	63
Tabela 2 – Composição química resumida do RBRO.....	65
Tabela 3 – Composição dos diferentes tipos de cimento utilizados	67
Tabela 4 – Correlação dos cimentos estrangeiros com os brasileiros	67
Tabela 5 – Resumo do inventário do cimento e suas matérias-primas	75
Tabela 6 – Resumo do inventário da cal, areia e brita.	76
Tabela 7 – Resumo do inventário do RBRO e RBROTT.....	86
Tabela 8 – Distâncias de transporte das matérias-primas para fabricação de clínquer, cimento, fíler calcário e cal.	87
Tabela 9 – Distância de transportes dos materiais componentes dos traços.....	89
Tabela 10 – Impacto das opções de secagem do RBRO.....	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAMOL - Associação Ambiental Monte Líbano;

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida;

AG – Aquecimento global (kg CO₂ eq., método IPCC 2013);

AICV - avaliação de impacto do ciclo de vida;

CAA – Concreto autoadensável;

CaCO₃ - Carbonato de cálcio;

CaO – Óxido de cálcio ou cal virgem;

CED – *Cumulative Energy Demand* – Demanda de energia acumulada (método de impacto de EI);

CH ou Ca(OH)₂ – Cal hidratada;

CO - Monóxido de carbono;

CO₂ – Dióxido de carbono;

CP – Cimento Portland;

CTR - Central de tratamento de resíduos;

D_{RBRO} = Distância adicional limite do RBRO;

D_{MC} = Distância do material convencional comparado;

D_{RBRO} = Distância de transporte do RBRO;

D_{RBROTT} = Distância de transporte do RBROTT;

DQG – *Data quality goals* - Objetivo da qualidade dos dados;

DQI – *Data quality indicators* – Indicador de qualidade dos dados;

EGAF – Escória granulada de alto-forno;

EI – Energia incorporada (MJ, método CED);

EIO-ACV - *economic input-output ACV*;

EPE - Empresa de Pesquisa Energética;

ES – Espírito Santo;

fc – Resistência à compressão axial (MPa);

Gg – Gigagrama = 10^6 quilogramas;

HTOPSW – Heat treated Ornamental stone processing waste;

ICV – Inventário do ciclo de vida;

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change* - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas;

IT – Impacto total (μ Pt, métodos Impact2002+, EDIP 2003 e ReCiPe 2008);

MME – Ministério de Minas e Energia;

MP – Material particulado;

NO_x – Óxidos de nitrogênio;

NRMCA - *National Ready Mixed Concrete Association*

OSPW – Ornamental stone processing waste;

RBRO – Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais;

RBROTT – Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente;

RCC – Resíduo de Construção Civil;

SO₂ – Dióxido de enxofre;

SO_x – Óxidos de enxofre;

UF – Unidade Funcional;

USLCI - *United States Life Cycle Inventory*

UNEP - *United Nations Environment Program* – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	20
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	20
1.2 QUESTÕES DE PESQUISA.....	22
1.3 OBJETIVOS.....	23
1.3.1 Objetivo geral.....	23
1.3.2 Objetivos específicos.....	23
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	23
2. ESTADO DA ARTE	26
2.1 BASE CONCEITUAL DA ACV	26
2.1.1 Introdução.....	26
2.1.2 Definição de objetivo e escopo	27
2.1.3 Análise de inventário - ICV	30
2.1.4 Avaliação de impacto - AICV	32
2.1.5 Interpretação.....	33
2.2 BASE CONCEITUAL DO RBRO.....	33
2.2.1 Introdução.....	33
2.2.2 O beneficiamento de rochas ornamentais e geração do RBRO	35
2.2.3 Caracterização do RBRO	39
2.3 UTILIZAÇÃO DO RBRO NA FABRICAÇÃO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL	40
2.3.1 Matrizes cimentícias	40
2.3.2 Matrizes cerâmicas.....	43
2.3.3 Produção científica em periódicos	43
2.4 CONSUMO DE CIMENTO E POTENCIAL DE ABSORÇÃO DO RBRO	46

2.5	PESQUISAS DESENVOLVIDAS EM ACV	47
2.6	CONCLUSÕES SOBRE O ESTADO DA ARTE	51
3.	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	53
3.1	INFORMAÇÕES PRELIMINARES.....	53
3.2	VARIÁVEIS DO PROBLEMA.....	54
3.2.1	Variáveis dependentes	54
3.2.2	Variáveis independentes.....	54
3.2.3	Variáveis de controle	55
3.3	LIMITES DA PESQUISA.....	55
3.4	DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO	57
3.4.1	Unidade funcional	58
3.4.2	Fronteiras do sistema	59
3.4.3	Objetivos de qualidade dos dados do inventário.....	60
3.4.4	Escolha dos indicadores de impacto.....	61
3.4.5	Escolha dos traços a serem analisados.....	63
3.5	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DOS MATERIAIS COMPONENTES...	65
3.5.1	Cimentos.....	66
3.5.1.1	<i>Consumo energético</i>	<i>67</i>
3.5.1.2	<i>Emissões.....</i>	<i>68</i>
3.5.1.3	<i>Argila</i>	<i>69</i>
3.5.1.4	<i>Calcário e Fíler calcário.....</i>	<i>69</i>
3.5.1.5	<i>Gesso e escória de alto-forno</i>	<i>70</i>
3.5.2	Cal	71
3.5.3	Areia	72
3.5.4	Brita e pó de pedra	73
3.5.5	Aditivos	74

3.5.6	Resumo do inventário dos materiais.....	75
3.6	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DO RBRO.....	76
3.6.1	Secagem pelo filtro prensa.....	78
3.6.2	Secagem ao ar livre e destorroamento.....	81
3.6.3	Alternativa: Secagem artificial - Secador rotativo e tipo spray.....	82
3.6.4	Queima do RBRO – Produção do RBROTT.....	84
3.7	CENÁRIO DE DISTÂNCIAS DE TRANSPORTE.....	86
3.8	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DOS TRAÇOS.....	90
3.8.1	Argamassas.....	90
3.8.2	Concretos.....	91
3.8.3	Blocos.....	92
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	94
4.1	É VIÁVEL SECAR O RBRO ARTIFICIALMENTE?.....	94
4.2	ATÉ ONDE É VIÁVEL TRANSPORTAR O RBRO?.....	96
4.3	É JUSTIFICÁVEL A QUEIMA DO RBRO?.....	99
4.4	QUAL A INFLUÊNCIA DO TEOR DE RBRO E RBROTT PARA A REDUÇÃO DOS INDICADORES DE IMPACTO AMBIENTAL DOS TRAÇOS? .	102
4.4.1	Argamassa de assentamento.....	102
4.4.2	Argamassa de revestimento.....	103
4.4.3	Argamassa de alta resistência.....	104
4.4.4	Concreto convencional.....	106
4.4.5	Concreto de alto desempenho.....	108
4.4.6	Concreto autoadensável.....	109
4.4.7	Blocos de vedação.....	111
4.4.8	Blocos de pavimentação.....	112
4.4.9	Argamassa com RBROTT.....	113

4.4.10	Concreto com RBROTT	114
4.4.10.1	<i>Considerações de durabilidade</i>	116
4.5	QUAL A REDUÇÃO MÉDIA DOS INDICADORES DE IMPACTO AMBIENTAL PARA A SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR RBRO?	118
5.	CONCLUSÕES	121
5.1	CONCLUSOES GERAIS	121
5.2	CONCLUSÕES ESPECÍFICAS	122
5.3	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	125
	REFERÊNCIAS	127
	APÊNDICE A – INFORMAÇÕES DOS TRAÇOS ANALISADOS.	145
	APÊNDICE B – INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA.	149
	APÊNDICE C – FORMULÁRIOS PARA COLETA DE DADOS DE INVENTÁRIO.	154
	APÊNDICE D – RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA.	156

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

“The first principle is that you must not fool yourself – and you are the easiest person to fool. So you have to be very careful about that. After you’ve not fooled yourself, it’s easy not to fool other scientists. You just have to be honest in a conventional way after that.”

Richard P. Feynman,
Em *“Surely You’re Joking, Mr. Feynman!”* (1985)

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A construção civil é um dos setores da economia que mais impactam no meio ambiente, sendo responsável por aproximadamente metade dos recursos naturais extraídos mundialmente (CIB; UNEP, 2002), e pela geração de mais de metade dos resíduos sólidos no Brasil (IPEA, 2012). Portanto, o programa de construção e edificações sustentáveis da Organização das Nações Unidas (ONU) lançado em 2015 traz como um dos objetivos principais a eficiência de recursos, com área de concentração em promover a sustentabilidade na cadeia de suprimentos da construção civil (UNEP, 2016). Dentre as formas de aumentar a eficiência de recursos na construção civil, se apresenta o reaproveitamento de resíduos e subprodutos industriais.

O descarte incorreto de resíduos é uma problemática atual de grande relevância, bem como o efeito negativo do grande consumo de recursos naturais e emissões referentes ao processo de fabricação de materiais para uso na construção civil. O uso de diferentes resíduos industriais para a fabricação de materiais de construção civil é um tema pesquisado tecnicamente, devido à importância em se conhecer as propriedades mecânicas e de durabilidade do novo material. Porém, pouco é quantificado em relação ao possível real benefício, em termos de indicadores de impactos ambientais, que muitas dessas incorporações realmente causam.

Um dos resíduos gerados em grande quantidade no estado do Espírito Santo é o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO). Este resíduo é gerado a partir do corte e polimento dos blocos de rochas de mármore e granito e apresenta-se inicialmente numa forma de lama (NEVES *et al.*, 2013; CALMON *et al.*, 1997). O Brasil ocupa o quarto lugar mundial em produção de rochas ornamentais, com 8,5 milhões de toneladas brutas extraídas das pedreiras em 2016 (gerando aproximadamente 3 milhões de toneladas de resíduos no processamento anualmente), sendo que mais de 80% da produção brasileira se concentra no Espírito Santo, Minas Gerais, Ceará e Bahia (MONTANI, 2017).

Diversos estudos atestam a adequação técnica do uso do RBRO como adição/substituição de outras matérias-primas para fabricação de diversos materiais de construção civil, tais como concretos, argamassas, blocos de vedação e pavimentação, blocos e telhas cerâmicas (RANA *et al.*, 2016; BAEZA *et al.*, 2014; BILGIN *et al.*, 2012; GESOĞLU *et al.*, 2012; UYSAL; SUMER, 2011; MOURA *et al.*, 2006a, 2006b, 2007; MENEZES *et al.*, 2005; MONTEIRO; PEÇANHA; VIEIRA, 2004; CALMON *et al.*, 1997). Porém, o suposto benefício ambiental, em termos de redução dos indicadores de impacto ambiental, ainda não foi devidamente quantificado.

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é considerada uma excelente ferramenta para esclarecer informações sobre potenciais benefícios ambientais do uso de processos, materiais, combustíveis alternativos (HELLWEG; CANALS, 2014; BAITZ *et al.*, 2013). Embasada nas normas ISO 14040 e 14044 (ISO, 2006b, 2006a), a ACV busca quantificar os impactos ambientais de um determinado produto ao longo do seu ciclo de vida. Quanto às fronteiras do sistema de análise, elas são determinadas como berço ao portão, berço ao canteiro, berço ao túmulo ou berço ao berço, englobando desde a extração de matérias-primas, e podendo chegar até a etapa do fim de vida do produto.

O RBRO, por ser um resíduo, pode ser considerado um material disponível para utilização em outros processos, e que possui carga ambiental nula¹. Ademais, a justificativa de evitar o envio desse resíduo para um aterro é comumente usada como um aspecto positivo de sua incorporação em materiais. Porém, é preciso analisar seu atual processo de reciclagem em detalhe e traçar alternativas para viabilizar sua utilização em larga escala, determinando os impactos desses processos. Ademais, é preciso conhecer a logística da utilização do RBRO para fabricação de materiais de construção civil, e determinar as distâncias de transporte que a torna viável. Além do mais, há o recente interesse em realizar a queima do resíduo e transformá-lo em material com característica vítrea, uma possível pozolana (DEGEN, 2017; MITTRI,

¹ Como o RBRO ainda não possui valor comercial, as cargas ambientais atribuídas ao mesmo, devido ao seu processo de geração, são nulas, contabilizando apenas os impactos de sua reciclagem (basicamente, a secagem e destorroamento) para transformá-lo em um insumo na fabricação dos materiais.

2016; ULIANA *et al.*, 2015), sendo denominado resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente (RBROTT). Assim, torna-se necessário também analisar a viabilidade ambiental desse processo.

1.2 QUESTÕES DE PESQUISA

Com base no apresentado, observa-se que é necessária uma avaliação mais detalhada sobre os processos envolvidos na utilização do RBRO em materiais de construção civil. Portanto, esta pesquisa visa responder às seguintes perguntas (que serão abordadas nos subtópicos 4.1 a 4.5 do capítulo de resultados):

- I. É viável secar o RBRO artificialmente?
- II. Até onde é viável transportar o RBRO?
- III. É justificável a queima do RBRO?
- IV. Qual a influência do teor de RBRO e RBROTT para a redução dos indicadores de impacto ambiental dos traços dos materiais onde é incorporado?
- V. Sendo o cimento a matéria-prima preferível para substituição nos traços, qual a redução média dos indicadores de impacto ambiental de sua substituição por RBRO?

Deste modo, esta pesquisa visa conhecer a possível redução de impacto ambiental dos materiais que incorporam o RBRO. Além disso, possui razões de ordem prática: 1) fundamentar a provável justificativa ambiental dos estudos técnicos laboratoriais que avaliam os materiais incorporando o RBRO; 2) direcionar estudos futuros para aproveitarem melhor o potencial de redução de impacto do uso do RBRO; 3) nortear a cadeia logística das fábricas de produção de materiais de construção civil de forma a melhor aproveitar os benefícios ambientais da incorporação do RBRO; e 4) promover os potenciais benefícios ambientais do uso do RBRO em materiais de construção de uma forma quantitativa por meio de indicadores.

Diante dessa problemática será aplicada a metodologia sistemática e holística da ACV para avaliar o processo de produção de diversos traços de materiais de construção civil à base de cimento, como concreto, argamassas e blocos. Como resultado, obter-

se-á uma análise comparativa sobre a influência dos diferentes teores de RBRO nos indicadores de impacto ambiental dos traços dos materiais.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 **Objetivo geral**

O objetivo geral desta pesquisa é apresentar a avaliação do ciclo de vida (ACV) do uso do RBRO para produção de materiais de construção civil à base de cimento, visando avaliar a influência do RBRO nos indicadores de impactos ambientais.

1.3.2 **Objetivos específicos**

- Quantificar os impactos do atual processo de reciclagem do resíduo, e analisar alternativas para o mesmo;
- Determinar o cenário logístico atual do estado do Espírito Santo para utilização do RBRO, com as distâncias de transporte dos materiais, matérias-primas, subprodutos e resíduos;
- Estimar a distância limite de transporte do resíduo para a fabricação dos materiais de forma que viabilize ambientalmente o seu uso;
- Estimar os impactos de um possível processo de queima industrial do resíduo, transformando-o em material com característica vítrea (possível pozolana);
- Identificar em quais materiais e tipos de incorporação (adição/substituição à areia/cal/cimento) o uso do RBRO é benéfico ou prejudicial ambientalmente, e avaliar essa influência em relação ao material de referência.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação de mestrado é dividida em 5 capítulos, além das referências e apêndices, conforme a seguir.

O capítulo 1 expõe a apresentação inicial do trabalho, a justificativa do tema escolhido, os objetivos e a estrutura da dissertação.

O capítulo 2 contém o estado da arte, onde as bases conceituais sobre a ACV e o RBRO são apresentadas. Ademais, apresentam-se pesquisas sobre utilização do RBRO e da ACV.

O capítulo 3 contém a aplicação da metodologia. São apresentadas as variáveis da pesquisa e os limites do estudo. Ademais, são desenvolvidos os itens da estrutura da ACV referentes às etapas de: a) definição de objetivo e escopo; e b) análise de inventário.

O capítulo 4 contém os resultados e discussões, sendo referentes às etapas da ACV de: c) avaliação de impacto do ciclo de vida e; d) interpretação.

O capítulo 5 descreve as conclusões tiradas a respeito do estudo apresentado. Além disso, propõem-se sugestões para trabalhos futuros.

Em seguida, apresentam-se as referências bibliográficas utilizadas no estudo.

Por fim, são exibidos os apêndices do trabalho.

CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE

"Science is not a cut-and-dried body of knowledge which someone has collected once and for all: it is an attitude of mind, a way of finding out. Unless these facts are appreciated science degenerates into mere scholarship and its study has a narrowing instead of a broadening effect on the mind."

John Edwin Holmstrom,

Em *"Records and Research in Engineering and Industrial Science"* (1947)

2. ESTADO DA ARTE

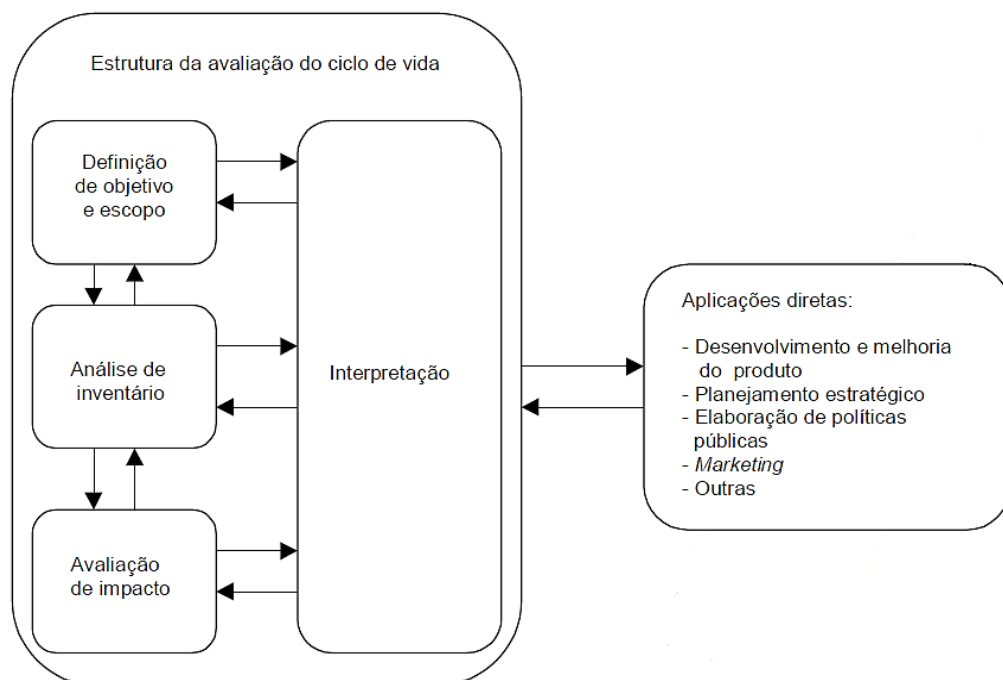
O estado da arte deste trabalho está dividido em cinco subseções: 1) base conceitual da ACV; 2) base conceitual do RBRO; 3) utilização do RBRO na fabricação de materiais de construção civil; 4) consumo de cimento e potencial de absorção do RBRO; 5) pesquisas desenvolvidas em ACV; e 6) conclusões.

2.1 BASE CONCEITUAL DA ACV

2.1.1 Introdução

A *United Nations Environment Program* (UNEP) define a ACV como “o processo de avaliação dos efeitos que um produto tem sobre o meio ambiente durante todo o período do seu ciclo sua vida: extração e processamento; fabricação; transporte e distribuição; uso, reuso e manutenção; reciclagem e disposição final” (UNEP, 1996, p. 3). A ISO 14040 (2006) apresenta a metodologia da ACV como sendo composta por quatro fases: **a) Definição dos objetivos e escopo; b) Análise de Inventário; c) Avaliação de impacto do ciclo de vida; e d) Interpretação**, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Fases de uma ACV.



Fonte: NBR ISO 14040 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2009, p. 8)

A ACV é uma metodologia que busca quantificar os impactos ambientais de um determinado produto ou sistema ao longo do seu ciclo de vida. Contudo, a metodologia possui abordagens mais restritivas, como do berço à porta da fábrica, do berço ao túmulo, e, ainda de forma mais holística, as análises do berço ao berço. A ACV é considerada uma excelente ferramenta para esclarecer informações sobre potenciais benefícios ambientais do uso de processos, materiais, combustíveis alternativos (HELLWEG; CANALS, 2014).

2.1.2 Definição de objetivo e escopo

A definição do objetivo e escopo é uma etapa de extrema relevância, pois nela são definidos os objetivos da realização do estudo, o público-alvo para divulgação dos resultados e o nível de detalhamento.

Nesta etapa é realizada a definição da **unidade funcional (UF)** do estudo, que é a unidade de referência a ser utilizada na avaliação, seja ela de avaliação de um sistema, ou de comparação entre sistemas. Ela é a unidade de controle do produto em relação à qual os impactos ambientais são quantificados. Logo, deve ser uma unidade que permita comparar diferentes alternativas para um produto que possuem a mesma função.

O escopo é a abrangência do estudo em termos de definição de **fronteiras do sistema** (limites para as medidas) e fluxos a serem considerados nos processos. Os processos industriais por vezes englobam centenas de fluxos com uma enorme quantidade de substâncias. Por isso, a definição dos processos e fluxos que serão analisados deve ser feita de forma clara e bem justificada.

A Figura 2 exemplifica esquematicamente a terminologia de *processo*, *fluxo* e *sistema* utilizada em uma ACV.

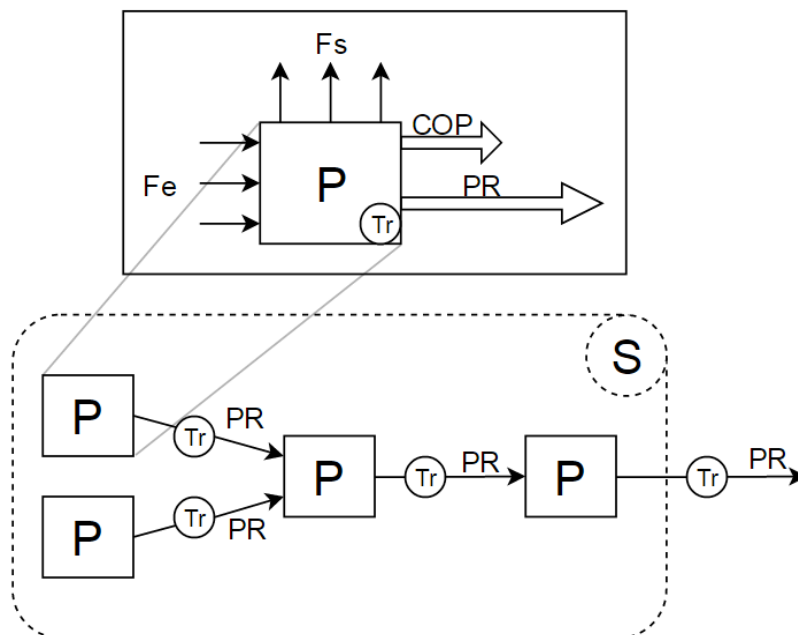
Fluxo – São valores individuais associados a um processo. Os fluxos podem ser classificados em elementares e da tecnosfera (EDELLEN; INGWERSEN, 2016). Fluxos elementares envolvem trocas com a natureza (ex.: consumo de 1 kg de matéria-prima; emissão de 1 kg CO₂), e fluxos da tecnosfera envolvem trocas entre processos ou entre sistemas (ex.: 1 kWh de energia elétrica).

Também se classificam como fluxos os produtos de referência e coprodutos² gerados pelo processo (que são fluxos de saída), bem como o transporte (interno e externo ao processo).

Processo – Conjunto de fluxos, que, combinados, representam todas as entradas e saídas necessárias à produção de um produto de referência. Esse produto de referência, representado como fluxo de saída, geralmente equivale a um material de referência (ex.: 1 m³ de concreto; 1 kg cimento), ou a um serviço de referência (ex.: 1 t·km de transporte rodoviário³), e pode ser um fluxo de entrada para outro processo (ou seja, um fluxo da tecnosfera).

Sistema – Conjunto de processos individuais conectados, representando o objeto de avaliação do estudo de ACV.

Figura 2 – Fluxos, Processos e Sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor. Legenda: COP – Coproduto; Fe – Fluxo de entrada; Fs – Fluxo de saída; P – Processo; PR – Produto de referência; S – Sistema; Tr- Transporte.

² Material que era classificado como resíduo, mas adquiriu valor agregado. Ex: Escória de alto-forno.

³ Medida de momento de transporte. 1 t·km é a unidade referente ao transporte de 1 t de massa por 1 quilômetro.

Nesta primeira etapa da ACV também são definidos os objetivos de qualidade dos dados (*Data quality goals* – DQG). O DQG visa estabelecer os objetivos da representatividade desejada dos dados a serem utilizados na avaliação. Sendo assim, buscar orientar o levantamento de dados de inventário a ser realizada na etapa seguinte da ACV. Dentre os objetivos a serem definidos no DQG são:

- Representatividade temporal: O ano do estudo em questão, e o período no qual os dados serão coletados;
- Representatividade geográfica: A área geográfica na qual os dados serão coletados para representar o estudo;
- Representatividade tecnológica: A tecnologia específica ou combinação tecnológica que é utilizada;
- Confiabilidade dos dados (*reliability*): Detalhes sobre a forma de coleta dos dados, e abordagem a ser utilizada em caso de difícil disponibilidade de dados;
- Integridade dos dados (*completeness*): Detalhes sobre a representatividade estatística da amostra em representar a população, e se o período de coleta considera flutuações do mercado (WEIDEMA; WESNAES, 1996).

Assim, um indicador (*Data quality indicator* – DQI) é atribuído para cada fluxo analisado, avaliando a sua representatividade em relação à qualidade dos dados que é objetivo do estudo (DQG). Para realizar tal avaliação e atribuir os valores de DQI de 1 a 5 para os fluxos do inventário, utilizou-se a matriz pedigree do Ecoinvent (WEIDEMA *et al.*, 2013). Matrizes de avaliação de qualidade dos dados mais recentes têm sido desenvolvidas (EDELLEN; INGWERSEN, 2016); porém, essa escolha foi realizada devido a este estudo também ter utilizado o banco de dados do Ecoinvent como dados de segundo plano (dados para os processos genéricos: energia, transporte, etc.). Os indicadores de representatividade temporal, geográfica e tecnológica são comparados com o DQG. Já os indicadores de confiabilidade e integridade dos dados, estão relacionados diretamente às propriedades da amostra do estudo, e não são influenciados pelo objetivo do estudo (WEIDEMA; WESNAES, 1996).

2.1.3 Análise de inventário - ICV

A parte central da ACV é a análise de inventário, também chamada de Inventário do ciclo de vida (ICV, ou LCI, sigla do inglês *Life Cycle Inventory*), onde é realizada a identificação e quantificação dos fluxos de entradas e saídas dos processos pertencentes ao sistema analisado. Como resultado, obtém-se uma base de dados de tudo o que foi consumido pelo sistema analisado, além das emissões para a água, ar e terra.

Os dados podem ser divididos de duas formas (GOEDKOOOP *et al.*, 2013):

- Dados de primeiro plano (*Foreground data*): são dados específicos necessários à modelagem do sistema. Geralmente são os dados que descrevem o sistema de um produto ou serviço em particular, ou um sistema de produção especializado. Em muitos casos os dados de primeiro plano são coletados de indústrias específicas, geralmente por meio de questionários. Podem também ser oriundos de relatórios da indústria e literatura em geral.
- Dados de segundo plano (*Background data*) – dados para a produção de materiais genéricos, tais como energia, transporte e gerenciamento de resíduos. Esses dados geralmente são encontrados nos variados bancos de dados e na literatura.

A identificação dos fluxos esperados guiará a coleta dos dados a ser realizada para construção do inventário. Os fluxos de entrada podem ser de recursos naturais, ocupação de terra, combustíveis, energia, minerais, outros insumos processados, serviços (como transporte e gerenciamento de resíduos), e até insumos capitais como infraestrutura e equipamentos. E os fluxos de saída podem incluir todos os produtos e coprodutos do processo, acrescidos dos resíduos produzidos diretamente, por emissões gasosas, efluentes e resíduos sólidos. A coleta de dados deve ser feita da forma mais transparente possível com o máximo de informações sobre o processo tecnológico avaliado, condições de operação e qualidade dos materiais utilizados. Dessa forma, futuros estudos e usuários desses dados poderão entender claramente a forma de realização do inventário (EDELLEN; INGWERSEN, 2016).

Em relação aos bancos de dados utilizados nos estudos de ACV de materiais de construção civil, notou-se que dentre os bancos disponíveis, o GaBi e o Ecoinvent se destacam pela integridade, acessibilidade e recursos disponíveis (MARTÍNEZ-ROCAMORA; SOLÍS-GUZMÁN; MARRERO, 2016). O banco de dados GaBi é presente no *software* de mesmo nome, tendo sido desenvolvido e aprimorado nos últimos 25 anos, englobando diversos tipos de indústrias. O GaBi é um *software* pago, que possui uma versão de demonstração gratuita de 30 dias. Contudo, neste estudo, utilizou-se o Ecoinvent, que é o banco de dados disponível no *software* SimaPro (PRÉ CONSULTANTS, 2017), no qual a licença foi obtida junto à ACV Brasil. A ACV Brasil é a representante do SimaPro no Brasil, e licença da versão Faculty com duração de um ano pode ser obtida gratuitamente devido ao Brasil ser país não participante da OECD. O Ecoinvent é um dos principais bancos de dados do mundo. Foi idealizado na década de 90, com o objetivo de unificar os bancos de dados que estavam sendo desenvolvidos por instituições diversas na Suíça. Seu surgimento é devido ao crescente papel que a ACV estava recebendo pelas indústrias e autoridades na época, criando assim a demanda por um banco de dados transparente, confiável, de alta qualidade e consistente (FRISCHKNECHT *et al.*, 2007a).

Os estudos nacionais de ACV, por falta de um banco de dados para subsidiar os dados de segundo plano, utilizam banco de dados estrangeiros, o que pode causar problemas de falta de representatividade dos dados. Além disso, ACV simplificadas, sem a coleta de dados em primeira mão na indústria, está sujeita a grandes problemas de representatividade dos dados. Por isso, os estudos nacionais que busquem coletar os dados de ICV dos processos referentes à fabricação de materiais são de extrema relevância.

Estudos de ACV que terminam nesta etapa de coleta de dados de inventário são caracterizados como estudos de ICV, tal como o projeto ACV-modular (ACV-m), desenvolvido pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS). O projeto tem o objetivo de realizar um levantamento dos impactos ambientais causados pela indústria brasileira de materiais de construção pela criação de inventários. O projeto possui parceria com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e a Associação Brasileira da Indústria de Blocos de Concreto (Bloco Brasil), e foi implementado inicialmente no setor de blocos de concreto para alvenaria e pavimento (CBCS, 2014).

2.1.4 Avaliação de impacto - AICV

Usualmente, os valores dos fluxos do inventário por si só não possuem utilidade prática para tomada de decisões. Isso é devido a não permitirem uma avaliação completa do real impacto causado pelo sistema analisado. Assim, faz-se necessária realizar a etapa de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV, ou LCIA, sigla do inglês *Life Cycle Impact Assessment*). Nesta etapa, os fluxos gerados na fase de ICV são transformados em categorias de impactos ambientais, que podem ser globais, regionais ou locais (UNEP, 1996). As categorias de impacto são por vezes utilizadas como indicadores de impacto ambiental, tal como pegada de carbono, energia incorporada, entre outros. Em suma, esta fase tem por objetivo entender e avaliar a magnitude e importância dos impactos potenciais do produto sendo estudado.

Muitos métodos de impactos vêm sendo desenvolvidos e publicados. Há métodos que contabilizam apenas uma categoria de impacto, como o método IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change* - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) para aquecimento global, e o método CED (*Cumulative Energy Demand* – Demanda de energia acumulada), para demanda total de energia acumulada (energia incorporada). Há também os métodos que possuem diversas categorias de impacto. Os métodos também podem ser classificados quanto à sua abordagem em:

- Direcionado a problemas (*midpoints*). São os métodos de impacto clássicos, com suas categorias de impacto determinadas por problemas ambientais. Como exemplo temos aquecimento global e acidificação, tendo como unidades kg CO₂ eq. e kg SO₂ eq., respectivamente. (Ex.: EDIP 2003, CML 2002)
- Direcionado a danos (*endpoints*). São métodos de impacto focados no efeito final dos problemas ambientais, avaliando o dano causado à saúde humana, meio ambiente, recursos naturais e mudanças climáticas. Possibilitam a unificação do impacto em um indicador adimensional, usualmente chamado Pt (ponto)⁴ (Ex.: Eco-indicator99).

⁴ O valor de 1 Pt depende do método de avaliação de impacto utilizado, mas geralmente representa o impacto médio de uma pessoa durante um ano em uma determinada localização geográfica. Seu valor

- Combinação de ambas as abordagens. São métodos que combinam as abordagens de *midpoint* e *endpoint*, utilizando assim os pontos positivos de cada metodologia (Ex.: ReCiPe 2008, *Impact* 2002+).

A abordagem direcionada a problemas ambientais (*midpoints*) fornece resultados confiáveis, porém de difícil comparação entre eles. Por outro lado, uma avaliação de impacto direcionada a danos (*endpoints*) permite uma interpretação menos complexa dos resultados da ACV, mas é considerada por vezes não tão confiável como a orientada a problemas.

2.1.5 Interpretação

Por fim, é necessária a interpretação dos dados e resultados, onde são comparados com as definições do escopo, e são tiradas as conclusões e recomendações do estudo. Logo, esta etapa irá unificar e influenciar todas as outras etapas da ACV, pois será responsável pela avaliação final e conclusiva do estudo. Nesta etapa uma avaliação interativa é realizada, passando por um processo de revisão do escopo, junto com a natureza e qualidade dos dados utilizados, e conclusões são tiradas de acordo com o objetivo da avaliação. Nesta etapa podem ser sugeridas melhorias para futuros estudos, baseadas nos resultados da avaliação.

2.2 BASE CONCEITUAL DO RBRO

2.2.1 Introdução

O setor de rochas ornamentais possui grande relevância para a economia brasileira, principalmente para o estado do Espírito Santo. Um crescimento vertiginoso ocorreu no país desde 1989, quando a produção anual era da ordem de um milhão de toneladas. Em 2014, a produção brasileira de rochas foi de 10,2 milhões de toneladas brutas, estando em quarto lugar mundial, atrás apenas da China, Índia e Turquia, e à frente da Itália e Portugal. Aproximadamente 80% da extração de rochas nacional

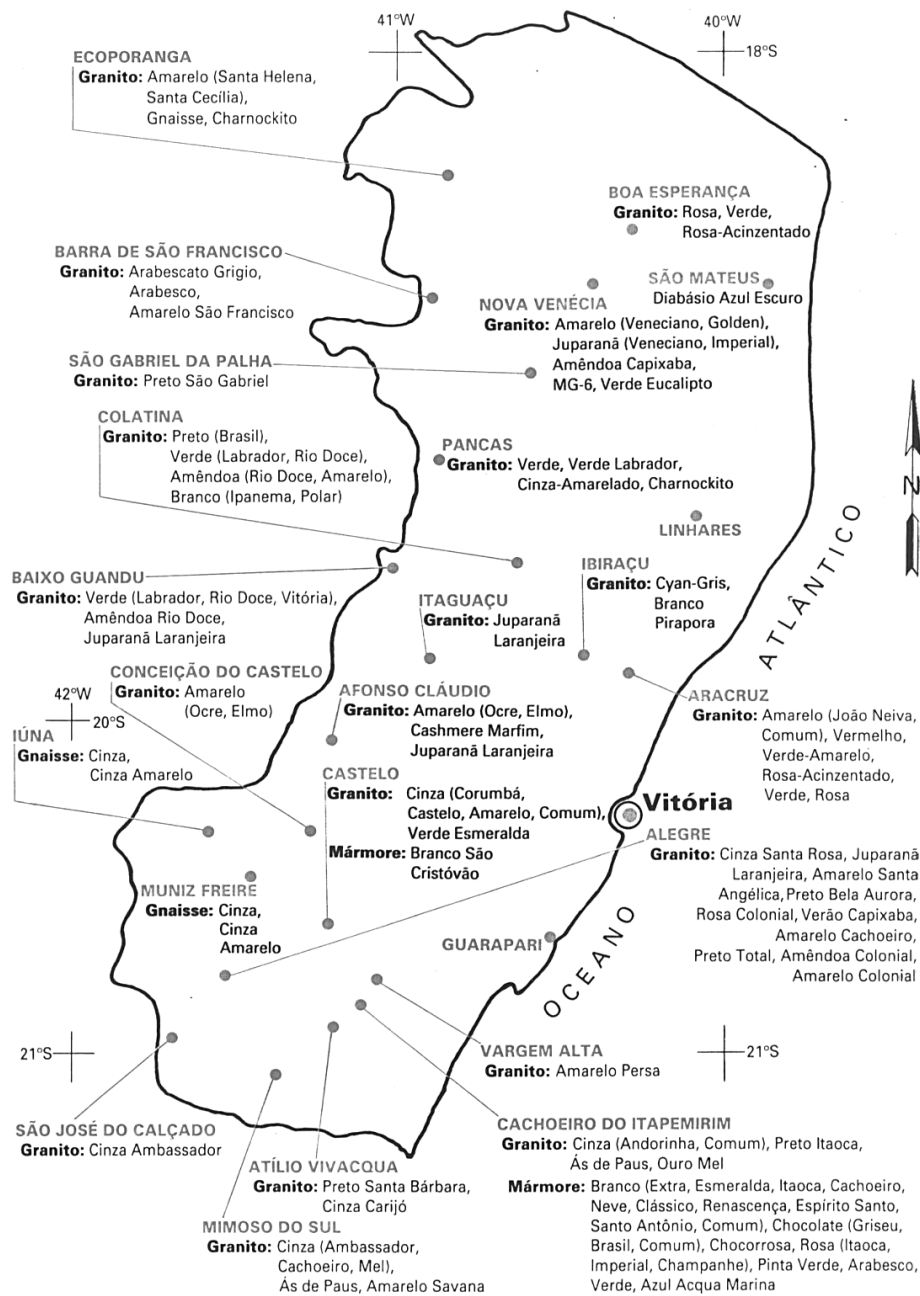
absoluto não deve ser considerado determinístico devido à maior incerteza ao se utilizar diversos fatores adicionais de transformação para obtê-lo. Assim, seu objetivo principal é realizar comparação entre produtos.

concentram-se nos estados do Espírito Santo, Minas Gerais, Ceará e Bahia, se destacando o primeiro, tendo prevalência também no segmento de beneficiamento (MONTANI, 2015). Em todo país, os empregos diretos no setor somam 120 mil postos de trabalho distribuídos em 10 mil empresas, estando distribuídos em suas atividades-fim, bem como no fornecimento de equipamentos, máquinas e insumos (ABIROCHAS, 2015).

A Figura 3 apresenta um mapa com as jazidas de rochas ornamentais localizadas no Espírito Santo (ES). Em todo país, há cerca de 1500 pedreiras ativas (ABIROCHAS, 2015). No ES, nota-se uma distribuição geográfica dispersa das jazidas, com destaque para os municípios de Barra de São Francisco, Colatina e Ecoporanga e Nova Venécia na região Norte e de Alegre, Cachoeiro do Itapemirim e Castelo na região Sul. Em relação ao beneficiamento das rochas ornamentais, no Arranjo produtivo local (APL) do ES destacam-se o município de Cachoeiro do Itapemirim, referência do aglomerado sul, e Nova Venécia, referência no aglomerado norte. Já na região metropolitana, destacam-se os municípios de Serra, Vila Velha e Vitória (CASTRO; MARCON; FREIRE, 2011; DE PAULA, 2008).

Ademais, o setor de rochas ornamentais possuiu suas principais atividades-fim divididas em: lavra (extração dos blocos nas jazidas), beneficiamento primário nas serrarias (desdobramento dos blocos em chapas e polimento) e acabamento nas marmorarias. Cada atividade possui seus impactos característicos. Além dos impactos referentes à extração dos blocos (recursos naturais) da natureza, um dos agravantes ambientais gerados por essa indústria é a geração de resíduos em suas atividades de beneficiamento.

Figura 3 – Mapa das jazidas de rochas ornamentais no ES.



Fonte: (IPT, 1993 *apud* SILVA, 1998)

2.2.2O beneficiamento de rochas ornamentais e geração do RBRO

O desdobramento dos blocos pode ser realizado por meio de teares convencionais (Figura 4), fazendo-se uso de uma solução líquida composta com granalha e cal, ou por meio de teares multifios (Figura 5), com fios diamantados. Em todo país, nas serrarias estão em operação 320 teares multifios diamantados, sendo 100 de fabricação nacional (ABIROCHAS, 2015).

Figura 4 – Tear convencional em funcionamento.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 5 – Tear multifios em funcionamento.



Fonte: CIMEF, 2017

No processo convencional, lâminas de aço cortam o bloco de rocha por meio de um mecanismo com movimento pendular, onde as lâminas de aço atravessam o bloco com o auxílio de uma lama abrasiva que é aspergida sobre o bloco. Já no processo multifios, ocorre apenas aspersão de água para auxiliar no corte. Sendo assim, no desdobramento pelo tear convencional, gera-se um resíduo em forma de lama abrasiva, composta por pó de rocha, gralha, partículas da lâmina de aço desgastada, cal e água. Já no caso do tear multifios, o resíduo é composto apenas por pó de rocha e água.

Após o desdobramento dos blocos, as chapas brutas são polidas. Há também variadas tecnologias para a etapa de polimento, como politrizes manuais de bancada,

semiautomática de bancada fixa, e automática com esteira transportadora (BUZZI, 2008). O resíduo gerado nesta etapa é composto por pó de rocha, água e partículas das pastilhas de abrasivo que foram utilizadas para o polimento.

O resíduo efluente em forma de lama que é gerado nesses processos de beneficiamento dos blocos (desdobramento e polimento) é comumente misturado na empresa onde ocorreu o beneficiamento, mesmo que advenha de etapas diferentes (desdobramento em tear convencional, desdobramento em tear multifios, polimento). Logo, como lama gerada no processo, obtém-se um material oriundo de várias etapas do beneficiamento, composto por diferentes tipos de rochas que vieram a ser processadas. O ideal é que futuramente esse resíduo seja segregado para seu melhor aproveitamento, visto que há diferença na concentração de alguns elementos na sua composição de acordo com o tipo de processamento de onde é oriundo (BUZZI, 2008).

Após as etapas de corte, a lama deve ser desidratada. Em alguns casos, a lama é depositada temporariamente em tanques escavados diretamente no solo, apresentando riscos aos corpos d'água vizinhos. O mais adequado é que seja direcionada por meio de tubulações a sedimentadores apropriados. As empresas costumam utilizar sedimentadores horizontais (Figura 6) para a redução de umidade do material, devido ao menor custo de implementação e operação. Porém, este é um processo demorado, sendo mais eficiente realizar a retirada de umidade por meio de um sistema com o uso de filtro prensa, onde o resíduo passa previamente por um sedimentador vertical (Figura 7).

Contudo, nem todas as empresas de beneficiamento possuem porte grande o suficiente para necessitarem instalar um filtro prensa, e nem possuem capital para tal investimento. O sistema de desidratação do RBRO apresentado na Figura 7, por exemplo, teve um custo de 400 mil reais, referente ao ano de 2016. Então, algumas empresas destinam o resíduo em forma de efluente para o aterro através de caminhões-tanque. Porém, para deposição do resíduo em aterros, é necessário realizar uma redução de umidade do mesmo, para atingir um limite máximo de até 30%, de acordo com a IN N° 011 (IEMA, 2016).

Figura 6 – Sedimentador horizontal.



Fonte: Acervo pessoal

Figura 7 – Sistema de desidratação do RBRO por meio de filtro prensa da AAMOL.



Fonte: Acervo pessoal

A central de tratamento de resíduos (CTR) da Associação Ambiental Monte Líbano (AAMOL) é um modelo que foi concebido para ser uma alternativa a essa prática menos sustentável, que é o simples aterro do resíduo (CALMON; BRAGA; PREZOTTI,

2007). A central recebe o resíduo na forma seca (com limite de umidade de 30%), que é transportado por caminhões basculantes, ou ainda na forma de efluente, para ser então tratado por meio do filtro prensa (Figura 7), reduzindo sua umidade.

Após essa secagem, o resíduo é destinado a um aterro temporário da própria central de resíduos, onde atualmente aguarda outra destinação final mais nobre. Para a fabricação de materiais de construção civil com esse resíduo, pode ainda se fazer necessária outra etapa de secagem para remoção de mais umidade do material até atingir o teor apropriado para a fabricação do material em questão. Ademais, poderá ser necessária etapas de destorroamento do material.

Estimativas apontam que cerca de 20 a 30% da quantidade total dos blocos é transformado em pó de rocha no beneficiamento (FREIRE e MOTTA *apud* SILVA 1998; NUNES e HAMADA 2004 *apud* BUZZI 2008; MOURA; GONÇALVES; LEITE, 2002). Assim, pode estimar-se que cerca de 2 a 3 milhões de toneladas de rocha são transformadas em pó de rocha no Brasil anualmente (MONTANI, 2017), com grande quantidade desse resíduo sendo gerado no estado do ES devido a seu grande parque industrial de beneficiamento.

2.2.3 Caracterização do RBRO

Granitos são rochas classificadas genericamente como silicáticas, e os mármore são rochas carbonáticas (CHIODI FILHO; CHIODI, 2009). Logo, os componentes mineralógicos predominantes no RBRO serão os presentes nestas rochas, que são: quartzo, feldspato e minerais do grupo das micas - demonstrados por meio de espectros pela difração de raios-X. Os difratogramas apresentam compostos na forma cristalina, indicando que o resíduo não possui propriedades aglomerantes ou pozolânicas (MOURA *et al.*, 2007; SILVA, 1998).

Com relação a possíveis efeitos deletérios do uso do RBRO em materiais, já se evidenciou que o RBRO é inócuo com relação à reatividade potencial de agregados com álcalis de cimento Portland e não apresentou patogenicidade. Ademais, a partir dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e absorção de água, pôde-se interpretar que a possível reação de oxidação, ocorrida com a fração

metálica, não promoveu alteração deletéria à estrutura dos materiais desenvolvidos (MOURA *et al.*, 2007; SILVA, 1998).

Ademais, quanto à classificação de resíduos sólidos de acordo com a norma NBR 10004 (ABNT, 2004), no extensivo estudo de Buzzi (2008), o resíduo foi classificado como não perigoso (Classe II), podendo ser não-inerte (Classe IIA) ou inerte (Classe IIB), de acordo com a sua composição química. A concentração de alumínio (Al), Ferro (Fe) e outros metais foram superiores ao limite estabelecido na norma em algumas amostras, sendo então consideradas como não-inertes. Algumas concentrações desses metais podem ser diminuídas com o uso de teares com fios diamantados e de pastilhas diamantadas metálicas ao invés de teares convencionais e pastilhas magnesiana e resinóides (BUZZI, 2008).

2.3 UTILIZAÇÃO DO RBRO NA FABRICAÇÃO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Diversos materiais de construção civil têm sido estudados, incorporando o RBRO em sua composição. Destacam-se os estudos sobre concreto, argamassas, blocos, tijolos, telhas e outras cerâmicas diversas. O RBRO é empregado nos materiais principalmente devido ao seu efeito fíler, por ser um material muito fino. O efeito fíler compreende a melhora no empacotamento, que objetiva aumentar a resistência mecânica e a durabilidade. A seguir são apresentados alguns estudos de aplicação do RBRO em matrizes cimentícias (materiais à base de cimento) e cerâmicas.

2.3.1 Matrizes cimentícias

Em matrizes cimentícias, a adição de partículas mais finas que o cimento pode atuar melhorando a zona de transição na interface pasta-agregado, influenciando, assim, positivamente o empacotamento e a estabilidade. Isso se deve ao preenchimento de vazios na pasta. Contudo, se grandes quantidades são adicionadas o efeito fíler pode ser reduzido (GALETAKIS; SOULTANA, 2016).

Nos estudos que foram pioneiros sobre a utilização do RBRO para fabricação de materiais de construção civil, constatou-se que em argamassas de assentamento, a substituição da cal pelo RBRO (25, 50, 75 e 100%) foi benéfica e trouxe melhorias

substanciais em todas propriedades físicas e mecânicas analisadas (CALMON *et al.*, 1997). Na fabricação de argamassas de revestimento, adições de 50 a 150% de RBRO em relação ao volume de cimento foram estudadas e notou-se uma tendência de crescimento da resistência à compressão axial e tração na flexão (VINCO *et al.*, 2017). Há também a possibilidade de fabricação de argamassas com resistência à compressão axial mais elevada (30 a 50 MPa), como apresentado no estudo de Corinaldesi, Moriconi e Naik (2010). Os autores substituíram alternadamente 10% de cimento e da areia pelo RBRO e concluíram que a substituição de 10% de areia, com uso de aditivos, forneceu o melhor valor de resistência à compressão axial, para uma mesma trabalhabilidade.

Para concretos convencionais, observou-se que para uma substituição de 5-20% de agregados miúdos por RBRO, obtém-se um ganho de resistência à compressão axial, ou nenhum efeito adverso negativo é observado. Quanto à substituição de 5-10% do cimento por RBRO, obtém-se propriedades mecânicas de resistência à compressão axial semelhantes (RANA *et al.*, 2016). Gonçalves, Moura e Dal Molin (2002) analisaram o teor de 10% e 20% de adição do RBRO em relação à massa de cimento, e obtiveram melhorias nas propriedades mecânicas para ambos teores, indicando 10% como teor ideal. Quanto à substituição do cimento por RBRO, Bacarji *et al.* (2013) após analisarem teores de 5 a 20%, concluíram que o teor de 5% foi o que apresentou o menor efeito adverso nas propriedades mecânicas e reológicas do concreto. Já Ergün (2011), apresenta resultados de aumento da resistência à compressão axial para teores de 5 e 7,5% de RBRO. Enquanto que Rana, Kalla e Csetenyi (2015) apresentam o teor de 10% de substituição como ideal, por não afetar significativamente a resistência à compressão axial e provocar um aumento nas propriedades de durabilidade do concreto relativas a permeabilidade, migração de cloretos e corrosão.

Devido ao concreto ser um material estrutural de elevada significância na sociedade, utilizado amplamente em grandes edificações e obras de infraestruturas, é necessária uma comprovação técnica significativa de sua durabilidade. Revisões bibliográficas têm apontado para a necessidade de estudos mais detalhados sobre os efeitos do RBRO na durabilidade do concreto (GALETAKIS; SOULTANA, 2016; RANA *et al.*, 2016). Importantes ensaios como permeabilidade, carbonatação, ataque químico,

reação álcali-sílica, abrasão e corrosão ainda não têm sido investigados por muitos autores (RANA *et al.*, 2016). Na revisão bibliográfica de Galetakis e Soutana (2016), cerca de um terço dos estudos apresentaram resultados de ensaios de durabilidade.

Para concretos de alto desempenho, Almeida *et al.* (2007) analisaram diferentes teores de substituição da areia (5 a 100%), e constataram que o teor de 5% foi o mais adequado devido às melhoras nas propriedades mecânicas e de durabilidade, e que em até 20% de substituição, não são observados efeitos negativos significantes. Quanto ao concreto autoadensável, Calmon *et al.* (2005) analisaram mistura contendo cimento com alto teor de escória (CP III) combinado com 31% de RBRO (teor equivalente de substituição do cimento), atingindo aproximadamente 20% da massa total do concreto com resíduos e subprodutos. Os autores obtiveram concreto de alta resistência (Aproximadamente 70 MPa a 28 dias) e com propriedades reológicas adequadas, indicando o RBRO como um substituto para o comumente utilizado fíler calcário. Em estudo mais recente, Sadek, El-Attar e Ali (2016) avaliaram teores de até 50% de adição de RBRO à massa de cimento, e notaram que o teor ótimo foi de 50%, com ganhos expressivos de resistência à compressão axial, sem prejudicar as propriedades reológicas.

Para a fabricação de blocos de vedação, estudos têm apontado teores de substituição do cimento de 10-15% como ideal, obtendo valores de resistência semelhantes aos traços de referência (MOURA; LEITE, 2011; MOURA *et al.*, 2006a). Já para a fabricação de blocos de pavimentação, estudos têm apontado bons resultados de resistência mecânica para teores de 5 a 20% de substituição do cimento por RBRO (MASHALY *et al.*, 2016; MOURA *et al.*, 2006b).

Quanto ao uso do RBROTT, produzido a partir da queima do RBRO, estudos tem demonstrado que o material possui característica vítrea, atuando como uma possível pozolana (RODRIGUES, 2018; DEGEN, 2017; MITTRI, 2016; ULIANA *et al.*, 2015). O material foi empregado para fabricação de argamassa, apresentando bons resultados de resistência mecânica para substituição de 5-10% do cimento por RBROTT (ULIANA *et al.*, 2015). No seu uso para fabricação de concretos, Mittri (2016) apresentou aumento de resistência à compressão axial para teores de até 10% de adição do RBROTT, com expressivas melhoras de durabilidade à penetração de

cloretos. No estudo de Degen (2017) também nota-se aumento de resistência à compressão axial para até 20% de adição de RBROTT em relação à massa de cimento. Ademais, notou-se expressiva melhora na redução do potencial e da taxa de corrosão das armaduras dos concretos que utilizavam o RBROTT. Já no estudo de Rodrigues (2018), a fabricação de cimentos compostos com substituição de 6, 10 e 14% de cimento puro (95% clínquer + 5% gesso) por RBROTT atendeu a todos requisitos da norma de cimento composto pozolânico, apresentando melhorias em relação ao cimento comercial com cinzas volantes (CP II-Z-32).

2.3.2 Matrizes cerâmicas

Na fabricação de tijolos solo-cimento, Calmon *et al.* (1998) utilizaram os teores de adição do RBRO de 10, 30, 50 e 70% em relação à massa de barro, constatando-se o teor de 50% como ideal, por atingir os limites de resistência à compressão axial normativos e apresentar boa durabilidade no ensaio de absorção de água. Para fabricação de telhas, Monteiro, Peçanha e Vieira (2004) realizaram ensaios com teores de RBRO de 20, 30 e 40% em relação à massa total. Constatou-se que o teor de 40% apresentou boas propriedades técnicas como maior resistência à flexão e baixa absorção de água. Para fabricação de blocos cerâmicos cozidos, Menezes *et al.* (2005) utilizaram teores de 20 a 60% (em intervalos de 5%) de RBRO em relação à massa total. Os ensaios laboratoriais comprovaram a viabilidade técnica de produção de blocos com até 50% de resíduo, sendo posteriormente confirmada em testes em escala industrial.

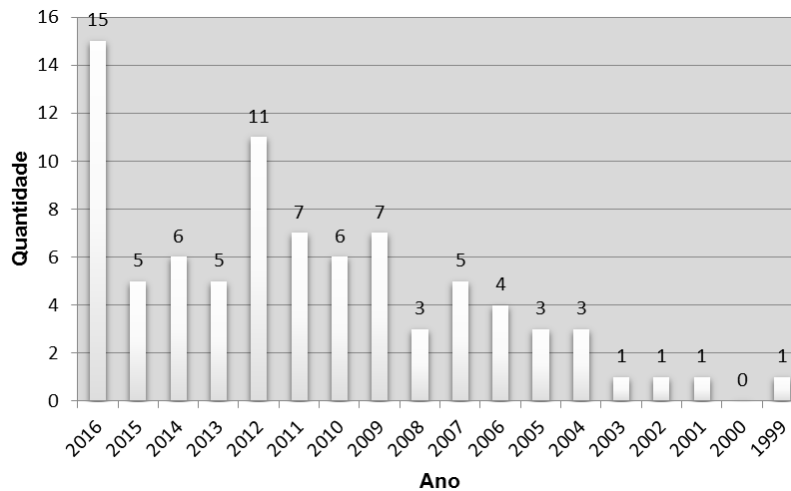
2.3.3 Produção científica em periódicos

Diversos estudos têm analisado as propriedades técnicas da utilização do RBRO na composição de materiais de construção civil de matrizes cimentícias e cerâmicas. Realizou-se uma busca no Portal Periódicos da CAPES, e diretamente *pelo Science Direct*, para um estabelecimento inicial da quantificação dos estudos com visibilidade internacional sobre o tema. As palavras chaves, juntamente com os operadores booleanos utilizados foram: *Granite / Marble / Ornamental Stone / Dimensional Stone AND Sludge / Slurry / Waste AND Concrete / Cement / Mortar / Brick / Block / Ceramic / Tile / Porcelain / Clay* (Sendo /, o operador OR – ‘OU’, em português; e AND o

operador 'E', em português). Escolheram-se então as revistas que possuíam pelo menos três artigos publicados sobre o assunto, juntamente com uma classificação Qualis/CAPES maior do que B2 para a área de concentração de Engenharias I. Como resultado, obteve-se 84 artigos, divididos em 10 revistas (Sendo 8 periódicos A1 internacionais, 1 periódico A2 internacional e 1 periódico B2 nacional), com anos de publicação de 1999 a 2016. Essa produção científica dividida por ano, país de origem e revistas, encontra-se na Figura 8, Figura 9, e Figura 10, respectivamente.

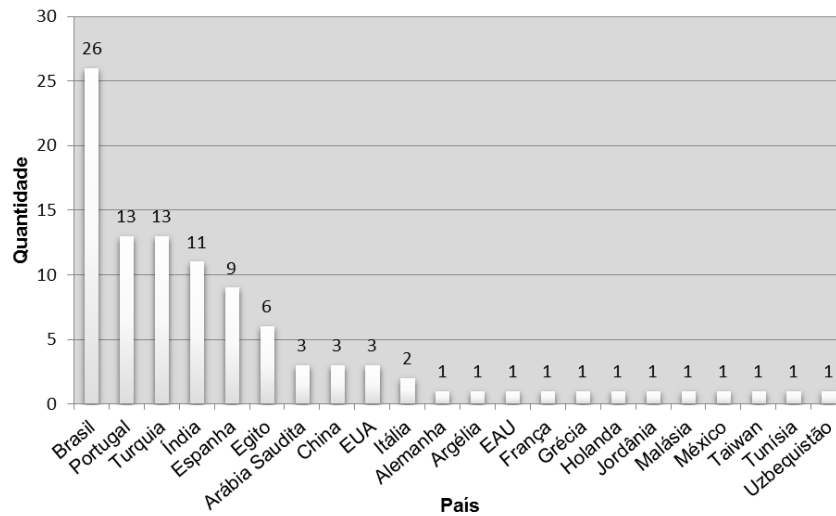
Na Figura 8, evidencia-se que em revistas científicas, o assunto começou a ser publicado a partir de 1999, tendo um aumento a partir de 2004. Contudo, há diversos estudos publicados em congressos brasileiros, inclusive anteriores a 1999 (GONÇALVES; MOURA; DAL MOLIN, 2002; MOURA; GONÇALVES; LEITE, 2002; CALMON *et al.*, 1997, 1998). A partir de 2004, nota-se um crescente número de publicações científicas, sendo o ano de 2016 com o maior número de publicações.

Figura 8 – Produção científica em revistas de alto fator de impacto sobre utilização do RBRO por ano



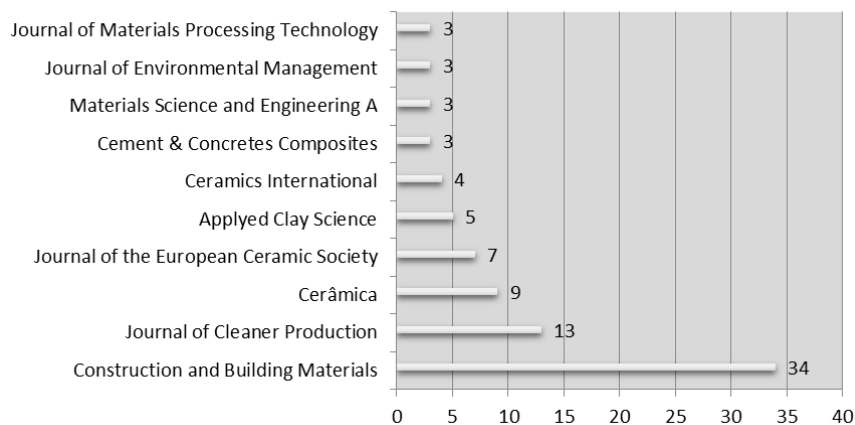
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 9 – Produção científica em revistas de alto fator de impacto sobre utilização do RBRO por país de origem⁵



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 10 - Produção científica classificada em revistas de alto fator de impacto sobre utilização do RBRO.



Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação à origem dos estudos, constata-se na Figura 9, que o tema é muito abordado em pesquisas brasileiras, destacando-se como líder de pesquisa nas revistas consideradas. Outros países que possuem forte interesse científico pelo uso do RBRO em materiais de construção civil são Portugal, Turquia, Índia, Espanha e Egito – países que também possuem o setor de rochas ornamentais como representativo em sua economia. Estranhamente, a China, apesar de possuir um forte

⁵ A soma total de artigos deste gráfico (101) é superior ao número de artigos utilizados (84), pois se contabilizou mais de uma vez os artigos de colaboração entre dois países ou mais.

setor de rochas ornamentais, ainda aparece com poucas publicações em revistas internacionais sobre este tema. Em relação às revistas, nota-se na Figura 10 que o tema é mais abordado nas revistas *Construction and Building Materials* e no *Journal of Cleaner Production*.

2.4 CONSUMO DE CIMENTO E POTENCIAL DE ABSORÇÃO DO RBRO

Desde 2013, a quantidade de RBRO produzido no Brasil anualmente se apresenta em patamar de aproximadamente 3 milhões de toneladas (MONTANI, 2017). De maneira comparativa, a quantidade de cimento produzida no Brasil em 2016 foi de 57 milhões de toneladas (SNIC, 2018), e a de cinzas volantes utilizada para produção de cimento pozolânico foi de 1,44 milhões de toneladas em 2013 (WBCSD, 2014). Dessa forma, o RBRO pode também apresentar-se como uma boa alternativa de substituição parcial ao cimento em larga escala.

Somente no estado do ES, o consumo de cimento nos 10 primeiros meses de 2017 foi de aproximadamente 92 mil toneladas mensais (SNIC, 2017), possivelmente totalizando mais de 1 milhão de toneladas no mesmo ano, considerando a manutenção no ritmo de vendas. A estimativa da produção brasileira de lavra de rochas ornamentais para o mesmo ano foi de 9,2 milhões de toneladas (com granitos representando aproximadamente 55% do total) (ABIROCHAS, 2018). Do total nacional, o estado do ES representou 3,4 milhões de toneladas de rochas produzidas, gerando de 0,7 a 1 milhão de toneladas de RBRO no beneficiamento das mesmas (20 a 30% do total). Isto considerando-se somente o beneficiamento das rochas lavradas no estado, sem contabilizar as rochas beneficiadas no ES que são provenientes de jazidas de outros estados. Assim, verifica-se que a quantidade de RBRO gerado no ES pode até mesmo ultrapassar a quantidade de cimento produzida no estado. Assim, verifica-se que devido ao seu volume de produção, o RBRO apresenta-se como possível solução ainda mais viável em larga escala para substituição parcial do cimento, considerando o cenário do ES.

No Brasil, a distribuição do cimento consumido (destino intermediário) divide-se principalmente entre revendedores (54%), concreteiras (21%), construtoras/

empreiteiras (12%) e artefatos (5%) (SNIC, 2014). Assim, tendo em vista a atestada viabilidade técnica do RBRO para produção de materiais de construção à base de cimento, uma maior quantidade de resíduo pode ser absorvida se ele for utilizado futuramente na fabricação de cimento, do que apenas em concreteiras e em obras, como substituto parcial do cimento. Dessa forma, conseguir-se-ia utilizar uma maior utilização do RBRO na indústria da construção civil, não dependendo apenas das concreteiras, construtoras e fábricas de artefatos para absorvê-lo.

2.5 PESQUISAS DESENVOLVIDAS EM ACV

Neste subitem será apresentado o estado atual das pesquisas desenvolvidas no que tange o tema desta pesquisa. Quanto ao uso da ACV para avaliação de materiais nacionais, há estudos focados na avaliação de tijolos cerâmicos e/ou blocos de concreto, e paredes fabricadas com esses materiais (DE SOUZA *et al.*, 2016; MORAGA *et al.*, 2016; VINHAL *et al.*, 2016; CONDEIXA; HADDAD; BOER, 2014; SANSÃO; AGUILAR; MARQUES, 2012), telhas cerâmicas e de concreto (DE SOUZA *et al.*, 2015), revestimentos cerâmicos (ALVES; MELCHIADES; BOSCHI, 2007), entre outros. Contudo, esses estudos avaliaram a produção de materiais convencionais, ou seja, sem a utilização de resíduos em sua composição.

Já em relação à ACV de materiais com a utilização resíduos e subprodutos industriais, há estudos nacionais que utilizaram agregados reciclados para fabricação de blocos (SURGELAS, VALDIMIR; ROMAN, 2010), estudo sobre cimento pozolânico (STAFFORD *et al.*, 2016), concretos (MELLO; COELHO; CALMON, 2015, 2016; SILVA; SAADE; GOMES, 2013), entre outros.

Um dos materiais que é bastante estudado na ótica da ACV é o concreto. Diversos estudos têm analisado sua sustentabilidade utilizando resíduos e subprodutos industriais, comparando alternativas e buscando soluções para melhorar a sustentabilidade do mesmo (VIEIRA; CALMON; COELHO, 2016). Autores têm identificado a necessidade de incluir nos estudos comparativos de ACV em concreto, parâmetros como resistência, durabilidade e vida útil (VIEIRA *et al.*, 2017; VAN DEN HEEDE; DE BELIE, 2012; DAMINELI *et al.*, 2010). Portanto, este estudo buscou

utilizar também esta ótica para a avaliação dos materiais, e considerar os parâmetros relativos às propriedades dos materiais analisados.

Em relação ao uso de subprodutos industriais em concretos, autores recomendam realizar alocação econômica de impactos para escória granulada de alto-forno (EGAF) e cinzas volantes, devido à alocação em massa atribuir grande quantidade de impactos do processo de produção do produto principal (no caso, ferro gusa, e energia de termoelétricas à carvão, respectivamente) aos coprodutos gerados no processo (VAN DEN HEEDE; DE BELIE, 2012).

Deste modo, abordagem similar será utilizada neste trabalho. Sendo o RBRO um resíduo industrial, tem-se que a abordagem adequada é não alocar impactos ambientais referentes à extração e processamento dos blocos de rochas para o resíduo. Como o RBRO ainda não possui valor comercial, as cargas ambientais atribuídas ao mesmo devido ao seu processo de geração são nulas. Então, atribui-se como impacto do RBRO apenas sua reciclagem, que consiste basicamente em secagem e destorroamento, para transformá-lo em um insumo na fabricação dos materiais.

O resíduo de construção civil (RCC) é um resíduo também bastante analisado pela ótica da ACV. Em uma revisão bibliográfica sobre ACV aplicada em RCC, Bovea e Powell (2016) analisaram 71 artigos. Como ocorre em praticamente todos os estudos de ACV, identificaram uma grande dificuldade de comparação entre estudos realizados independentemente. Ademais, os autores identificaram como parâmetros chave a necessidade de normalização de: 1) quais processos deverão ser incluídos nas fronteiras do sistema; 2) escolha de UF; 3) Uso de dados de inventário adaptados ao contexto do estudo de caso; 4) Definição de um conjunto apropriado de categorias de avaliação de impacto; 5) Obter resultados desagregados em processos unitários (com fluxos de entrada e saída definidos).

Quanto às pesquisas de ACV no setor de rochas ornamentais, Nicoletti, Notarnicola e Tassielli (2002) realizaram um estudo comparativo de acabamento de piso em ladrilhos de cerâmica e mármore, visando identificar aquele com o melhor perfil ambiental, bem como os processos e fluxos mais impactantes no sistema. O estudo

foi realizado com matriz energética e distâncias de transporte referentes ao cenário italiano. O estudo concluiu que os ladrilhos de mármore possuem a metade do impacto ambiental total em comparação ao de cerâmica. Já Mendoza *et al.* (2014), realizam um estudo de ICV, um levantamento quantitativo do inventário, da produção de ladrilhos de granito na Espanha, utilizando a UF de 1 m² de ladrilhos. Os fluxos de entrada e saída para elaboração do inventário foram coletados através da distribuição de formulários para levantamento de dados técnicos e visitas *in loco*.

Sobre estudos de ACV relacionados ao uso do RBRO, em outro estudo espanhol, realizou-se uma ACV simplificada para comparar alternativas de acabamento de piso em ladrilhos de rocha (rocha calcária natural e rocha artificial fabricada com resíduo de lama processamento rocha calcária) (GARCÍA *et al.*, 2007). A conclusão foi de que a rocha artificial é preferível devido ao menor impacto de respiratórios inorgânicos – impacto com grande relevância no índice final e referente aos impactos de extração da rocha. Utilizou-se o *software* SimaPro, combinado com o banco de dados Ecoinvent e o método de impacto Eco-indicator 99 E\A. A UF utilizada no estudo foi o cobrimento de uma área de 135 m² por 50 anos, considerada conservadora, pois os itens em comparação possuíam propriedades diferentes. A rocha artificial utilizada possui maior resistência mecânica, com menor absorção e maior resistência a ciclos de congelamento/descongelamento, esperando-se assim, maior vida útil que a rocha natural. Para a fabricação da pedra artificial, não se elaborou inventário do processo de secagem do resíduo. Então, realizou-se uma sensibilidade do consumo energético adotado em $\pm 30\%$ referente ao processamento da lama (GARCÍA *et al.*, 2007).

Napolano *et al.* (2016) realizaram uma ACV comparativa da fabricação de agregados reciclados leves, para o cenário italiano, avaliando também seu posterior uso em traços de concreto. Utilizou-se agregado fabricado com RBRO (rocha de zeólito e granito) e com argila natural. Vale ressaltar que os agregados fabricados contêm altos teores de cimento (ainda que pozolânico) em sua composição, e seu processo de produção envolve queimas acima de 1300°C, indicando a priori um grande impacto ambiental envolvido nos processos. Os autores inventariaram os processos com dados coletados de fornecedores e fabricantes italianos, completando os dados faltantes com uso do banco de dados Ecoinvent. Ademais, utilizaram o método de impacto Impact 2002+ com modelagem no SimaPro. Concluiu-se que os agregados

fabricados com resíduos apresentaram menor impacto ambiental, devido principalmente à abordagem utilizada, considerando os impactos evitados (da produção e processamento da argila), e ao cenário de transporte do estudo.

Outros estudos recentes analisaram a influência do uso de pó de mármore (resíduo do beneficiamento) para fabricação de concreto (KHODABAKHSHIAN *et al.*, 2018; SINGH *et al.*, 2017). Singh *et al.* (2017) analisaram aspectos econômicos e ambientais, e utilizaram o *software* Umberto, o método de impacto ReCiPe e o banco de dados Ecoinvent como fonte para todos os materiais utilizados; contudo, sem dizer se adequações foram realizadas e quais. Para o inventário do resíduo, os autores aparentemente atribuíram parte do impacto do processamento das rochas para o resíduo, utilizando o trabalho de Mendoza *et al.* (2014) como fonte. Dessa forma, entende-se que admitiram que o resíduo fosse um coproduto, agregando impacto do processo do beneficiamento de rochas. Ademais, não foram relatadas informações sobre a secagem do resíduo, e seu inventário, bem como dos materiais utilizados nos traços, não são apresentados com detalhe, tornando a credibilidade do aspecto ambiental do estudo contestável, e sua replicação inexequível. Como resultado, obtiveram que o uso de até 15% de substituição do cimento pelo resíduo causa aproximadamente 1% de redução do consumo energético e a redução da pegada de carbono do concreto de 410 para 350 kg CO₂ eq./m³.

Khodabakhshian *et al.* (2018) avaliaram as propriedades mecânicas e os aspectos ambientais e econômicos da produção de concretos utilizando sílica ativa e o resíduo do beneficiamento do mármore. Na análise ambiental, os autores analisaram potencial de aquecimento global, de depleção de combustíveis fósseis e de acidificação. Em relação a esta análise, os autores simplificaram a elaboração do inventário, e não consideraram o impacto dos processos de reciclagem e logística da sílica ativa e do resíduo de mármore. Como resultado, obtiveram que o teor de substituição do cimento por resíduo de mármore de 20% provocou uma redução de 14 a 20% dos indicadores.

2.6 CONCLUSÕES SOBRE O ESTADO DA ARTE

Como conclusões sobre o estado da arte, têm-se:

- Há diversos estudos laboratoriais técnicos de avaliação das propriedades mecânicas do uso do RBRO em materiais de construção civil, principalmente de matrizes cimentícias e cerâmicas;
- Estudos de durabilidade do uso do RBRO nos materiais ainda são menos comuns e, portanto, encorajados;
- A ACV é uma ferramenta já bem utilizada para avaliação ambiental de sistemas, dentre eles, o de avaliar o impacto ambiental de materiais de construção civil;
- Na literatura foram escassos os estudos encontrados de ACV relacionando o uso do RBRO em materiais de construção civil;
- Não se encontrou estudos de ACV que analisassem: 1) o processo de reciclagem do RBRO com detalhe; 2) a produção de traços de diferentes materiais de construção civil incorporando o RBRO; 3) a logística da cadeia de reutilização do RBRO; 4) a produção de RBROTT;

Assim, a realização de uma ACV poderá contribuir para esclarecer os reais potenciais benefícios do uso do RBRO em materiais de construção civil.

Com base na elaboração do estado da arte, foi dada preferência a realizar a ACV apenas em traços de matrizes cimentícias (materiais à base de cimento), visando reduzir o escopo do trabalho. Essa escolha foi feita devido às matrizes cimentícias representarem a maior parcela de estudos de utilização do RBRO presente na literatura. Além disso, elas apresentam maior volume de utilização pela indústria de construção civil, em geral, sendo utilizadas tanto em estruturas, como em vedação, pavimentação, revestimento e assentamento. Já as matrizes cerâmicas são geralmente mais utilizadas para a função de vedação e cobertura.

CAPÍTULO 3 – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

"The man who is striving to solve a problem defined by existing knowledge and technique is not, however, just looking around. He knows what he wants to achieve, and he designs his instruments and directs his thoughts accordingly."

Thomas S. Kuhn,

Em *"The Structure of Scientific Revolutions"* (1962)

3. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Este capítulo segue como base uma metodologia amplamente utilizada para avaliação de impacto ambiental, a ACV, como definida pelas normas ISO 14040 e 14044 (2006a, 2006b), e apresentada anteriormente no subitem 2.1 - Base conceitual da ACV. Informações preliminares são fornecidas, e as variáveis do problema e limites da pesquisa apresentados. Em seguida, a partir da seção 3.4 são desenvolvidos os itens da estrutura da ACV de: a) definição de objetivo e escopo; e b) análise de inventário, de acordo com a metodologia ACV.

3.1 INFORMAÇÕES PRELIMINARES

Para levantamento de dados da reciclagem do RBRO, realizou-se 2 visitas técnicas à central de tratamento do RBRO – AAMOL, acompanhadas pelo seu diretor executivo, Fabrício de Athayde Rocha. Também foi realizada visita técnica à uma empresa de beneficiamento de rochas ornamentais, onde a lama do corte e polimento dos blocos é gerada. Ademais, formulários (Apêndice C) foram utilizados para levantamento dos dados junto às fábricas de produção do fíler calcário e argamassa industrializada, que também foram visitadas.

O *software* SimaPro v. 8.4.0.0 (PRÉ CONSULTANTS, 2017) foi empregado a fim de auxiliar na modelagem da avaliação. Ele é uma ferramenta de auxílio à ACV, sendo uma das mais amplamente utilizadas no meio acadêmico devido à sua flexibilidade de adaptação a vários objetivos e ao seu amplo acervo de inventário e métodos de avaliação de impacto. A licença da versão *Faculty* foi obtida gratuitamente junto à ACV Brasil, representante do SimaPro no Brasil. O *software* permite a modelagem da ACV, com a modificação e o respectivo armazenamento de processos do inventário, e a avaliação de impacto através do método de impacto selecionado. Foi lançado em 1990 pela companhia holandesa PréConsultants e faz uso de vários bancos de dados consolidados do meio científico, principalmente europeus, como exemplo o *Ecoinvent* e *ELCD (European Life Cycle Database)*. Ele está baseado nos princípios da ACV definidos pela série de normas da ISO. Também estão incluídos na ferramenta, vários métodos de avaliação de impactos, entre eles IPCC 2013, CED, EDIP 2003, ReCiPe

2008 e *Impact 2002+* (IPCC, 2013; GOEDKOOOP *et al.*, 2009; FRISCHKNECHT *et al.*, 2007b; HAUSCHILD; POTTING, 2003; JOLLIET *et al.*, 2003).

Em seu banco de dados é possível criar processos ou modificar os já existentes em seus dados de entradas (*inputs*) de matérias-primas, energia, combustível, entre outros, bem como as saídas (*outputs*) dos processos, como emissões para o solo, ar, água e tratamento de resíduos.

Após a coleta dos dados de inventário, os mesmos foram tabelados no Excel (MICROSOFT CORPORATION, 2010) e atribuí-se os indicadores de qualidade dos dados (DQI). Em seguida, os dados foram inseridos no SimaPro (PRÉ CONSULTANTS, 2017) para realizar a etapa de AICV, utilizando os métodos de impacto escolhidos. Os resultados foram então extraídos do SimaPro e utilizados para elaboração gráfica no Excel.

3.2 VARIÁVEIS DO PROBLEMA

3.2.1 Variáveis dependentes

As variáveis dependentes são aquelas cujo comportamento se quer avaliar em função das variáveis independentes. Ou seja, são aquelas cujo resultado é obtido a partir da aplicação da ACV. Neste trabalho, as variáveis que podem ser classificadas como dependentes são:

- Indicadores de impacto ambiental utilizados: Aquecimento global – AG (kg CO₂ eq.); Energia incorporada - EI (MJ); Impacto total – IT (*Ecopoints* – Pt).

3.2.2 Variáveis independentes

São aquelas utilizadas na pesquisa para verificar a relação entre suas variações e a influência que produzem nas variáveis dependentes.

- Traços de materiais de construção civil avaliados: argamassas, concretos e blocos.
- Percentual de substituição/adição do RBRO em relação à massa de cimento/areia/cal na composição dos traços.

- Dados do inventário dos processos dos materiais. Ex.: Insumos, consumo energético, emissões, distâncias de transporte.

3.2.3 Variáveis de controle

São as variáveis que não são objeto de estudo, mas que tem grande influência nas variáveis independentes e dependentes. Para o presente estudo, as variáveis de controle são:

- *Software* utilizado (SimaPro v. 8.4.0.0).
- Métodos de avaliação de impacto utilizados:
 - IPCC 2013 (IPCC, 2013);
 - CED (FRISCHKNECHT *et al.*, 2007b);
 - Impact2002+ (JOLLIET *et al.*, 2003) ;
 - ReCiPe 2008 (GOEDKOOPE *et al.*, 2009) ;
 - EDIP 2003 (HAUSCHILD; POTTING, 2003).
- Banco de dados utilizado como fonte de dados de segundo plano (Ecoinvent).
- Artigos escolhidos como fontes dos traços analisados.

3.3 LIMITES DA PESQUISA

O termo RBRO a ser utilizado nesta pesquisa se refere ao resíduo gerado no processo de beneficiamento de mármore e granitos, não englobando o resíduo do beneficiamento de outros tipos de rochas calcárias, visto que mármore e granito são as rochas mais beneficiadas no parque industrial instalado no Espírito Santo.

No levantamento dos estudos técnicos laboratoriais com os traços constituintes para realizar a ACV, a granulometria do RBRO considerada é equivalente à de fíler/adição mineral, devendo-se ao fato de ser a granulometria do resíduo gerado no processo de beneficiamento (desdobramento dos blocos em chapas, e polimento das chapas). O RBRO apresenta aproximadamente 70% de materiais pulverulentos (partículas menores que 75 µm, incluindo as solúveis), módulo de finura 0,16 e dimensão máxima

característica de 0,3 mm (SILVA, 1998). Os valores dos diâmetros D50 e D90⁶ dos gráficos de distribuição de frequência acumulada da granulometria do resíduo são aproximadamente 7 e 50 µm, para o resíduo da rocha de mármore, e 9 e 80 µm, para o granito, respectivamente (GALETAKIS; SOULTANA, 2016). Contudo, alguns outros estudos laboratoriais têm analisado a utilização do RBRO com uma granulometria estranhamente equivalente da areia fina ou superior, com diâmetros D50 e D90 maiores do que 300 µm (SINGH *et al.*, 2016), e estes não serão tratados neste trabalho.

Ademais, o tipo da ACV a ser aplicada neste trabalho será ACV baseada em processos (*Process-based LCA*), com fluxos de entradas e saídas. Portanto, o resultado a ser obtido nesta ACV é a soma dos impactos ambientais referentes a diversos processos individuais interconectados. Há outros tipos de abordagens da ACV que consideram outros aspectos, como a *economic input-output* (EIO-ACV) que possui uma abordagem mais ampla, para avaliação de setores inteiros da economia (GREEN DESIGN INSTITUTE, 2008); o modelo híbrido, que é uma combinação da ACV baseada em processos com a EIO-ACV (TRELOAR *et al.*, 2000), e a ACV Social (ACV-S) (SUTHERLAND *et al.*, 2016), que considera aspectos sociais. Essas diferentes abordagens metodológicas não foram selecionadas devido à limitação do escopo definido no estudo. Será, assim, utilizada uma abordagem focada na sustentabilidade ambiental dos processos de fabricação dos materiais. Esta decisão deve-se também à identificação da maior aplicação desse tipo de abordagem para estudos científicos comparativos de ACV, principalmente os relacionados a verificar influência da inserção de materiais alternativos na produção de materiais de construção civil.

No início da coleta dos dados, realizou-se um estudo bibliográfico para determinar os principais fluxos a serem quantificados nos processos. Para elaboração e adequação dos dados de inventário utilizados, deu-se prioridade aos fluxos de consumo de insumos (matérias-primas ou materiais já processados), consumo de energia e água,

⁶ Valores em que 50 e 90% da distribuição das partículas apresentam diâmetros menores.

e geração de resíduos (emissões atmosféricas, efluentes e geração de resíduos sólidos).

Outras limitações são inerentes à aplicação da ACV. Uma das mais comuns se refere à representatividade dos dados de inventário utilizados. Contudo, neste estudo todas as fontes dos dados estão documentadas no Apêndice B, e uma análise de qualidade dos dados do inventário é apresentada, com os indicadores (DQI) atribuídos a cada fluxo dos processos utilizados. Porém, a versão 'Faculty' do *software* SimaPro utilizado apresenta a limitação de não realizar análises mais avançadas de incerteza dos resultados, como a partir da análise de Monte Carlo, disponível apenas na versão mais avançada 'PhD'.

Ademais, cabe esclarecer que este trabalho, apesar de estar relacionado à temática de impactos ambientais e usar frequentemente o termo 'avaliação de impactos ambientais', está sendo baseado na metodologia quantitativa da ACV. Dessa forma, difere do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto ao Meio Ambiente (RIMA), como definido pela Resolução CONAMA Nº 001/86 (alterada pelas Resoluções nº 11/86, nº 5/87 e nº 237/97) (BRASIL, 1986). O EIA/RIMA têm por objetivo avaliar os impactos ambientais decorrentes da instalação de empreendimentos e estabelecer programas para monitoramento e mitigação dos impactos, e não possui relação direta com a metodologia ACV.

3.4 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO

O objetivo deste estudo é avaliar os impactos ambientais do processo de reciclagem do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, bem como sua incorporação na produção de materiais de construção civil à base de cimento.

Atualmente, a CTR AAMOL não consegue cumprir a sua função inicial de reciclagem do RBRO. Ao invés da reciclagem do resíduo, o que ocorre presentemente é o seu acúmulo em um aterro provisório. Os motivos principais são a falta de investimento e incentivos para fabricação de materiais utilizando o resíduo reciclado, e a certa desconfiança do mercado em utilizar materiais incorporando resíduos que ainda não estejam normatizados. Diversos estudos técnicos utilizados como base neste estudo,

já demonstram a aplicabilidade do RBRO para produção de materiais de construção civil, tais como traços de concreto, argamassas e blocos de vedação e pavimentação. Logo, este trabalho tem por objetivo de complementar tais estudos, quantificando a potencial redução dos impactos ambientais dos traços que incorporam o RBRO, embasando-se cientificamente pela aplicação da ACV. Assim, espera-se com este estudo preencher a lacuna da viabilidade ambiental da utilização do RBRO em materiais à base de cimento. O público alvo do estudo é o meio acadêmico relacionado à utilização de resíduos em materiais de construção civil, bem como o meio empresarial ligado à indústria de beneficiamento de rochas ornamentais e utilização de resíduos e subprodutos industriais. Além disso, espera-se que o estudo seja utilizado para fundamentar possíveis futuras legislações e normas sobre o uso do resíduo.

3.4.1 Unidade funcional

As unidades funcionais (UF) adotadas neste estudo foram:

- I. Unidade de massa (1 kg). Adotada para as seguintes análises: 1) Comparação entre opções de secagem RBRO; 2) Comparação da secagem RBRO com fíler, areia e pó de pedra; 3) Distância adicional limite para RBRO; 4) Comparação do RBROTT com cimentos e cal; 5) Distância adicional limite para RBROTT.
- II. Unidade de volume (1m³). Adotada para as análises comparativas dos traços dos materiais: 1) Argamassa de assentamento; 2) Argamassa de revestimento; 3) Argamassa de alta resistência; 4) Concreto convencional; 5) Concreto de alto desempenho; 6) Concreto autoadensável; 7) Blocos de vedação; 8) Blocos de pavimentação; 9) Argamassa com RBROTT; 10) Concreto com RBROTT; 11) Redução dos indicadores para substituição do cimento por RBRO.

Como as análises no segundo caso (UF em volume dos traços) são comparativas, os resultados serão apresentados em porcentagem de redução dos indicadores em relação ao traço controle. Ademais, além da análise comparativa de 1 m³ dos traços, utilizou-se a resistência à compressão axial (f_c) como balizador para os indicadores de impacto analisados, resultando numa análise de “intensidade dos indicadores”. Essa análise demonstra o impacto do volume de material equivalente para obter-se 1

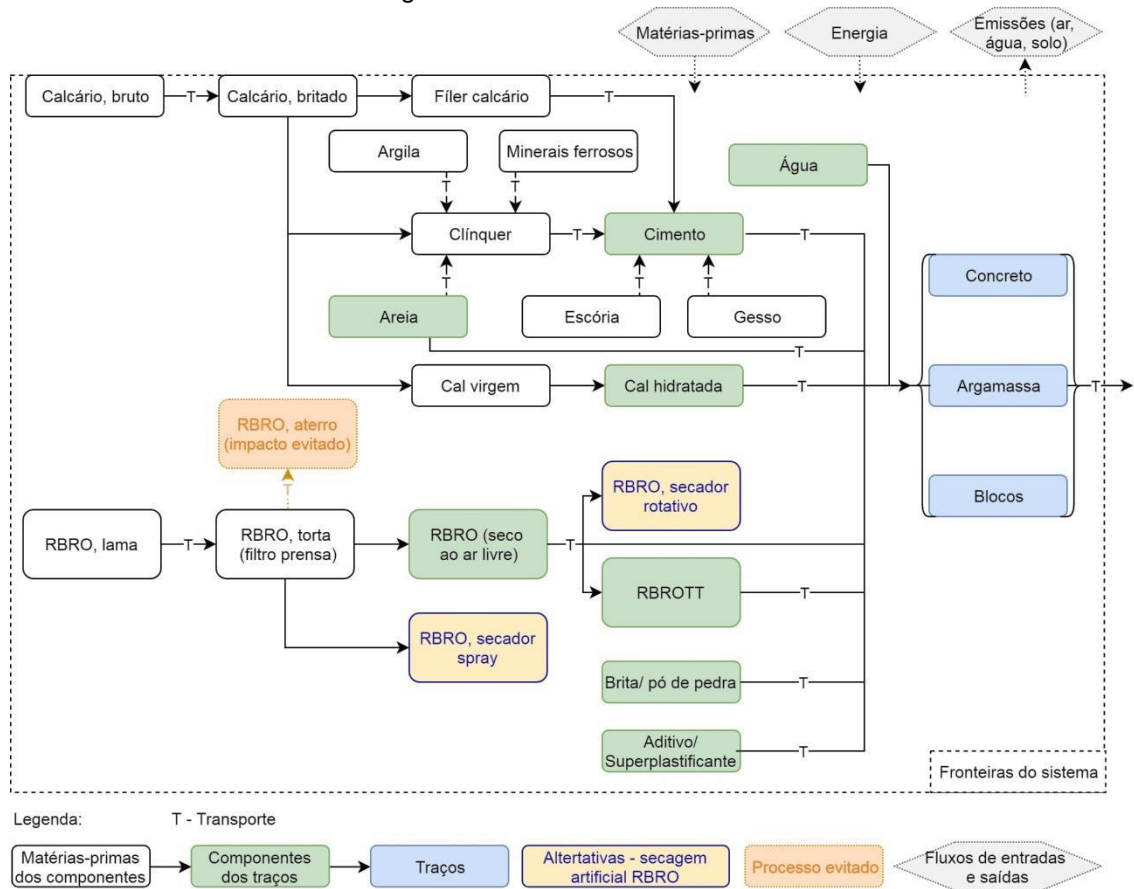
MPa de f_c . Cabe salientar que os materiais possuem aplicações diferentes, logo a comparação deve ser realizada apenas entre os traços de um mesmo material, e não entre traços de diferentes materiais.

Este estudo tem por objetivo avaliar a influência da inserção do RBRO nos traços dos materiais, e não saber o valor absoluto dos indicadores de impacto de um material específico. Logo, mesmo para os blocos de vedação e pavimentação, a unidade funcional de volume (1m^3) também foi utilizada para manter uma uniformidade na análise, apesar desses materiais serem comercializados por unidades.

3.4.2 Fronteiras do sistema

As fronteiras adotadas para a ACV comparativa entre os diferentes traços de materiais incorporando RBRO são apresentadas Figura 11. A análise é classificada como berço-ao-portão (*cradle-to-gate*) ou berço-ao-canteiro (*cradle-to-site*), onde a fronteira se encerra com o transporte do material até o ponto de uso. Logo, são considerados os fluxos das seguintes etapas: extração das matérias-primas, produção dos materiais, transporte e mistura dos traços. Devido à baixa influência no impacto total e grande incerteza de quantificação, para os processos principais da análise, não foram considerados os impactos relacionados à infraestrutura e à manutenção das fábricas. Sendo assim, para manter consistência, excluiu-se também os processos de infraestrutura contidos nos processos de segundo plano do banco de dados (dos dados genéricos como transporte, energia, etc.), assinalando a opção de configuração “excluir processos de infraestrutura” ao executar a análise no SimaPro. Contudo, para os minerais areia, brita, argila e calcário, considerou-se o impacto de ocupação do solo, devido à ocupação de uma grande área por um longo período para a extração desses minerais. Similarmente, considerou-se o impacto evitado da área de aterro que seria ocupada permanentemente como destino final para o RBRO.

Figura 11 – Fronteiras do sistema



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além da análise dos traços, outras análises comparativas foram realizadas, onde a fronteira do sistema termina na produção dos componentes dos traços. Para a análise comparativa entre as alternativas de secagem do RBRO, e as comparações entre RBRO/RBROTT e os outros componentes (fíler calcário, areia, pó-de-pedra, cimentos), a fronteira termina com o material produzido, e pronto para o transporte. Também se realizou análise para encontrar a distância de transporte adicional limite do RBRO/RBROTT.

3.4.3 Objetivos de qualidade dos dados do inventário

O objetivo da qualidade dos dados (DQG) para a avaliação é apresentada a seguir:

- Representatividade temporal: O ano de 2016;
- Representatividade geográfica: O estado do Espírito Santo - Brasil;
- Representatividade tecnológica: Tecnologia disponível no mercado brasileiro, e no estado do ES.

- Confiabilidade dos dados: Ordem de prioridade como fonte dos dados: 1) Cálculos e estimativas com base nos dados coletados em fábricas no ES; 2) Dados médios de relatórios nacionais; 3) Dados da literatura, em geral; 4) Banco de dados.
- Integridade dos dados: Dados representativos e que considerem flutuações do mercado.

Com base no DQG, atribuem-se os indicadores de qualidade dos dados (DQI) de representatividade temporal, geográfica e tecnológica para os fluxos dos processos. Já os DQI's de confiabilidade e integridade dos dados independem do DQG. Para a avaliação qualitativa de qualidade dos dados e atribuição dos DQI's (de 1 a 5, sendo 1 o dado mais representativo) para cada fluxo dos processos, utilizou-se a matriz pedigree⁷ do Ecoinvent (WEIDEMA *et al.*, 2013). A partir dos DQI's, é possível obter fatores de incerteza que permitem o cálculo da distribuição dos dados e desvio padrão (DESCHAMPS *et al.*, 2018). Na versão 'PhD' do SimaPro é possível utilizar essas informações para realizar a análise de incerteza dos dados por meio da análise de Monte Carlo, medindo assim a robustez dos resultados.

3.4.4 Escolha dos indicadores de impacto

A abordagem de empregar diferentes métodos de impacto é importante para reduzir a limitação que a escolha de apenas um método de impacto pode causar nas conclusões da avaliação, tornando, assim, a avaliação mais confiável (BUENO *et al.*, 2016; STEINMANN *et al.*, 2016). Ademais, é importante para notar se não há transferência de impactos de uma categoria a outra. Contudo, a tomada de decisão baseada em diversos indicadores simultaneamente pode ser inviável, sendo necessária uma redução da quantidade de indicadores para considerar apenas os mais representativos do impacto total (STEINMANN *et al.*, 2016).

Sendo assim, priorizou-se inicialmente para este estudo o uso dos indicadores de aquecimento global (AG) e energia incorporada (EI), sendo indicadores amplamente

⁷ A matriz pedigree é um quadro-ferramenta que apresenta os critérios para avaliação da qualidade dos dados de inventário – a atribuição dos DQI's.

utilizados em estudos de ACV, e que possuem uma forte correlação com outros indicadores de impacto (KLEIJER *et al.*, 2017; STEINMANN *et al.*, 2016). O método de aquecimento global faz a transformação de todos os gases que contribuem para o efeito estufa, para a unidade de kg CO₂ eq. Já o indicador de energia incorporada, contabiliza o uso de energia em todos os processos que compõem o ciclo de vida do produto, incluindo o uso direto do consumo de energia e o uso indireto, devido à produção dessa fonte de energia. Sendo assim, 1 kWh ou 1 MJ consumido em um processo do ciclo de vida, possui um impacto de energia incorporada do ciclo de vida maior que o valor consumido diretamente pelo processo.

Além desses dois métodos de impacto, voltados para uma única categoria de impacto, considerou-se importante a utilização de métodos de impacto que representassem diversas categorias simultaneamente. Para isso, escolheram-se métodos multicategorias, com agregação em um indicador único de impacto total (IT), que fossem representativos para o estudo e amplamente empregados em avaliações de materiais de construção civil.

Sendo assim, ao total foram adotados 3 indicadores de impacto, provenientes de 5 diferentes métodos de impacto, para as análises de opções de secagem do RBRO, comparação do RBRO com outros componentes do traço e de produção do RBROTT:

1. Aquecimento global (AG): kg CO₂ eq. (IPCC 2013),
2. Energia incorporada (EI): MJ (CED),
3. Impacto total (IT): *Ecopoints* – Pt (Impact2002+, EDIP 2003, ReCiPe 2008).

Após essa análise inicial, manteve-se os 3 indicadores para a avaliação comparativa dos traços dos materiais. Contudo, para simplificar a análise dos traços, utilizou-se apenas um método de impacto como indicador de impacto total, abordagem já adotada na literatura (KLEIJER *et al.*, 2017), sendo escolhido o Impact2002+ (JOLLIET *et al.*, 2003) por ser um método bastante utilizado na literatura em avaliações comparativas de materiais de construção civil. Apesar de possuir um escopo europeu de aplicação (MENDES; BUENO; OMETTO, 2016), o Impact2002+ vem sendo utilizado em estudos em outras partes do mundo (HOSSAIN *et al.*, 2016), e no Brasil (EVANGELISTA; ROSADO; PENTEADO, 2018; ROSADO *et al.*, 2017;

BUENO *et al.*, 2016). A razão disto é a abordagem combinada de *endpoints* e *midpoints* utilizada pelo método, além de possibilidade de agregação de todas as categorias de impacto em uma unidade de pontuação única (*Ecopoints – single score*).

Ademais, utilizou-se a resistência à compressão axial (f_c) como balizador dos três indicadores de impacto para a análise comparativa dos traços, sendo denominado de “intensidade dos indicadores”, representando os indicadores de impacto por MPa de resistência à compressão axial do traço (VIEIRA *et al.*, 2017). Dessa forma, objetivou-se uma análise em que a função do material fosse levada em consideração. Contudo, ainda há limitações nessa análise, pois ela não reflete diretamente a função do material, e sim, uma propriedade do mesmo. Os traços dos materiais analisados neste estudo possuem diferentes aplicações: estrutural, vedação, revestimento, assentamento, pavimentação. Assim, esta análise de intensidade dos indicadores deve ser seguida com cautela.

3.4.5 Escolha dos traços a serem analisados

Tabela 1 – Resumo dos materiais e traços utilizados

Materiais	Nº de artigos	Nº de traços	Consumo médio de cimento dos traços (kg/m³)
Argamassa de assentamento	1	10	173,98
Argamassa de revestimento	1	9	198,94
Argamassa de alta resistência	2	8	433,13
Concreto convencional ¹	4	27	353,44
Concreto alto desempenho ²	1	8	394,50
Concreto autoadensável ³	4	15	453,20
Bloco de vedação	2	8	229,35
Blocos de pavimentação	2	13	364,65
Argamassa com RBROTT	1	9	443,57
Concreto com RBROTT	2	20	327,93
TOTAL	20	127	

Notas: ¹ Classificação do traço controle do estudo na classe de resistência do grupo I (20 a 50 MPa) de acordo com a norma NBR 8953 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2015).

² Classificação do traço controle do estudo na classe de resistência do grupo II (50 a 100 MPa) de acordo com a norma NBR 8953 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2015). Além disso, apresenta melhorias na trabalhabilidade e durabilidade.

³ Concreto de alta trabalhabilidade com boa fluidez e coesão. Possui alto teor de finos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os traços escolhidos foram retirados de artigos de revistas indexadas com fator de impacto, congressos nacionais e internacionais, relatórios e dissertações de mestrado. Após um amplo levantamento bibliográfico inicialmente realizado (Seção 2.3.3), reduziu-se o número de trabalhos para 20. Os critérios para seleção utilizados foram: a) Utilização do RBRO para fabricação de materiais de construção civil de origem cimentícia (argamassas, concretos, blocos de argamassa); b) Definição do traço em consumo de materiais (kg/m^3), ou possibilidade de transformação do traço unitário em massa para esta unidade a partir das informações do trabalho (massa específica real); c) granulometria do resíduo condizente com o resíduo gerado no processo de corte dos blocos e polimento das chapas, excluindo, assim, resíduos provenientes de jazidas e com granulometria equivalente a agregado miúdo.

Dos 20 trabalhos analisados, extraiu-se 127 traços, sendo um resumo apresentado na Tabela 1. Os materiais analisados foram classificados em 10 diferentes categorias de argamassas, concretos e blocos. As argamassas foram separadas em três tipos distintos: assentamento, revestimento e alta resistência. Utilizou-se neste estudo, por simples motivo de diferenciação, a nomenclatura de ‘argamassa de alta resistência’ para os traços provenientes dos estudos onde as argamassas avaliadas não eram nem de assentamento e nem de revestimento. Para mais informações, o detalhamento da composição dos traços é apresentado no Apêndice A.

Quanto à composição química dos diferentes tipos de RBRO utilizados nos artigos de onde extraíram-se os traços, um resumo é apresentado na Tabela 2. Observa-se que as rochas a partir das quais os resíduos foram gerados podem ser classificadas como granitos (maior teor de SiO_2) e mármore (maior teor de CaO). Para a fabricação do RBROTT, o resíduo utilizado é originário da rocha granítica.

Tabela 2 – Composição química resumida do RBRO.

Nº artigo	Fonte	Teor (%) compostos				Classificação da Rocha
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	
1	Calmon <i>et al.</i> (1997)	59,9	10,3	6,1	6,5	Gr
2	Vinco <i>et al.</i> (2017)	57,9	24,9	4,1	2,7	Gr
3	Baeza <i>et al.</i> (2014)	3,7	1,4	0,35	63,7	Ma
4	Corinaldesi, Moriconi e Naik (2010)	(66% CaCO ₃ ; 3% Quartz; 2% Ankerita)				Ma
5	Gonçalves, Moura e Dal Molin (2002)	59,6	12,7	9,5	4,8	Gr
6	Rana, Kalla e Csetenyi (2015)	44,1	2,2	2,98	42,1	Gr+Ma
7	Bacarji <i>et al.</i> (2013)	54,1-58,7	9,7-11,3	5,9-7,6	6,1-13,0	Gr
8	Ergün (2011)	0,2	0,7	0,1	51,7	Ma
9	Almeida <i>et al.</i> (2007)	0,9	3,7	0,4	54,3	Ma
10	Calmon <i>et al.</i> (2005)	-	-	-	-	-
11	Sadek, El-Attar e Ali (2016)	72,9	13,4	1,1	1,2	Gr
12	Gesoğlu <i>et al.</i> (2012)	1,3	0,4	0,8	52,4	Ma
13	Uysal e Sumer (2011)	0,7	0,3	0,1	55,5	Ma
14	Moura <i>et al.</i> (2006a)	58,7	8,7	7,2	2,5	Gr
15	Moura e Leite (2011)	5,9	1,2	9,1	79,1	Ma
16	Moura <i>et al.</i> (2006b)	67,4	7,7	1,1	2,5	Gr
		6,9	1,3	0,5	86,8	Ma
17	Mashaly <i>et al.</i> (2016)	0,1	0,1	0,1	55,3	Ma
18	Uliana <i>et al.</i> (2015)*	62,9-64,6	22,1-24,8	1,5-4,6	2,6-2,8	Gr
19	Mittri (2016)*	67,1	23,4	1,5	2,6	Gr
20	Degen (2017)*	67,1	23,4	1,5	2,6	Gr

Legenda: Gr = Granito; Ma = Mármore. Nota: * Resíduo tratado termicamente.

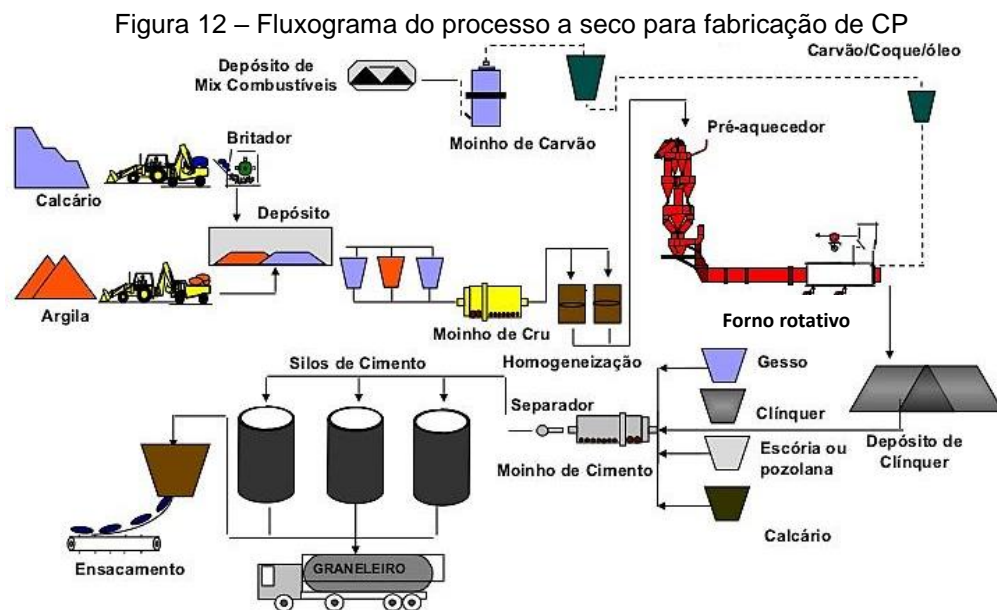
3.5 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DOS MATERIAIS COMPONENTES

Nesta seção, serão descritas as medidas, cálculos e estimativas realizadas, bem como a literatura utilizada para elaboração do ICV dos materiais componentes dos traços (cimento, cal, areia, brita/pó de pedra, aditivos). Os dados de inventário podem ser vistos no Apêndice B, onde se apresenta resumidamente a quantidade de cada fluxo, fonte dos dados e análise de qualidade dos dados. Já no Apêndice C, apresenta-se o formulário utilizado para coleta de dados junto à Provale, que produz o fíler calcário e argamassa industrializada. Para os outros processos principais, utilizaram-se os dados mais recentes e representativos para o cenário deste estudo encontrados na literatura. Para os processos principais onde não havia disponibilidade na literatura,

utilizaram-se os dados mais atuais dentre os disponíveis no banco de dados⁸ do Ecoinvent.

3.5.1 Cimentos

O fluxograma do processo de produção do cimento é resumido na Figura 12, e para a elaboração do inventário do cimento, os percentuais de seus materiais componentes (clínquer, gesso, fíler calcário, EGAF) foram retirados das respectivas normas brasileiras, como se observa na Tabela 3. Considerou-se a composição com o teor mínimo de clínquer + gesso dentre a faixa aceitável pela respectiva norma, objetivando obter um cimento com menor impacto. Como alguns traços foram retirados da literatura internacional, eles utilizavam tipos de cimentos estrangeiros, que foram correlacionados com os respectivos cimentos equivalentes nacionais, como apresentado na Tabela 4.



Fonte: Magnavita *et al.* (2009, p.9)

Para a produção de clínquer, além do calcário, outras matérias primas são consumidas. Neste estudo foi considerado 1,3 t de calcário para composição de 1 t de clínquer, estimado por balanço de massa molar através de relatório de emissões nacional (MCTIC, 2016). No processo de calcinação, 44% do calcário são

⁸ Quando não for especificado no texto, o termo 'banco de dados' se refere ao Ecoinvent.

transformados em CO₂, sendo que a emissão de 0,571 kg CO₂/kg clínquer foi relatada referente ao processo de calcinação para o ano de 2014. Ademais, na composição de 1 t clínquer têm-se também as adições de 0,2 t de argila, 0,1 t de areia e 0,03 t de minério de ferro (CARVALHO, 2009).

Tabela 3 – Composição dos diferentes tipos de cimento utilizados

Cimento	Componentes (% em massa)					Total	Fonte
	Clínquer + gesso	Clínquer	Gesso	Fíler calcário	EGAF		
CP I	100	95	5	-	-	100	NBR 5732
CP I-S	95	90,25	4,75	5	-	100	NBR 5732
CP V-ARI							NBR 5733
CP II-F	90	85,5	4,5	10	-	100	NBR11578
CP II-E	56	53,2	2,8	10	34	100	NBR11578
CP III	25	23,75	1,25	5	70	100	NBR 5735

Fonte: NBR 5732, NBR 5733, NBR5735 e NBR11578 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1991d, 1991c, 1991b, 1991a)

Tabela 4 – Correlação dos cimentos estrangeiros com os brasileiros

Cimento estrangeiro	Equivalente nacional	Clínquer	Gesso	Fíler calcário	Total
CEM II/ B-L (Europeu) ¹	CP II-F	65-79	0-5	21-35	100
CEM II/ A-L (Europeu)	CP II-F	80-94	0-5	6-20	100
PC Grade 53 (Indiano)	CP I-S / CP V	90	5	5	100
CEM I (Europeu)	CP I-S / CP V	90	5	5	100

Nota: ¹ Cimento com alto teor de fíler calcário na composição, sem um equivalente nacional mais representativo
Fonte: Elaborado pelo autor

3.5.1.1 Consumo energético

A indústria do cimento possui um intenso gasto energético, elétrico e térmico. A produção do clínquer engloba as etapas de britagens do calcário e argila, correias transportadoras, alimentação e funcionamento do moinho de cru, homogeneização, alimentação e exaustão do forno rotativo e resfriamento do clínquer. Por sua vez, a produção do cimento engloba as etapas da alimentação e funcionamento do moinho de cimento, e o transporte do cimento e armazenamento no silo (Figura 12). Baseado no relatório nacional energético, um consumo total de energia elétrica de 111 kWh/t de cimento é estimado para o ano de 2015 (7184 GWh com produção de 64,6 milhões de toneladas de cimento) (EPE, 2016). Cerca de 40% desse consumo concentra-se apenas na moagem do clínquer na fábrica de cimento. Já na fabricação do clínquer,

aproximadamente 25% desse total é consumido para moagem da matéria-prima da farinha de cru, e cerca de 20% na operação do forno rotativo e resfriador (MARINGOLO, 2001). Sendo assim, como aproximação, utilizou-se neste estudo o consumo total de 111 kWh/t dividido igualmente entre os processos de fabricação do cimento e do clínquer, contabilizando 55,5 kWh/t para cada processo.

Quanto aos gastos com energia térmica, as cimenteiras brasileiras utilizam o “processo por via seca”, com sistemas de pré-aquecimento e pré-calcinação. No processo de clínquerização, a farinha de cru é submetida a temperaturas de aproximadamente 1450°C. Nesse processo, o consumo de energia térmica estimado para 2015 é de 4,07 MJ/kg clínquer, sendo o coque de petróleo o tipo de combustível mais utilizado, representando 81% do consumo total (EPE, 2016). Uma estimativa do consumo dos combustíveis do forno baseada no EPE (2016), realizado em trabalho anterior, foi utilizado (VIEIRA *et al.*, 2017). Quanto ao inventário do coque de petróleo (poder calorífico = 33 a 35 MJ/kg), ao analisar-se o indicador CED de EI (método CED) para a produção de clínquer, notou-se que o Ecoinvent considerava o coque de petróleo como um resíduo (CED = 8,66 MJ/kg), e não como uma fonte de energia, contabilizando apenas o consumo de energia de seu processamento. Logo, como o coque de petróleo não é um resíduo (PETROBRAS, 2014), utilizou-se o banco de dados do *United States Life Cycle Inventory* (USLCI, 2015), também presente no SimaPro, onde o coque de petróleo é considerado uma fonte de energia (EI = 53.5 MJ/kg), contabilizando o seu poder calorífico, mais a energia consumida em seu processamento como EI.

3.5.1.2 Emissões

As emissões de dióxido de carbono (CO₂) possuem duas fontes principais no processo de fabricação do cimento: a descarbonatação, onde o carbonato de cálcio (CaCO₃) é convertido em óxido de cálcio (CaO) e emite CO₂; e a queima de combustíveis para alimentação do forno rotativo. O valor das emissões de CO₂ considerado foi de 0,947 kg CO₂/ kg clínquer. Desse total, 0,571 kg CO₂ é proveniente da calcinação (26845 Gg CO₂ eq.⁹ para produção de 47000 Gg clínquer) e 0,376 kg CO₂ da queima de

⁹ Gg: Gigagrama = 10⁶ quilogramas

combustíveis (17668 Gg CO₂ eq. para produção de 47000 Gg clínquer), representando a média nacional estimada para o ano de 2014 (MCTIC, 2016). As emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) e materiais particulados (MP) foram estimadas com base nos limites permitidos na legislação brasileira CONAMA Nº436 (BRASIL, 2011), considerando taxas de emissão de ar de uma planta padrão (produção de 200 t cimento/h). Para a emissão de óxidos de enxofre (SO_x), foram considerados os valores do estudo de Carvalho (2002), e para a emissão de monóxido de carbono (CO), por falta de dados nacionais, foi mantida a do banco de dados.

3.5.1.3 Argila

A argila é utilizada como matéria-prima para produção de clínquer. O consumo energético de seu processo de produção foi adaptado para melhor corresponder ao cenário brasileiro. Na mineração da argila, consideraram-se as operações de extração do minério (escavação mecânica), transporte interno da mina e estocagem, com consumo de óleo diesel. Para a extração da argila, considerou-se 0,8 l diesel/t argila (densidade diesel = 0,84 kg/l; poder calorífico 42,8 MJ/kg), referente ao consumo energético padrão de uma mina cativa brasileira (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME, 2009a). Para o valor da área de ocupação da mina, utilizou-se o banco de dados.

3.5.1.4 Calcário e Fíler calcário

Para a produção do clínquer, o calcário é britado, e então moído com argila e aditivos específicos (areia, minerais ferrosos). Ele corresponde a cerca de 80% dessa mistura, chamada de farinha de cru, que é calcinada no forno rotativo e transformada em clínquer. Ele também é utilizado finamente moído (fíler calcário) como uma adição no cimento, produzindo cimentos compostos, tais como CP II-F. O consumo energético referente aos processos de fragmentação de minérios geralmente aumenta em uma ordem de magnitude na sequência das etapas, como relatado por Delboni Jr. (2008). Na extração por desmonte com explosivo consome-se cerca de 0,1 kWh/t, aumentando para 1 kWh/t em britadores, chegando a cerca de 10 kWh/t em circuitos de moagem, podendo atingir 100 kWh/t em processos de pulverização fina.

Para o processo de moagem fina do fíler calcário, foram utilizadas estimativas com base em dados coletados através de formulário na empresa Provale, localizada no estado do ES (Apêndice C). A visita técnica foi realizada em Junho 2017, e os dados fornecidos são referentes ao ano de 2016. Dados referentes à jazida e ao volume de produção não foram informados pela empresa. Logo, o inventário referente à extração do calcário na jazida e britagem foi adaptado do banco de dados (MARTINEAU, 2014a, 2014b) para o cenário brasileiro, alterando os fluxos considerados, a matriz energética e o transporte. Ademais, para cada fluxo, escolheram-se os dados mais atuais dentre os disponíveis na versão do banco de dados. Para o valor da área de ocupação da mina e as emissões de extração, utilizou-se o banco de dados.

O funcionamento anual dos moinhos medido pelo horímetro foi de 3036h, sendo a potência instalada total do sistema (6 moinhos + filtro de mangas) de 1635 kW, resultando num consumo anual de aproximadamente 4,96 milhões kWh. A empresa não forneceu dados da produção total referente ao ano de 2016, mas sabe-se que sua mina é classificada como P3 (produção anual de 50 a 100 mil t /ano). Então, se utilizou como base o anuário mineral brasileiro mais recente, referente ao ano de 2009 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM, 2010). A Provale representa cerca de 2,5% de todos minerais comercializados no estado (englobando também rochas ornamentais, britadas, areia, argila), de um valor total de mais e 423 milhões de reais. Só a comercialização de calcário bruto e beneficiado no estado, movimentou quase 40 milhões de reais em 2009. Sendo assim, de acordo com estimativa realizada, a empresa representa aproximadamente 26,4% do mercado de calcário no ES. Considerando esse percentual como representatividade da Provale no mercado de calcário bruto e beneficiado, temos que, de uma produção total estadual de 296,77 mil toneladas de calcário beneficiado, a empresa produziu o equivalente a 78,35 mil toneladas de calcário beneficiado em 2009. Logo, chega-se a um consumo estimado de 63,34 kWh/t fíler calcário.

3.5.1.5 Gesso e escória de alto-forno

O gesso é utilizado como uma adição na moagem do clínquer para fabricação de cimentos, por ser um retardador de pega. O inventário utilizado foi o presente no banco de dados do Ecoinvent, proveniente do estudo de Kellenberger *et al.* (2007). Já a

escória (EGAF) é um subproduto da produção do ferro gusa, e utilizado para fabricação dos cimentos CP II-E e CP III. O inventário utilizado foi o presente no banco de dados do Ecoinvent, proveniente do estudo de Marceau and Vangeem (2003), sendo consideradas as etapas de: granulação, secagem, trituração, moagem e armazenamento. A alocação de impacto estimada da produção de ferro gusa para escória é de 1,39% (VIEIRA *et al.*, 2017).

3.5.2 Cal

A matéria-prima da cal, assim como para fabricação do clínquer, é a rocha calcária. Primeiro produz-se a cal virgem (ou cal viva) pela calcinação da rocha calcária à temperatura de 900 a 1200°C. Em seguida, é realizada a combinação dos óxidos anidros da cal virgem com a água, produzindo-se a cal hidratada. O consumo específico do forno para produção de cal virgem é 4,29 MJ/kg (1026 mil kcal/t), tendo como combustíveis mais utilizados o coque de petróleo (30%), gás natural (20%), lenha (20%), óleo combustível (20%) e carvão (10%) (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME, 2009b). Partindo disso, estimaram-se os valores em massa ou volume dos respectivos combustíveis com base no poder calorífico dos mesmos. Ademais, utilizou-se o banco de dados para valores de consumo de diesel para transporte interno e de energia elétrica para outros processos (pré-aquecimento e moagem dos combustíveis, coletor de particulados, etc.).

Pelo balanço de massa molar, a cada 1 t de CaCO_3 (massa molar = $40 + 12 + 3 \times 16 = 100$) que é calcinado, produz-se 560 kg de CaO (massa molar = $40 + 16 = 56$), e emite-se 440 kg de CO_2 (massa molar = $12 + 16 \times 2 = 44$). Logo, para produção de 1t de CaO , são necessárias 1,78 t CaCO_3 e libera-se 0,78 kg CO_2 . Para contabilizar as emissões da queima de combustíveis do forno, utilizou-se uma abordagem adotada no relatório do Perfil da Cal (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME, 2009b). Estimou-se a emissão de CO_2 do combustível do forno considerando que todo combustível seja gás natural (Relação energia/emissão = $4260 \text{ kcal/ kg de } \text{CO}_2 = 17,8 \text{ MJ/ kg } \text{CO}_2$), resultando numa emissão de 0,241 kg $\text{CO}_2/\text{ kg cal virgem}$. Multiplicando-se por um fator de 1,5 (média dos fatores dos combustíveis usados em relação ao gás natural) para corrigir a consideração do combustível, obtêm-se 0,361 kg $\text{CO}_2/\text{ kg cal virgem}$. Portanto, totalizando 1,141 kg $\text{CO}_2/\text{ kg cal virgem}$. Para os dados de emissões

de CO, NO_x, SO₂ e MP, utilizou-se os valores mais recentes dentre os disponíveis na versão utilizada do banco de dados Ecoinvent, inventário representativo da região do Québec (MARTINEAU, 2014c) .

Pelo balanço de massa molar, no processo de hidratação da cal, a cada 1 t de Ca(OH)₂ produzido (massa molar = 40 + 2 x 16 + 2 x 1 = 74), são necessários 757 kg de CaO (massa molar = 40 + 16 = 56) e 243 l de água (massa molar = 2 x 1 + 16 = 18). Para o consumo energético dos equipamentos envolvidos nesse processo de hidratação foi utilizado o banco de dados (MARTINEAU, 2014d).

3.5.3 Areia

Os métodos normalmente utilizados para extração da areia são dragagem, desmonte hidráulico e desmonte mecânico, além da produção de areia industrial. A dragagem é utilizada para extração em leitos de rios e em áreas de várzea com cava submersa, o desmonte hidráulico para cavas secas, e o desmonte mecânico em dunas, areia consolidada em forma de arenitos ou quartzitos e cascalho desagregado (SOUZA, 2012; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME, 2009c). A produção brasileira de areia é realizada majoritariamente em leitos de rio, representando 70% do total (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME, 2009c).

O consumo energético da extração da areia é basicamente diesel, utilizado em motores e bombas. Para extração em leito de rio, utilizam-se dragas com bombas de sucção instaladas em barças, onde a água é bombeada junto com a areia, formando uma polpa. Similarmente, em áreas de várzea, escavações são realizadas até o afloramento da água subterrânea, e após, utilizam-se dragas com bombas de sucção. As barças podem ser móveis (de autopropulsão ou com auxílio de rebocadores), ou de ancoragem fixa, onde o minério é transportado por meio de tubulações. Na etapa de beneficiamento, têm-se o peneiramento, a classificação e a secagem (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME, 2009c).

Após revisão da literatura sobre areia extraída em leito de rio, notou-se uma grande variação no consumo energético de diferentes estudos. Sendo assim, optou-se por realizar uma média do consumo entre os mesmos. No estudo brasileiro de Souza (2012), verificou-se o consumo de 0,099 MJ/kg areia; no estudo de Marinkovic *et al.*

(2008), têm-se o valor de 0,0148 MJ/kg areia; e no estudo de Hossain *et al.* (2016), o valor de 0,0690 MJ/kg areia foi relatado. Sendo assim, o valor adotado neste estudo é o valor médio dos anteriores, sendo de 0,0609 MJ/kg de areia.

A extração da areia geralmente ocupa muita área, pois a camada do material não é muito espessa (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME, 2009c). Para estimar a área ocupada, utilizou-se abordagem similar à utilizada pelo banco de dados na estimativa da área ocupada pela mina de argila. Adotou-se uma espessura de areia extraída de 10 m, compatível com profundidade alcançada de extração de dragas (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME, 2009c). Então, a cada metro quadrado de ocupação, têm-se 10 m³ de areia. Considerando a densidade da areia de 1,6 t/m³, isso equivale a 16 t de areia extraída a cada m² de ocupação. Logo, tem-se que a área usada por 1 kg de areia é de 1/16000 kg = 6,25x10⁻⁵ m². Considerando um tempo de exploração médio de 20 anos, a área de ocupação ano é igual a 6,25x10⁻⁵ x 20 = 1,25x10⁻³ m²a.

3.5.4 Brita e pó de pedra

Brita é o termo utilizado para se referir a fragmentos de rochas duras, como granito, gnaiss, basalto e calcário, extraídos de pedreiras com o auxílio de explosivos. A extração brasileira ocorre predominantemente (85%) em maciços rochosos de granito e gnaiss. No processo de extração tradicional, o maciço é perfurado e inserem-se os explosivos para realizar o desmonte. Em plantas fixas de britagem e classificação, localizadas em uma área adjacente à jazida, diferentes granulometrias do material são produzidas, como rachão, gabião, brita 0 a 5, pó de pedra e areia de brita (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME, 2009d).

Como nesse processo de britagem, há saída de múltiplos materiais, para a brita e pó de pedra utilizada neste estudo, considerou-se alocação em massa para todo o processo. Sendo assim, ainda que a entrada de 1 t de rocha bruta tenha saída de diferentes quantidades de brita e pó de pedra, para produção de 1 t de brita e 1 t de pó de pedra, o inventário considerado é o mesmo. Como exemplo, tem-se que o processo total de britagem consome 3,72 kWh/t para produzir, supostamente, 950 kg de brita e 50 kg de pó de pedra. Assim, 95% (950/1000) do consumo de energia são

alocados para a brita, e 5 % (50/1000) para o pó de pedra. Totalizando assim 3,534 kWh para produzir 950 kg de brita e 0,186 kWh para produzir 50 kg de pó de pedra, o mesmo que 3,72 kWh/t de cada material.

Para o valor da área de ocupação da mina, utilizou-se como aproximação o valor do banco de dados para extração do calcário. Para dados de inventário de materiais e energia do processo de produção da brita, utilizou-se um estudo brasileiro recente publicado em revista internacional, referente à extração em uma mina de basalto (ROSADO *et al.*, 2017). Foram considerados o consumo de explosivos, água, combustíveis, energia elétrica e transporte interno. Para dados de emissão na pedreira, por falta de dados mais precisos, como aproximação, utilizaram-se os valores da extração de calcário do banco de dados.

3.5.5 Aditivos

Para o inventário dos aditivos, considerou-se a declaração ambiental de produto (DAP) de um superplastificante desenvolvida pela *European Federation of Concrete Admixtures Association* - EFCA (2002) com apoio de consultoria independente, e aprovada por acadêmicos para o uso em ACV's de concreto.

3.5.6 Resumo do inventário dos materiais

Na Tabela 5 apresenta-se um resumo do inventário do cimento e suas matérias-primas. O inventário completo é apresentado em detalhe no Apêndice B.

Tabela 5 – Resumo do inventário do cimento e suas matérias-primas

Processo	Tipo do fluxo	Fluxo	Quantidade	Unidade
Cimento (1 kg)	Materiais	Clínquer/Gesso/Fíler Calcário/Escória	Variável	kg
	Energia/Processamento	Eletricidade	0,0555	kWh
	Emissões	Embalagem	1	kg
Clínquer (1 kg)	Materiais	Particulados	0,09	g
		Calcário, britado	1,3	kg
		Argila	0,2	kg
		Areia	0,1	kg
	Energia	Minério de ferro	0,03	kg
		Coque de petróleo	101,08	g
		Carvão vegetal	3,46	g
		Carvão mineral	3,45	g
		Lenha	4,6	g
		Óleo diesel	59,1	kJ
		Gás natural	0,33	dm ³
		Óleo combustível	0,22	g
	Emissões	Eletricidade	0,0555	kWh
		Dióxido de carbono	0,947	kg
		Monóxido de carbono	0,47	g
Óxidos de nitrogênio		2,17	g	
Óxidos de enxofre		0,32	g	
Fíler calcário (1 kg)	Materiais	Calcário, britado	1	kg
	Energia	Eletricidade	0,06334	kWh
Calcário, britado (1 kg)	Materiais	Calcário, bruto	1	kg
	Energia	Eletricidade	0,000255	kWh
		Óleo diesel	0,0034	MJ
	Emissões	Particulados < 2.5 um	1,75E-05	kg
		Particulados > 2.5 um, e < 10um	7,51E-05	kg
Calcário, bruto (1kg)	Materiais	Particulados > 10 um	0,000148	kg
		Calcita	1	kg
	Solo	Água	2,14E-02	dm ³
		Ocupação	1,34E-03	m ² a
	Energia/Processamento	Desmorte por explosivo	1,82E-05	kg
		Eletricidade	2,73E-05	kWh
		Óleo diesel	0,0333	MJ
	Emissões	Água evaporada	2,14E-02	dm ³
		Particulados < 2.5 um	6,08E-06	kg
		Particulados > 2.5 um, e < 10um	5,89E-05	kg
Particulados > 10 um		0,000159	kg	
Argila (1 kg)	Materiais	Mineral argila	1	kg
	Solo	Ocupação	1,67E-04	m ² a
	Energia	Óleo diesel	0,0288	MJ
Gesso	Variados	Variados [Inventário não modificado]	-	-
Escória	Variados	Variados [inventário não modificado]	-	-
Minério de ferro	Variados	Variados [Inventário não modificado]	-	-

Na Tabela 6 apresenta-se um resumo do inventário da cal, areia e brita. O inventário completo é apresentado em detalhe no Apêndice B.

Tabela 6 – Resumo do inventário da cal, areia e brita.

Processo	Tipo do fluxo	Fluxo	Quantidade	Unidade
Cal hidratada (1 kg)	Materiais	Cal virgem	0,757	kg
		Água	0,243	dm ³
	Energia/ Processamento	Eletricidade	0,0321	kWh
		Embalagem	1	kg
Cal virgem (1 kg)	Materiais	Calcário, britado	1,78	kg
	Energia	Eletricidade	0,0438	kWh
		Óleo diesel	0,0148	MJ
		Coque de petróleo	39,00	g
		Carvão vegetal	13,84	g
		Lenha	57,20	g
		Gás natural	23,83	dm ³
		Óleo combustível	21,45	g
	Emissões	Dióxido de carbono	1,141	kg
		Monóxido de carbono	0,208	kg
		Óxidos de nitrogênio	1,61	g
		Óxidos de enxofre	1,99	g
		Particulados < 2.5 um	0,0066	g
		Particulados > 2.5 um, e < 10um	0,00194	g
		Particulados > 10 um	0,00169	g
Areia (1 kg)	Materiais	Areia quartzosa	1	kg
	Solo	Ocupação	1,25E-03	m ² a
	Energia	Óleo diesel	0,0609	MJ
Brita/pó de pedra (1 kg)	Materiais	Granito	1,05	kg
		Água	8,07E-03	dm ³
	Solo	Ocupação	1,34E-03	m ² a
	Energia	Desmonte por explosivo	1,45E-04	kg
		Eletricidade	3,72E-03	kWh
		Óleo diesel	8,28E-03	MJ
		Óleo lubrificante	6,00E-03	g
		Transporte interno	1	kg·km
	Emissões	Particulados < 2.5 um	6,08E-06	kg
		Particulados > 2.5 um, e < 10um	5,89E-05	kg
Particulados > 10 um		1,59E-04	kg	

3.6 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DO RBRO

Nesta seção, serão descritas as medidas, cálculos e estimativas realizadas, bem como a literatura utilizada para elaboração do ICV do RBRO e RBROTT. Os dados de inventário podem ser vistos no Apêndice B, onde é apresentada a quantidade de cada fluxo, fonte dos dados e análise de qualidade dos dados. Os dados utilizados para o processo de secagem do RBRO pelo filtro prensa foram coletados durante a visita à AAMOL. Estimativas foram realizadas para quantificação da secagem ao ar livre, para as alternativas de secagem artificial e a queima do RBRO para produção do RBROTT.

Para os dados de segundo plano, utilizaram-se os dados mais recentes e representativos para o cenário deste estudo encontrados na literatura e no banco de dados do Ecoinvent.

Como o RBRO é um resíduo industrial, utilizando a abordagem tradicional da ACV, considerou-se o material com um impacto incorporado nulo. Pois, o objetivo do beneficiamento de rochas ornamentais é de produzir chapas polidas, e a geração do resíduo em formato de lama é uma consequência indesejada do processo de produção.

Ademais, o impacto do transporte do resíduo de sua geração nas fábricas de beneficiamento até a central de tratamento de resíduos (CTR) pode ser considerado como um impacto da reciclagem do resíduo. Porém, há o impacto evitado do transporte para o aterro, destino permanente final do resíduo caso não houvesse a sua reciclagem. Essas premissas sobre a fronteira de análise dos resíduos também foram adotadas por outros autores, que realizaram ACV de concreto com agregado reciclado de construção e demolição (KNOERI; SANYÉ-MENGUAL; ALTHAUS, 2013). Então, considerando que a CTR e o aterro estão localizados numa mesma distância dos pontos de geração do resíduo, o impacto dos dois transportes se anulam.

Após a chegada do resíduo na CTR, para a linha do processo de desidratação do RBRO utilizou-se a seguinte ordem (CALMON; BRAGA; PREZOTTI, 2007): 1) Descarregamento dos caminhões-tanque no tanque de decantação; 2) Recalque do tanque de decantação ao sedimentador vertical; 3) Saída do sedimentador para batedor de lama; 4) Recalque do batedor de lama ao filtro prensa; 5) Descarregamento pelo filtro prensa do resíduo desidratado em formato de torta; 6) Transporte à área de secagem ao ar livre; 7) Movimentação do material para secagem; 8) Transporte ao pátio coberto; 9) Destorroamento e armazenamento para uso.

A umidade do RBRO é variável no processo de desidratação, sendo de aproximadamente 70% no tanque de decantação antes de ser bombeado ao sedimentador vertical, 30% no batedor de lama, após passar pelo sedimentador vertical, 15% após passar pelo filtro prensa, e 4% após seco ao ar livre.

3.6.1 Secagem pelo filtro prensa

O processo de secagem do filtro prensa tem como impacto principal o consumo de energia elétrica pelos motores das bombas de recalque e outros motores elétricos adicionais. A entrada do resíduo no processo é no formato de lama fluida (umidade superior a 70%) e a saída é no formato de torta (aproximadamente 15% de umidade). Entram no processo 1,478 kg (1,7/1,15) de lama fluida (70% de umidade) para produzir-se a saída de 1 kg RBRO (15% umidade) e 478 l de água¹⁰. Atualmente na AAMOL, não se faz mais o uso de flocculantes químicos, pois seu uso estava causando perda de eficiência na utilização do filtro prensa.

O fator limitador da capacidade produtiva do sistema de desidratação é o filtro prensa (Figura 13d). Seu processo é todo automatizado, e ele possui 25 placas filtrantes de 1000 x 1000 mm², com 4 cm de espessura, totalizando 1 m³ de capacidade de cada ciclo do sistema filtrante. Cada ciclo automatizado do filtro prensa leva cerca de 6 minutos, onde a bomba de recalque está ativa por 4 minutos injetando a lama dentro das placas. A bomba injeta o resíduo no interior das placas filtrantes e a água excedente é capturada por canaletas e transportada por gravidade aos tanques de reaproveitamento da água. O formato de saída do resíduo é designado de torta, que são despejadas pela parte inferior do filtro prensa em caminhões basculantes para transporte.

Assim, durante 1 hora, a bomba do filtro prensa está ativa por 40 minutos, e 10 m³ de resíduo, com aproximadamente 15% de umidade, saem do processo. Considerando a densidade do material de 1,6 t/m³, tem-se uma produção de 16 t/h (256 t/dia, considerando uma jornada de 16h). A potência da bomba de recalque do filtro prensa é de 15 cv (11,03 kW), logo, o consumo por hora é de 7,35 kWh. Como resultado, tem-

¹⁰ Constância de massa. Sendo massa total = massa seca x (1+h), 1 kg RBRO com 15% de umidade apresenta 1/1,15 de massa seca. Já 1 kg RBRO com 70% de umidade apresenta 1/1,7 de massa seca. Logo, para constância de massa do RBRO no processo, entra 1,7/1,15 kg de RBRO com 70% de umidade para saída de 1/1,15 de massa seca (o mesmo que 1 kg RBRO com 15% umidade).

Onde: h (%) = teor de umidade

se que o consumo da bomba de recalque por tonelada de RBRO desidratado (15% de umidade) é de 0,460 kWh.

Figura 13 – Processo de desidratação pelo filtro prensa. a) Lama fluida no tanque de decantação; b) sedimentador vertical; c) baterdor de lama; d) filtro-prensa.



Fonte: Acervo pessoal

A quantidade de 16 t/h que sai do filtro prensa com 15% de umidade, equivale ao recalque de 18,09 t/h ($16 \times 1,30/1,15$) do resíduo com 30% de umidade do baterdor de lama às placas filtrantes. Sendo assim, em um dia (funcionamento de 16 horas do filtro prensa: de 7 às 23h), 289 t de resíduo (30% de umidade) são liberados do sedimentador vertical (Figura 13b) para o baterdor de lama (Figura 13c). Essa quantidade equivale a 378 t ($289 \times 1,70/1,30$) de resíduo na forma de lama fluida (70% de umidade) recalcados do tanque de decantação (Figura 13a) para o sedimentador vertical, onde parte da água também é recuperada para reaproveitamento. A capacidade da bomba de recalque ($15 \text{ cv} = 11,03 \text{ kW}$) do tanque de decantação para o sedimentador vertical é de $150 \text{ m}^3/\text{h}$, resultando em cerca de 190 t/h de lama fluida.

Assim, considera-se que a bomba de recalque do sedimentador está ativa por cerca de 2 h/dia, resultando num consumo de 22,06 kWh/dia. O que resulta em um consumo equivalente por tonelada de RBRO (15% umidade) de 0,086 kWh.

O sistema possui outros motores adicionais para movimentação do batedor de lama, movimentação das placas filtrantes e abertura da bandeja inferior, com potência acumulada de 6 cv (4,41 kW). Sendo o funcionamento horário desses motores adicionais de aproximadamente de 10 minutos, temos um consumo de 0,736 kWh, resultando em um consumo equivalente por tonelada de RBRO (15% umidade) de 0,046 kWh. Sendo assim, o consumo de energia elétrico total do sistema do filtro prensa é de $0,460 + 0,086 + 0,046 = 0,592$ kWh/t de RBRO (15% umidade).

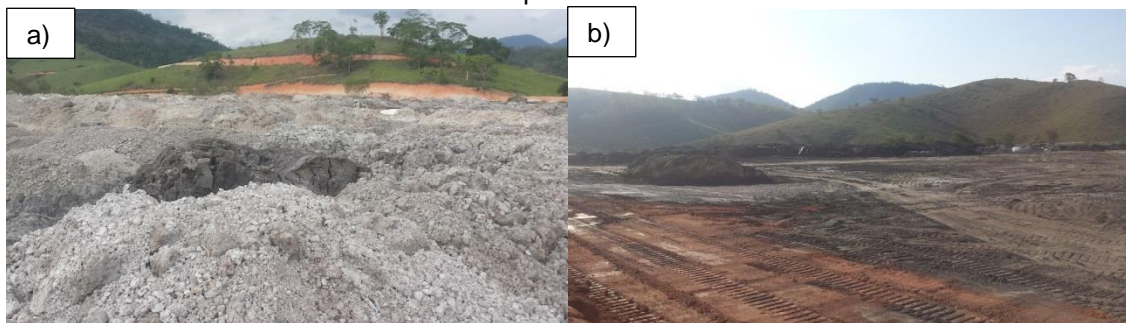
O processo de reciclagem do resíduo também contribui para evitar o impacto de ocupação da área que seria utilizada como destino permanente final para o mesmo. A legislação atual determina que o resíduo deva ser destinado para aterro com no máximo 30% de umidade (IEMA, 2016). Sendo assim, para atender a legislação, as empresas deveriam possuir seu próprio sistema de secagem, com leitos de decantação e filtro prensa, ou enviar o resíduo em formato de lama para ser desidratado num filtro prensa no aterro/CTR. Ensaios de compactação determinaram que a massa específica aparente seca máxima do material após desidratado é de aproximadamente $1,6 \text{ t/m}^3$ (CALMON; BRAGA; PREZOTTI, 2007), sendo assim, uma tonelada do resíduo no aterro ocupa $0,625 \text{ m}^3$. Considerando a profundidade média total do aterro do projeto da AAMOL de 12 m, subdividida em 7 m de altura de escavação e 5 m de acréscimo com acúmulo de resíduos, 1 m^2 de solo possui a capacidade de reservar 12 m^3 do resíduo. Sendo assim, a área equivalente de 1 tonelada de resíduo no aterro é de $5,21 \times 10^{-2} \text{ m}^2$. Adotando uma vida útil de 10 anos (vida útil mínima de um aterro sanitário), tem-se como ocupação evitada do solo¹¹ de $5,21 \times 10^{-1} \text{ m}^2\cdot\text{a/t}$ de RBRO.

¹¹ A ocupação do solo é medida em unidade de área x ano.

3.6.2 Secagem ao ar livre e destorroamento

Após o processo de desidratação pelo filtro prensa, o resíduo deve ser transportado até a área de secagem natural, de maneira que o material alcance um nível de umidade em torno de 4% (CALMON; BRAGA; PREZOTTI, 2007). Para a secagem natural ao ar livre considerou-se o transporte interno da planta e movimentação do material na área de secagem. A distância total aproximada de transporte interno do filtro prensa à área de secagem e após para o pátio coberto para destorroamento e armazenamento é de 1,5 km. A entrada do resíduo no formato de torta (15% de umidade) no processo é de 1,106 kg (1,15/1,04), para a saída de 1 kg RBRO seco ao ar livre (4% umidade) e 106 l de água evaporada¹².

Figura 14 – RBRO em aterro temporário AAMOL. a) RBRO após filtro prensa e seco ao ar livre; b) RBRO compactado em aterro.



Fonte: Acervo pessoal

Primeiramente, o resíduo vai para a área de aterro temporário a céu aberto, onde a umidade é parcialmente reduzida devido à exposição ao ar livre por período prolongado (aproximadamente um mês) (Figura 14a). Após, considerou-se a mistura do resíduo para secagem final, antes de ser transportado para um pátio coberto, onde será destorroado, armazenado e transportado para sua nova aplicação.

Para o processo de mistura para secagem natural, considerou-se o uso de uma máquina trator com plaina niveladora de arrasto rebocável e arado de disco rebocável. Primeiramente, o resíduo é espalhado pela plaina niveladora; estimando-se 1 minuto

¹² Constância de massa. É necessário 1,15/1,04 kg de RBRO com 15% de umidade para saída de 1/1,04 de massa seca (o mesmo que 1 kg RBRO com 4% umidade).

para cada volume de caminhão basculante ($8\text{m}^3 = 12,8\text{ t}$) espalhado, têm-se aproximadamente $1,3 \times 10^{-3}$ h máquina por tonelada de resíduo.

Em um dia ensolarado, o arado de disco faz a movimentação do material para redução final de umidade. Sendo a camada de mistura média de 0,20 m (alcance do disco de arado considerado), em 100 m^2 (2 m de largura do conjunto de discos, percorrendo 50 m de comprimento), têm-se 20 m^3 de resíduo sendo misturado (aproximadamente 32 t). Considerando a velocidade de trabalho do arado de 6 km/h, para percorrer a distância de 50 m, 10 vezes durante o dia, são gastas $8,33 \times 10^{-2}$ h máquina para movimentar 32 t de material, equivalente a $2,6 \times 10^{-3}$ h máquina por tonelada. Em seguida, a pá carregadeira transfere o resíduo para um caminhão basculante. Estimando-se 40 segundos a cada volume da pá ($2\text{ m}^3 = 3,2\text{ t}$) transferido, têm-se $3,5 \times 10^{-3}$ h máquina por tonelada. Totalizando, assim, $(1,3 \times 10^{-3} + 2,6 \times 10^{-3} + 3,5 \times 10^{-3})$ $7,4 \times 10^{-3}$ h máquina / t, o mesmo que 27 s máquina / t.

Devido ao grande número de suposições utilizadas para realizar a estimativa de secagem natural, aumentando assim a incerteza da avaliação, adotou-se uma abordagem conservadora, aumentando em 50% o valor estimado de horas máquina, obtendo o valor de 40 s / t. Utilizou-se o inventário do banco de dados, equivalente a uma máquina de potência 18,64 kW a 74,57 kW com carga máxima, que possui um consumo de aproximadamente 9,2 litros diesel/ hora.

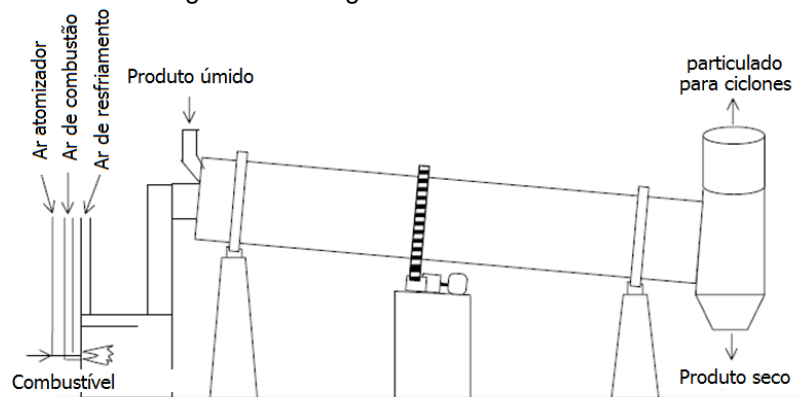
Para o processo de destorroamento, considerou-se a utilização de dois equipamentos utilizados para destorroar, triturar e homogeneizar solos, cada um com capacidade para destorroar $6\text{ m}^3/\text{h}$ (9,6 t RBRO) e com motor elétrico de 2 HP (1,5 kW) (JARFEL, 2017). Logo, o consumo específico é de 0,156 kWh/t RBRO.

3.6.3 Alternativa: Secagem artificial - Secador rotativo e tipo spray

Nesta seção serão descritas as estimativas realizadas da secagem artificial do RBRO, visando à completa remoção de umidade. Duas opções foram consideradas: secador rotativo, para RBRO seco ao ar, e secador tipo spray, para RBRO após filtro prensa. Ambos utilizando gás natural como combustível.

O secador rotativo é um tipo de secador direto, simples e econômico, empregado quando o contato direto dos gases com os sólidos não produz efeitos nocivos. A Figura 15 apresenta um diagrama simplificado deste tipo de secador, onde a secagem se dá pelo contato direto dos gases da queima do combustível com os grãos do sólido úmido. Este tipo de secador é geralmente empregado na secagem de diversos materiais, tais como: areia, pedras, minérios (utilizando-se altas temperaturas), acetato de celulose, cloreto de sódio e estireno (médias temperaturas), e grânulos de nitrato de amônio e resinas vinílicas (baixas temperaturas) (MAGDALINI; MARINOS-KOURIS; MUJUMDAR, 2014).

Figura 15 – Diagrama do secador rotativo.



Fonte: Adaptado de Magdalini, Marinos-Kouris e Mujumdar (2014)

Para o secador rotativo, o resíduo é seco após ter sido seco ao ar, logo, quantidade de água a ser evaporada é de 40 kg por tonelada de RBRO seco (4% umidade). O consumo típico de energia de um secador rotativo de capacidade de 30 a 80 kg água/h·m³ é de 4600 a 9200 kJ/kg água evaporada (MUJUMDAR, 2014). Considerando-se o valor médio de 6900 kJ/kg de água evaporada, têm-se 0,276 MJ/kg de RBRO seco. Um secador com 20 m³, considerando-se a capacidade média de 60 kg água/h·m³, seria capaz de secar 1200 kg água/h, ou cerca de 9600 kg em uma jornada de 8h diária, valor equivalente a 240 t de RBRO (seco ao ar - 4% umidade) processadas por dia.

O segundo tipo de secador considerado é o tipo spray, que utiliza atomização líquida para criar gotículas que passam por um meio gasoso quente, secando as partículas individualmente. Sua capacidade varia de alguns quilos por hora, podendo chegar até 50 toneladas. O combustível geralmente mais empregado atualmente é o gás natural.

Esse secador é geralmente empregado no processo de atomização da argila para indústria cerâmica, e também em indústrias de fertilizantes (nitratos, fosfatos) e na indústria química, em geral (FILKOVÁ; HUANG; MUJUMDAR, 2014).

Para o secador tipo spray, o resíduo deve estar numa forma considerada bombeável, então, considerou-se a secagem do resíduo diretamente após passar pelo filtro prensa. Logo, a quantidade de água a ser evaporada é de 150 kg por tonelada de RBRO seco (15% umidade). O consumo típico de energia de um secador tipo spray de capacidade de 1 a 30 kg água/h·m³ é de 4500 a 11500 kJ/kg água evaporada (MUJUMDAR, 2014). Considerando-se o valor médio de 8000 kJ/kg de água evaporada, têm-se 1,2 MJ/kg de RBRO seco. Para evaporar 38,4 toneladas de água por dia (quantidade presente em 256 t de RBRO do filtro prensa) seria necessário um secador com 160 m³ com capacidade média de 30 kg água/h·m³ em uma jornada de 8h diária.

Devido à incerteza das estimativas, além do cenário de referência (ref.) utilizado, consideraram-se os cenários pessimista e otimista. No cenário pessimista (++)25%), aumentou-se em 25%: 1) a umidade de entrada do resíduo no secador; e 2) o consumo médio de energia por kg de água evaporado. Sendo que no cenário otimista (--25%), esses valores foram reduzidos em 25%. Como fonte dos dados de segundo plano, utilizou-se fonte de calor produzida por um forno industrial a gás com potência instalada maior do que 100 kW, do banco de dados Ecoinvent. Nesse inventário, o consumo do combustível e todas as emissões da queima são consideradas.

3.6.4 Queima do RBRO – Produção do RBROTT

O RBRO de rochas graníticas apresenta alto teor de SiO₂ em sua composição química, e baixa perda ao fogo, sendo menor do que 1% em resíduos com granalha e menor do que 3,5% para resíduo proveniente de corte por fios diamantados (ULIANA *et al.*, 2015). Os materiais voláteis liberados no ensaio de perda ao fogo, normalmente consistem em alguma forma de água combinada (hidratos e hidróxidos) e dióxido de carbono proveniente de carbonatos. Logo, os baixos valores no ensaio de perda ao fogo do RBRO indicam que a queima do RBRO para produção de RBROTT não possui outras emissões significantes de gases nocivos ao meio ambiente, como dióxido de

carbono, além daquelas referentes à queima de combustíveis para o funcionamento do forno.

O consumo de energia térmica estimado para a produção de clínquer é de 4,07 MJ/kg, sendo o coque de petróleo o tipo de combustível mais utilizado (81% do total) (EPE, 2016). Já para a produção de cal virgem, o consumo é de 4,29 MJ/kg, sendo utilizados como combustíveis o coque de petróleo (30%), gás natural (20%), lenha (20%), óleo combustível (20%) e carvão (10%) (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME, 2009b). Logo, devido à similaridade do processo, optou-se, de forma conservadora, por utilizar valores similares aos dessas indústrias de consumo específico de energia térmica, sendo 4 MJ/kg de RBROTT, o valor adotado como referência. Esse valor é considerado conservador, pois para produção de 1kg clínquer e 1 kg de cal necessita-se da queima de 1,63 e 1,78 kg de matéria prima (Apêndice B), respectivamente, devido a descarbonatação - o que não ocorre com o RBRO de rocha granítica. Além disso, comparativamente às temperaturas necessárias para produção de clínquer (cerca de 1450°C), a produção de RBRO é feita a 1200°C. Para análises de sensibilidade, uma variação de 25% desse valor foi adotada, sendo estão analisados os consumos de 3, 4 e 5 MJ/kg de RBROTT.

Quanto às emissões da queima dos combustíveis no forno para queima do RBRO, utilizaram-se estimativas equivalentes às realizadas para a queima dos combustíveis do forno de clínquer. Pois, há a pretensão de futuramente utilizar este material como uma adição à farinha de cru e queimar no forno rotativo juntamente às outras matérias-primas para fabricação do clínquer. Para a moagem do RBROTT utilizou-se os valores de moagem da rocha calcária para produção do fíler calcário, considerando também como análise de sensibilidade uma variação de 25% desse valor adotado.

Na Tabela 7 apresenta-se um resumo do inventário do RBRO e RBROTT. O inventário completo é apresentado em detalhe no Apêndice B.

Tabela 7 – Resumo do inventário do RBRO e RBROTT.

Processo	Tipo do fluxo	Fluxo	Quantidade	Unidade
RBROTT (1 kg)	Materiais	RBRO (seco ao ar livre)	1,04	kg
	Energia térmica	Coque de petróleo	99,34	g
		Carvão vegetal	3,40	g
		Carvão mineral	3,39	g
		Lenha	4,52	g
		Óleo diesel	58,08	kJ
		Gás natural	0,32	dm ³
		Óleo combustível	0,22	g
	Energia elétrica	Eletricidade	0,06334	kWh
	Processamento	Embalagem	1	kg
	Emissões	Dióxido de carbono	0,370	kg
		Monóxido de carbono	0,46	g
		Óxidos de nitrogênio	2,13	g
Óxidos de enxofre		0,31	g	
Particulados		0,16	g	
	Água evaporada	0,04	dm ³	
RBRO, secador rotativo (1 kg)	Materiais	RBRO (seco ao ar livre)	1,04	kg
	Energia	Calor, gás natural	0,276	MJ
	Emissões	Água evaporada	0,04	dm ³
RBRO, secador spray (1 kg)	Materiais	RBRO, torta (filtro prensa)	1,15	kg
	Energia	Calor, gás natural	1,2	MJ
	Emissões	Água evaporada	0,15	dm ³
RBRO (seco ao ar livre) (1 kg)	Materiais	RBRO, torta (filtro prensa)	1,106	kg
	Energia	Máquina	0,04	s
		Eletricidade	0,000156	kWh
	Emissões	Água evaporada	0,106	dm ³
	Transporte	Transporte interno	1,5	kg·km
RBRO, torta (filtro prensa) (1 kg)	Materiais	RBRO, lama	1,478	kg
		Água recuperada	-0,478	dm ³
	Energia	Eletricidade	0,000592	kWh
	Solo	Ocupação de aterro evitada	-5,21E-04	m ² a

3.7 CENÁRIO DE DISTÂNCIAS DE TRANSPORTE

Nesta seção, será apresentado o cenário das distâncias de transportes dos materiais utilizado no estudo. As distâncias de transporte das matérias-primas para produção do clínquer, cimento, filer calcário e cal para o cenário do ES são apresentadas na Tabela 8. Todos os transportes são realizados via rodoviária. Para dados de segundo plano do transporte, utilizou-se o caminhão EURO3 com capacidade de 16 a 32 t do banco de dados Ecoinvent.

Para produção de cimento, considerou-se inicialmente que 2 das 3 plantas de cimento instaladas no estado (sendo que apenas uma produz o clínquer no estado), uma na

região Sul (em Cachoeiro do Itapemirim) e outra na região Central (na Grande Vitória) (Figura 16), produzissem todos os tipos de cimentos utilizados nos traços. Além disso, considerou-se que a única planta fabricante de clínquer do estado (atualmente desativada¹³ (JORNAL FATO, 2018)), localizada na região Sul, fosse utilizada como fonte do clínquer por ambas. Posteriormente, como se adotou o cenário da região Central como base para análise comparativa dos traços, utilizou-se o cimento produzido na Região Central.

Tabela 8 – Distâncias de transporte das matérias-primas para fabricação de clínquer, cimento, fíler calcário e cal.

Matéria-prima	Material fabricado	Origem	Destino	Distância (km)
Clínquer	Cimento	Cachoeiro do Itapemirim, ES	Cachoeiro do Itapemirim, ES; Grande Vitória, ES	0; 160¹
Fíler calcário	Cimento	Cachoeiro do Itapemirim, ES	Cachoeiro do Itapemirim, ES; Grande Vitória, ES	20; 170¹
Gesso	Cimento	Araripe, CE	Cachoeiro do Itapemirim, ES; Grande Vitória, ES	1860; 1700¹
EGAF	Cimento	Grande Vitória, ES	Cachoeiro do Itapemirim, ES; Grande Vitória, ES	160; 10¹
Areia	Clínquer	Itapemirim, ES (Jazida)	Cachoeiro do Itapemirim, ES	50
Calcário, bruto	Calcário, britado	Variada - Mina cativa (Jazida)	Fábrica de clínquer/ Fíler calcário/ Cal virgem	5
Argila	Clínquer	Cachoeiro do Itapemirim, ES (Jazida)	Cachoeiro do Itapemirim, ES	5
Minerais ferrosos	Clínquer	Grande Vitória, ES	Cachoeiro do Itapemirim, ES	160

Nota: ¹ As distâncias em negrito foram utilizadas para análise comparativa dos traços, sendo referentes à logística da Região Central. A outra distância informada é referente à logística para produção na Região Sul.

Para a distância de transporte do fíler calcário, utilizou-se como base a empresa visitada na elaboração do inventário (representante de mais de um quarto da produção estadual); para o gesso, utilizou-se como origem a região do Araripe (mais de 90% da produção nacional de gesso); e para a EGAF, utilizou-se o complexo industrial siderúrgico localizado na Grande Vitória. Para produção do clínquer, fíler calcário e cal, considerou-se o caso comum em que essas indústrias possuem uma mina cativa de calcário que fica localizada em suas proximidades, considerando a distância de 5

¹³ A fábrica de cimento que produz o clínquer encontra-se desativada desde dezembro de 2017.

km neste estudo. Ademais, para a areia e argila utilizadas na produção do clínquer, considerou-se uma distância de 50 km e 5 km, respectivamente.

O estado do Espírito Santo (ES) foi dividido em 3 regiões: Sul, Central e Norte (Figura 16). Para avaliação comparativa de impacto dos traços dos materiais de construção, adotou-se o cenário da região central do ES, devido a esta região apresentar o valor mediano de distância de transporte entre as três regiões definidas (Tabela 9). Ademais, nesta região se concentra a maior demanda por materiais de construção do ES, concentrando mais da metade da população do estado.

Figura 16 – Regiões do ES com a localização dos polos de beneficiamento de rochas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para produção da cal, considerou-se a empresa mais próxima, localizada no estado de Minas Gerais. Como a areia e brita são materiais abundantes no estado, o que governa o seu preço é a distância de transporte. Logo, considerou-se pouco provável que seja feito o transporte desses materiais em uma distância superior à 50 km para o cenário utilizado do ES, devido ao alto custo envolvido no transporte. Ademais, devido aos polos de beneficiamento de rochas ornamentais estarem em cidades localizadas na parte central de cada região considerada (Figura 16), adotou-se a mesma distância de transporte de 50 km para o transporte do RBRO reciclado até o ponto de uso para produção dos traços. Para o transporte do RBROTT na produção

dos traços, adotou-se como ponto de partida a fábrica de produção do clínquer, onde o RBRO também pode ser queimado no forno rotativo.

Tabela 9 – Distância de transportes dos materiais componentes dos traços.

Material	Origem	Destino	Distância máx. (km)
Cimento	Cachoeiro do Itapemirim, ES; Grande Vitória, ES	RS; RC ; RN	150; 150 ; 350
Cal	São José da Lapa - MG	RS; RC ; RN	550; 650 ; 700
RBRO, Areia, Brita e pó de pedra	Diversas	RS; RC ; RN	50; 50 ; 50
Aditivo/Superplastificante	São Paulo, SP	RS; RC ; RN	900; 1000 ; 1200
RBROTT	Cachoeiro do Itapemirim, ES	RS; RC ; RN	150; 350 ; 500

Legenda: RS = Região Sul do ES; RC = Região Central do ES; RN= Região Norte do ES.

Esses materiais componentes são então utilizados para a produção dos diferentes traços nas concreteiras, fábricas de argamassa industrializada e fábricas de blocos. Na concreteira, os materiais componentes são dosados e misturados com água, e transportados para o ponto de uso. Na fábrica de argamassa industrializada, os materiais são homogeneizados, dosados e ensacados. Em seguida, a argamassa é transportada para o ponto de uso (canteiro de obras) e misturada com água em uma argamassadeira. Na fábrica de blocos, os materiais componentes são dosados, misturados com água e moldam-se os blocos. Adotou-se o valor de 25 km para o transporte do concreto, argamassa e blocos até o ponto de uso dos mesmos, encerrando a fronteira berço-ao-portão.

Para avaliar a sensibilidade do impacto do transporte, realizou-se uma análise comparativa do RBRO e RBROTT em comparação a outros materiais. Determinou-se a distância adicional limite de transporte do RBRO em comparação com areia, pó de pedra e fíler calcário, bem como a distância adicional limite do RBROTT em comparação com cimentos. Para tal, considerou-se 3 indicadores de impacto (AG, EI e IT), onde a distância do RBRO e RBROTT variam e a distância dos materiais de comparação se mantém constante igual a zero. Sendo assim, o ponto de encontro das retas determina a distância adicional limite de transporte do RBRO e RBROTT para o indicador analisado.

3.8 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DOS TRAÇOS

Nesta seção serão apresentados os ICV do processo de fabricação dos traços de argamassas, concretos e blocos. Os traços utilizados apresentam os componentes em unidade de massa para produção de 1 m³ dos traços. Logo, o inventário de produção dos traços é apresentado para unidade de volume de 1 m³. Para a transformação da unidade do transporte final, utilizaram-se os valores de densidade dos materiais de 2,4 t/m³ para traços de concreto e blocos, e de 1,7 para a argamassa industrializada seca (água adicionada no canteiro de obras, sendo a densidade média final de 2,2 t/m³ para argamassas). Assim, têm-se para a distância de 25 km, um momento de transporte de 60 t·km para os traços de concreto e blocos, e de 42,5 km para os traços de argamassa.

3.8.1 Argamassas

Para o inventário processo de produção dos traços de argamassas, considerou-se que a mistura seca dos componentes do traço é produzida industrialmente e ensacada para venda. Após chegar ao canteiro de obras, a argamassa é então misturada com água em uma argamassadeira, e utilizada para a finalidade em questão. Para a produção da argamassa industrializada, coletaram-se dados de primeira mão da Provale, localizada no ES, e para a mistura em canteiro utilizou-se dados de uma argamassadeira comercial.

O processo de produção da argamassa industrializada utiliza um sistema automatizado de dosagem e mistura dos componentes da argamassa seca. Esses componentes são dosados de acordo com o traço programado no equipamento. Em seguida, a caçamba com os materiais dosados é içada, e lança os componentes no misturador. Então, o operador do equipamento encaixa o saco plástico no duto de saída e pressiona o botão para enchimento do saco. Os sacos são então empilhados em pallets e revolvidos por um filme plástico, e estão prontos para o transporte para o mercado. Alternativamente, a argamassa seca pode ser vertida em caminhão para transporte a granel, diretamente depois de passar pelo misturador.

Para estimar-se o consumo energético, utilizou-se a potência dos motores e a produção do equipamento, pois a Provale não possuía dados específicos de consumo

energético e de produção mensal para a produção da argamassa. A potência total instalada dos 7 motores do dosador, misturador e ensacadora é de 39 kW. O processo de dosagem e mistura leva em torno de 3 min 30 s para produzir 400 kg de argamassa industrializada. Sendo assim, a capacidade horária de produção é de 6,857 t/h. Considerando-se que os motores estão funcionando 70% do tempo total do processo de produção, têm-se o consumo de 27,3 kWh. Logo, o consumo de energia elétrica estimado para a argamassa é de 3,981 kWh/t. De maneira similar, a partir do estudo espanhol de ICV de Cuenca-Moyano *et al.* (2017) sobre produção de argamassas industrializadas, obtém-se um consumo de eletricidade de aproximadamente 4 kWh/t, para um sistema de potência instalada de 95 kW. Para transformar o consumo em massa por consumo em volume do traço, considerou-se 1,7 t/m³ o valor da massa unitária da argamassa industrializada (valor médio aproximado de materiais secos dos traços de argamassa dos artigos analisados). Sendo assim, obtém-se o consumo de 6,768 kWh/m³ de argamassa.

Para a aplicação da argamassa, a mistura da argamassa industrializada com água é realizada em um argamassadeira. Considerou-se uma argamassadeira com capacidade de mistura de 45 l/min (2,7 m³/h), e cuba com 200 kg de capacidade (20 sacos). A potência instalada do equipamento é de 1,71 kW (CSM, 2018). Sendo assim, o consumo de energia elétrica para a mistura da argamassa é de 0,633 kWh/m³.

3.8.2 Concretos

Considerou-se que todos os traços de concretos fossem produzidos em central dosadora. Para o consumo de energia da central de concreto, também não foi encontrada disponibilidade de inventário de ciclo de vida representativo brasileiro. Logo, utilizou-se o estudo de Bushi, Finlayson e Meil (2014), onde o concreto produzido nos EUA foi analisado através de dados da associação americana *National Ready Mixed Concrete Association* (NRMCA). Utilizou-se esse relatório devido a ser um estudo mais atual e completo do que o do banco de dados. O valor relatado de consumo de eletricidade para operação da concreteira foi de 3,86 kWh/yd³ (5,05 kWh/m³) de concreto produzido¹⁴. Outros combustíveis, como diesel para transporte

¹⁴ 1 jarda cúbica (yd³) = 0,765 metros cúbicos (m³)

interno na central dosadora de concreto, são utilizados. Relatou-se o valor total de diesel consumido de 0,371 galões/yd³ (1,836 l/m³) de concreto.

Contudo, o estudo de Marceau, Nisbet e Vangeem (2007), onde também concreteiras da associação americana NRMCA foram analisadas, relatou-se que aproximadamente 40% (15,7% de 39,3%) do diesel consumido são utilizados para transporte interno. Sendo o restante utilizado para aquecimento de água e calefação das edificações, ocorrência não presente no cenário brasileiro. Sendo assim, a quantidade de diesel para movimentação interna utilizada é de 0,148 galões/yd³ de concreto (0,734 l/m³ = 27,73 MJ/m³).

3.8.3 Blocos

Para o inventário do processo de produção dos blocos de pavimentação e vedação, usou-se consumo energético do estudo brasileiro de Evangelista, Rosado e Penteado (2018), que analisou a produção de blocos de pavimentação. Foi declarado o valor de 1,46 kWh por m² de pavimentação, possuindo uma espessura de 10 cm. Sendo assim, o consumo energético da produção dos blocos é de 14,6 kWh/m³ de blocos. Os dados foram coletados em visita técnica à empresa localizada na região sudeste em 2016, com capacidade de produção de 81500 blocos por dia. Considerou-se a energia consumida nas etapas de armazenamento dos materiais componentes, dosagem, correias transportadoras, misturador, moldagem dos blocos e armazenamento. A energia consumida em etapa de cura dos blocos não foi considerada, pois normalmente é realizada ao ar livre.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

"It might be truly said, that now I worked for my bread. I believe few people have thought much upon the strange multitude of little things necessary in the providing, producing, curing, dressing, making, and finishing this one article of bread."

Robinson Crusoe,

Em *"The Life and Adventures of Robinson Crusoe"* (1719), de Daniel Defoe

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, por razões didáticas e de estruturação da dissertação, incorpora-se as seguintes etapas da metodologia de ACV: c) avaliação de impacto do ciclo de vida; e d) interpretação. Essas etapas nada mais são do que os resultados e discussões da aplicação da metodologia.

Cabe salientar que a organização do capítulo está desenvolvida buscando-se responder as questões da pesquisa realizadas no subtópico 1.2, a saber:

- I. É viável secar o RBRO artificialmente?
- II. Até onde é viável transportar o RBRO?
- III. É justificável a queima do RBRO?
- IV. Qual a influência do teor de RBRO e RBROTT para a redução dos indicadores de impacto ambiental dos traços dos materiais onde é incorporado?
- V. Sendo o cimento a matéria-prima preferível para substituição nos traços, qual a redução média dos indicadores de impacto ambiental de sua substituição por RBRO?

4.1 É VIÁVEL SECAR O RBRO ARTIFICIALMENTE?

Uma das questões levantadas sobre a reciclagem do RBRO é referente à viabilidade de realizar um processo de secagem mais avançado, por meio de um processo industrial utilizando secadores. Nota-se na Tabela 10 que a secagem natural ao ar livre, por utilizar apenas energia para movimentação do material e destorroamento, se apresentou como a solução menos impactante. Qualquer tipo de secagem artificial do RBRO por secadores implica em um grande aumento do impacto ambiental do mesmo.

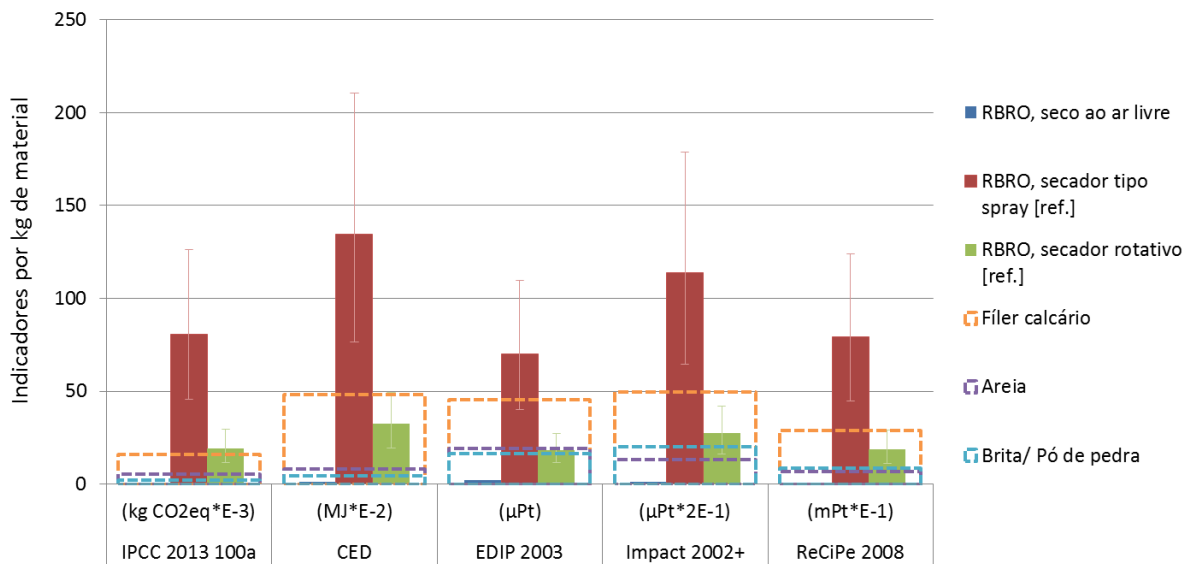
A solução de secagem com secador tipo spray se mostrou a menos eficiente ambientalmente devido ao seu grande consumo energético; onde o RBRO é seco diretamente após passar pelo filtro prensa, o que requer uma enorme quantidade de energia para reduzir a grande quantidade de umidade do material (aproximadamente 15%) (Tabela 10; Figura 17). Nota-se que no cenário mais otimista (--25%) e

utilizando-se o secador rotativo (menos impactante que o tipo spray, devido a secar o resíduo após o filtro prensa), o impacto da secagem artificial equivaleria de 5,8 vezes (uPt - EDIP) a 16,4 vezes (kg CO₂ eq. - IPCC) o valor da opção de secagem ao ar livre.

Tabela 10 – Impacto das opções de secagem do RBRO

RBRO (1 kg)	IPCC	CED	EDIP	Impact	ReCiPe
	2013		2003	2002+	2008
	kg CO ₂ eq	MJ	μPt	μPt	mPt
Seco ao ar livre	0,0007	0,014	1,8	0,2	0,1
Secador spray [ref.]	0,0806	1,345	65,1	22,8	7,9
Secador spray [++25%]	0,1262	2,105	101,8	35,7	12,4
Secador spray [--25%]	0,0457	0,764	37,0	12,9	4,5
Secador rotativo [ref.]	0,0192	0,323	16,8	5,5	1,9
Secador rotativo [++25%]	0,0296	0,495	25,1	8,4	2,9
Secador rotativo [--25%]	0,0115	0,193	10,5	3,3	1,1

Figura 17 – Opções de secagem RBRO: Comparação com fíler, areia e pó de pedra



Na Figura 17, comparando-se o RBRO com fíler, areia e pó de pedra, observa-se que o RBRO que utiliza o método de secagem por spray apresenta o maior impacto ambiental entre todos os materiais. A barra de variação das opções de secagem representa os cenários pessimista e otimista (++25%; --25%). O RBRO seco no

secador rotativo se apresenta competitivo em relação ao fíler calcário, apresentando um impacto análogo de aquecimento global (AG - kg CO₂ eq.), e um menor impacto para os outros indicadores. Isso se deve principalmente ao impacto do processo de cominuição da rocha calcária, para transformar uma rocha bruta em um fíler. Como o RBRO já é um pó fino se faz necessário apenas sua secagem para transformá-lo de volta em um fíler.

Além disso, analisando-se os indicadores de impacto total (IT - Pt) dos métodos EDIP e Impact2002+, o RBRO seco apresenta um impacto similar à areia e ao pó de pedra; porém um impacto maior considerando os indicadores de AG, energia incorporada (EI - MJ) e IT pelo método ReCiPe. Então, apesar da secagem do RBRO por um secador rotativo aumentar significativamente o impacto da reciclagem do resíduo, esta pode ser ainda uma solução interessante. Principalmente em relação ao fíler calcário, devido à economia da extração de matérias-primas e o consumo energético envolvido para a produção. Os resultados em valores absolutos dos materiais e do RBRO podem ser vistos no Apêndice D.

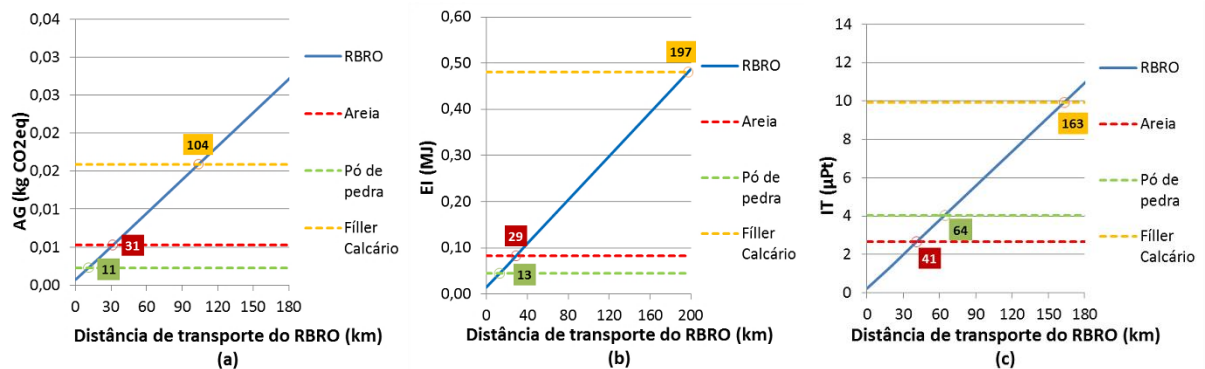
4.2 ATÉ ONDE É VIÁVEL TRANSPORTAR O RBRO?

Devido à contribuição relevante do transporte para o impacto ambiental de materiais de construção civil, é necessário saber a distância de transporte que ainda viabilize o uso do RBRO. Sendo assim, procurou-se a 'distância adicional limite de transporte' para o RBRO ($D_{i,RBRO}$) a partir dos 3 indicadores de impacto analisados (AG, EI e IT), sendo definida neste estudo como a distância que iguala o impacto do RBRO transportado com o impacto do material convencional comparado (fíler, areia, pó de pedra) sem o impacto de seu transporte final. Ou seja, é a distância limite para a qual o impacto do RBRO ainda permanece inferior ao impacto de produção do material comparado. Todos os outros parâmetros são mantidos constantes, e varia-se apenas a distância de transporte do RBRO. Este tipo de análise já tem sido utilizado por outros autores em estudos de ACV para avaliar a distância limite de transporte de agregados naturais e reciclados (ROSADO *et al.*, 2017; MARINKOVIĆ *et al.*, 2010).

Na Figura 18 apresentam-se os resultados por kg de material e têm-se as distâncias de transporte adicionais limites para o RBRO. Nessa análise, o ponto de encontro das

retas é a distância adicional limite ($D_{l, RBRO}$). Comparativamente com o pó de pedra, areia e filer calcário, os valores dessas distâncias são 11, 31 e 104 km, respectivamente, para o indicador de AG (Figura 18a). Já para o indicador de EI, as distâncias adicionais limites, comparando-se aos mesmos materiais, são 13, 29 e 197 km, respectivamente (Figura 18b). Já se utilizando o indicador de IT, pelo método Impact2002+, os valores limites apresentam um crescimento para a areia e pó de pedra. A distância limite para transporte do RBRO é de 64, 41 e 163 km, respectivamente, comparativamente ao pó de pedra, areia e filer calcário (Figura 18c).

Figura 18 – Distância adicional limite para RBRO ($D_{l, RBRO}$) – Comparação com pó de pedra, areia e filer calcário. Indicadores por kg de material. a) indicador de AG; b) EI; c) IT.



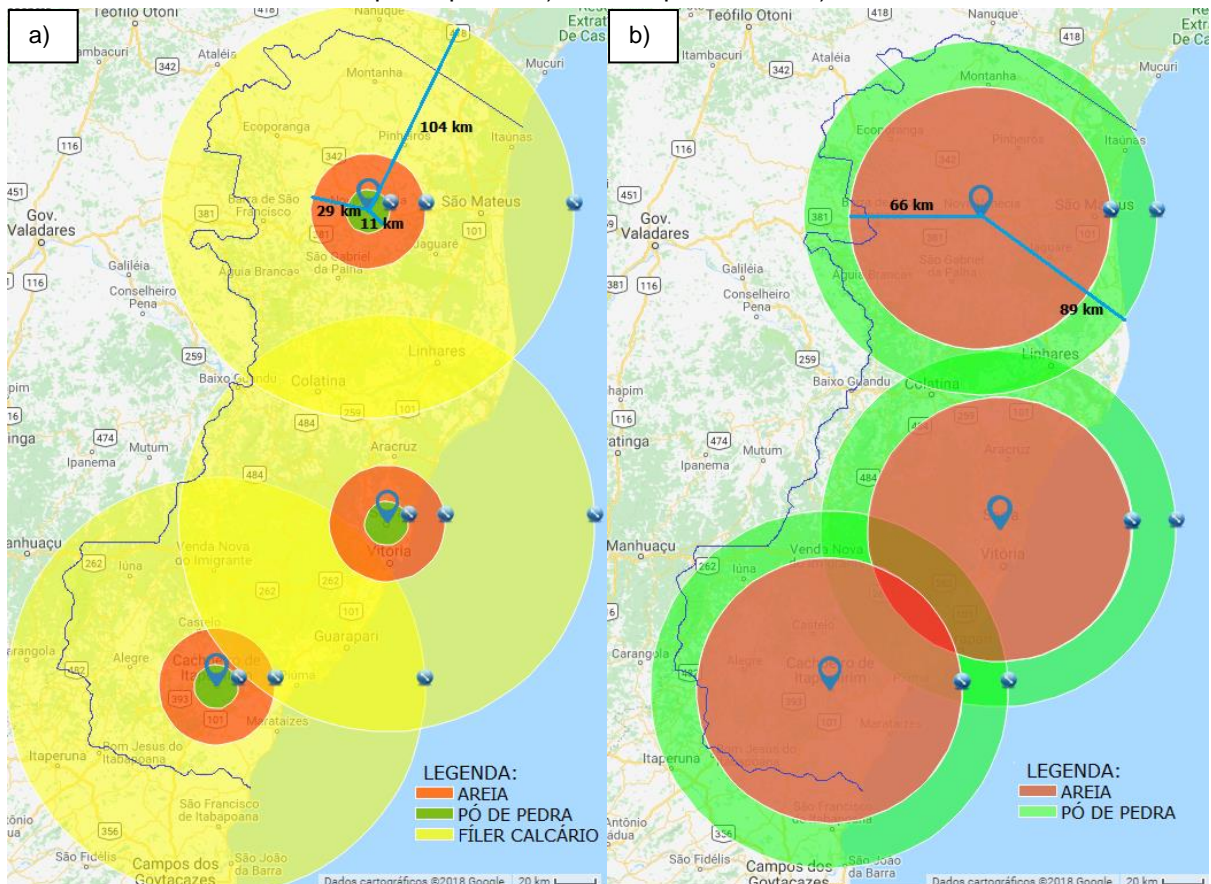
Sendo assim, qualquer distância de transporte do RBRO que seja menor que a do material convencional comparado mais a distância adicional limite, o indicador de impacto para o RBRO será menor. Logo, para tornar viável a utilização do RBRO em comparação a um material convencional, a Equação 1 deve ser respeitada:

$$D_{RBRO} \leq D_{l, RBRO} + D_{MC} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde: D_{RBRO} = Distância de transporte do RBRO (km); $D_{l, RBRO}$ = Distância adicional limite do RBRO (km); D_{MC} = Distância do material convencional comparado (km).

Para facilitar a visualização dessa análise, apresenta-se o mapa do ES, com os raios de distância de transporte do RBRO (D_{RBRO}) considerando dois cenários: otimista e pessimista (Figura 19). Ademais, considerou-se que as 3 regiões do ES definidas anteriormente na Figura 16 (região Sul, Central e Norte), possuem como o ponto de partida as cidades de Cachoeiro do Itapemirim, Serra e Nova Venécia, respectivamente.

Figura 19 – Raios de distância onde RBRO apresenta menor impacto em comparação com fíler calcário, areia e pó de pedra. a) Cenário pessimista. b) Cenário otimista.



Fonte: Elaborado pelo autor; Google Maps.

No cenário pessimista para o RBRO (Figura 19a), o raio de distância representa o menor valor de distância adicional limite ($D_{i,RBRO}$) da Figura 18, dentre os 3 indicadores, sendo de 104 km para o fíler, 29 km para a areia e 11 km para pó de pedra, e a distância do material comparado (D_{MC}) é considerada igual a 0 km. Já no cenário otimista (Figura 19b), o raio de distância representa o somatório do maior valor da distância adicional limite ($D_{i,RBRO}$) dentre os 3 indicadores (197 km para o fíler, 41 km para a areia e 64 km pra o pó de pedra) com 25 km de transporte para o material comparado (D_{MC}), totalizando 222 km para o fíler, 66 km para a areia e 89 km para o pó de pedra. Não é representado o fíler calcário no mapa do cenário otimista (Figura 19b), devido ao RBRO já se apresentar bastante competitivo, extrapolando os limites do mapa. Ademais, o valor de 25 km de transporte (D_{MC}) utilizado para o transporte da areia e pó de pedra (Figura 19b) pode ainda ser considerado conservador, pois estes materiais normalmente se encontram mais distantes do ponto de uso em muitos casos. Como exemplo, na Figura 19b, se para uma determinada aplicação a areia

está a 25 km de distância e o RBRO está a 66 km (limite do raio em vermelho), o RBRO e a areia possuem impacto equivalente, e para qualquer valor dentro do raio, o RBRO possui impacto menor.

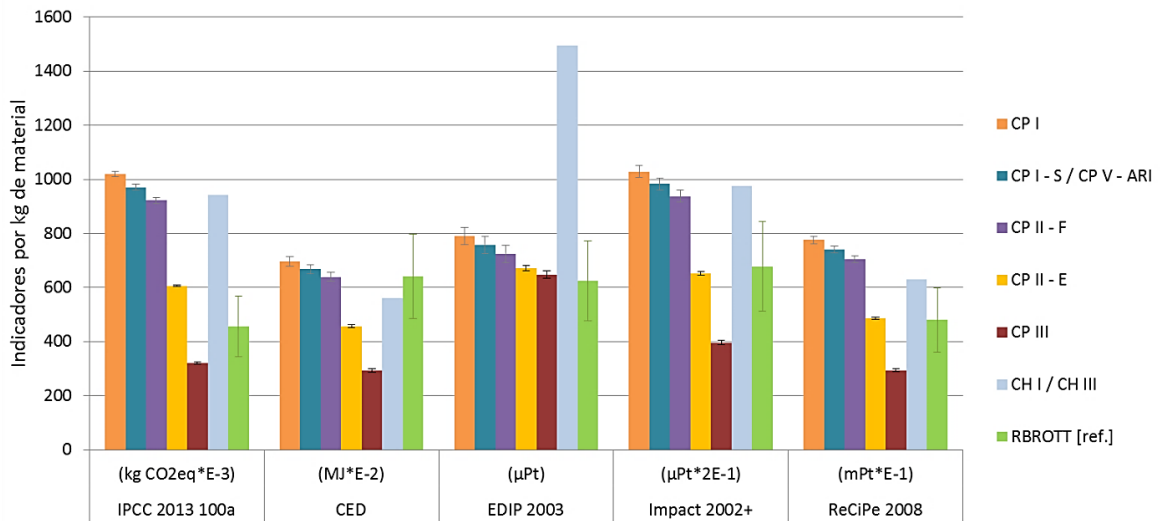
Ademais, nota-se na Figura 19b uma grande abrangência de transporte para o RBRO em cada uma das CTR's localizadas em cada polo de beneficiamento do ES, tornando o RBRO competitivo ambientalmente em relação aos materiais convencionais. Logo, o RBRO apresenta-se como uma ótima alternativa para redução de impacto ambiental dentro do estado do ES, seja substituindo um material com maior impacto incorporado, como o fíler calcário, ou até mesmo a areia e o pó de pedra, que possuem menores valores de impacto incorporado.

4.3 É JUSTIFICÁVEL A QUEIMA DO RBRO?

O RBROTT se apresenta como um material de característica vítrea, possivelmente pozolânico, e com potencial de ser utilizado em combinação com o cimento (DEGEN, 2017; MITTRI, 2016; ULIANA *et al.*, 2015) e para a fabricação de cimentos compostos (RODRIGUES, 2018). Nos traços de argamassa e concreto com RBROTT analisados, realizou-se a substituição ou adição ao cimento. Logo, uma comparação do processo de fabricação do RBROTT em relação a outros tipos de cimentos é devida (Figura 20), apesar de reservar-se cautela nesta comparação, pois os materiais apresentarem propriedades diferentes.

A Figura 20 traz os resultados por kg de material e apresenta os indicadores de impacto de produção do RBROTT (sem o transporte final para o uso), comparado ao impacto de produção dos diferentes tipos de cimento e cal. O impacto do cimento é representado pelo impacto médio de cada tipo de cimento nos dois cenários de produção de cimento considerados (Região Sul e Central). Enquanto que a barra de variação do RBROTT apresenta a variação devido às alterações no consumo energético do forno para a queima do RBRO (cenários de 3, 4 e 5 MJ/kg considerados). Vale ressaltar que o RBROTT foi até o presente momento apenas fabricado em escala laboratorial. Logo, seu impacto aqui calculado para uma produção industrial está condicionado às estimativas que foram realizadas, onde o cenário de produção industrial do clínquer foi tomado como base.

Figura 20 – Comparação do RBROTT com cimentos e cal

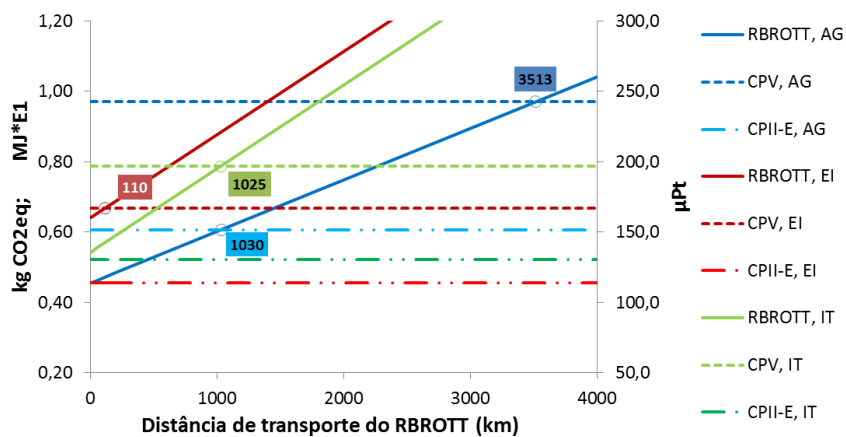


Na Figura 20, nota-se que, comparativamente à cal e aos diferentes tipos de cimento, o RBROTT apresenta um menor impacto que os cimentos com maior percentual de clínquer (CP I, CP I-S / CPV, CP II-F) para os 5 indicadores analisados, e um impacto menor que a cal para 4 indicadores. Dentre os materiais analisados, o cimento CP III apresentou-se como o mais eficiente ambientalmente em 4 indicadores. Para um indicador de impacto total (uPt-EDIP), o impacto do RBROTT se apresenta inferior dentre os materiais apresentados. De uma forma geral, com bases nos indicadores analisados, o impacto ambiental do RBROTT apresenta-se análogo com o do cimento CP II-E, que apresenta até 34% de escória em sua composição. Apesar do impacto de energia incorporada (em MJ) ser significativamente superior ao do CP II-E, para os outros indicadores analisados, o RBROTT possui impacto similar ou inferior a este tipo de cimento. Vale salientar que esta análise comparativa do RBROTT com cimentos, não deve ser tomada como medida direta, pois os materiais possuem propriedades diferentes, ela é cabível apenas pela possibilidade de utilizar o RBROTT como adição/substituição do cimento em pequenas quantidades. Os resultados em valores absolutos dos cimentos e do RBROTT podem ser vistos no Apêndice D.

Também se faz necessário conhecer a distância limite de transporte que viabilize o uso do RBROTT ($D_{I,RBROTT}$), uma análise similar à apresentada anteriormente na Figura 18 para o RBRO. Na Figura 21 observam-se os três indicadores de impacto dos cimentos CP V e CP II-E (valor médio dos cenários de produção de cimento), comparativamente com o impacto do RBROTT somado ao impacto do seu transporte.

Os valores em km, onde ocorre a interseção das retas, são as distâncias limites de transporte do RBROTT ($D_{I,RBROTT}$), onde os indicadores de impacto ambiental do mesmo se tornam equivalentes aos dos cimentos. Como o indicador de EI do cimento CP II-E é inferior ao do RBROTT, não haverá uma distância adicional limite que viabilize o transporte do RBROTT para uso como adição/substituição em comparação direta com esse tipo de cimento, pois ele já impacta menos que o RBROTT nessa categoria. Para o indicador de IT também não há encontro das retas; contudo, os valores são bem próximos. Logo, o ideal é que RBROTT possua um transporte inferior ao do CP II-E para se apresentar como uma adição/substituição viável do mesmo para redução de impacto. Já a distância limite para o indicador de AG é de 1030 km.

Figura 21 – Distância adicional limite para RBROTT ($D_{I,RBROTT}$) – Comparação com cimentos CP V e CP II-E. Indicadores por kg de material.



Em relação ao CP V, o uso do RBROTT como adição/substituição pode apresentar-se como viável ambientalmente. A distância adicional limite de transporte é de 110 km, considerando o indicador de energia incorporada, podendo alcançar até 3513 km, considerando-se o indicador de aquecimento global. Tomando por exemplo um cenário onde o RBROTT está a 400 km de distância do ponto de uso, e o cimento CP V está a 300 km de distância, a diferença de distância sendo de 100 km (menor do que 110) apresenta o RBROTT como uma solução de adição/substituição ambientalmente favorável. Não obstante, uma análise mais aprofundada considerando a influência do RBROTT na utilização dos traços dos materiais se faz necessária. Pois nessa análise direta, não se leva em consideração as características dos materiais comparados, bem como sua influência sobre as propriedades mecânicas dos materiais (argamassas, concretos) nos quais são utilizados.

4.4 QUAL A INFLUÊNCIA DO TEOR DE RBRO E RBROTT PARA A REDUÇÃO DOS INDICADORES DE IMPACTO AMBIENTAL DOS TRAÇOS?

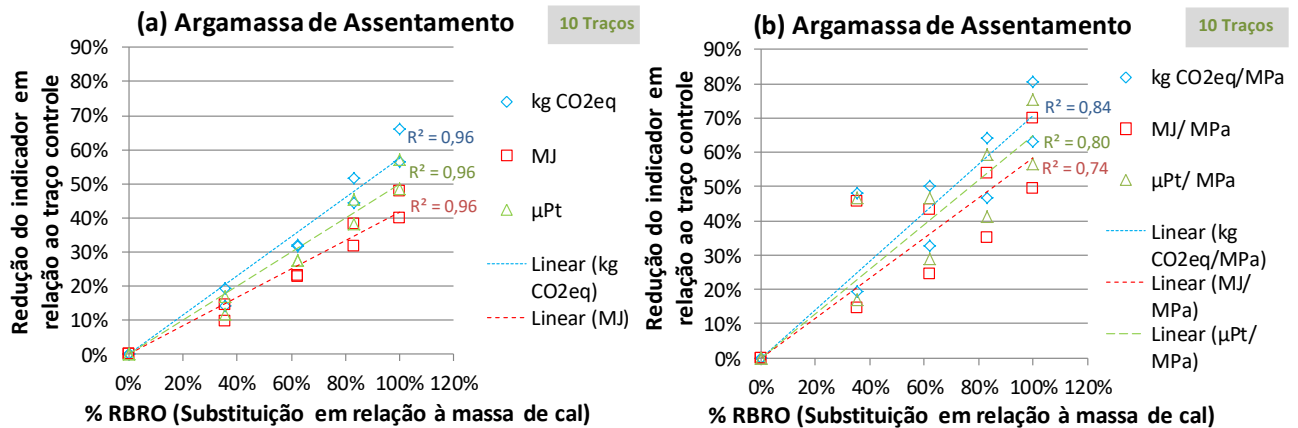
A ACV é uma ferramenta de auxílio à decisão e seus impactos estimados são potenciais, e não absolutos. Logo, uma análise comparativa dos traços foi realizada, relacionando a influência dos percentuais de RBRO/RBROTT na redução dos indicadores de impacto dos traços. Os três indicadores selecionados foram AG, EI, e IT. Em outra análise, esses indicadores foram divididos pela resistência à compressão axial (f_c) do traço, sendo chamados de 'intensidade dos indicadores'. Representando assim, os indicadores de impacto para 1 MPa do traço.

Os gráficos apresentados nas figuras foram elaborados utilizando-se o Excel (MICROSOFT CORPORATION, 2010). Nas figuras, no eixo y, os resultados são apresentados em percentual de redução (%) relativo ao traço controle definido pelo estudo (apresentados no Apêndice A). Utilizou-se o(s) traço(s) controle(s) definido(s) em cada estudo, sendo este(s) geralmente com 0% RBRO. Um estudo não apresentou tal traço controle (0% RBRO), utilizou-se então como traço controle aquele com menor percentual de RBRO. Houve um estudo onde se apresentou apenas um traço; logo, não houve análise comparativa de redução de impacto do traço referente a um controle. Não obstante, todos os resultados da análise de impacto dos traços em valores absolutos estão presentes no Apêndice D.

4.4.1 Argamassa de assentamento

Nos traços de argamassa de assentamento, a porcentagem de substituição da cal pelo RBRO causa uma redução significativa dos indicadores. Na Figura 22a, tem-se que a substituição total da cal do traço pelo RBRO, provoca um decréscimo médio de 58, 42 e 50%, para os indicadores de AQ, EI e IT, respectivamente. Essa influência se deve à grande representatividade da cal no impacto integral do traço.

Figura 22 – Argamassa de assentamento – Substituição da cal. (a) Indicadores (b) Intensidade dos indicadores.

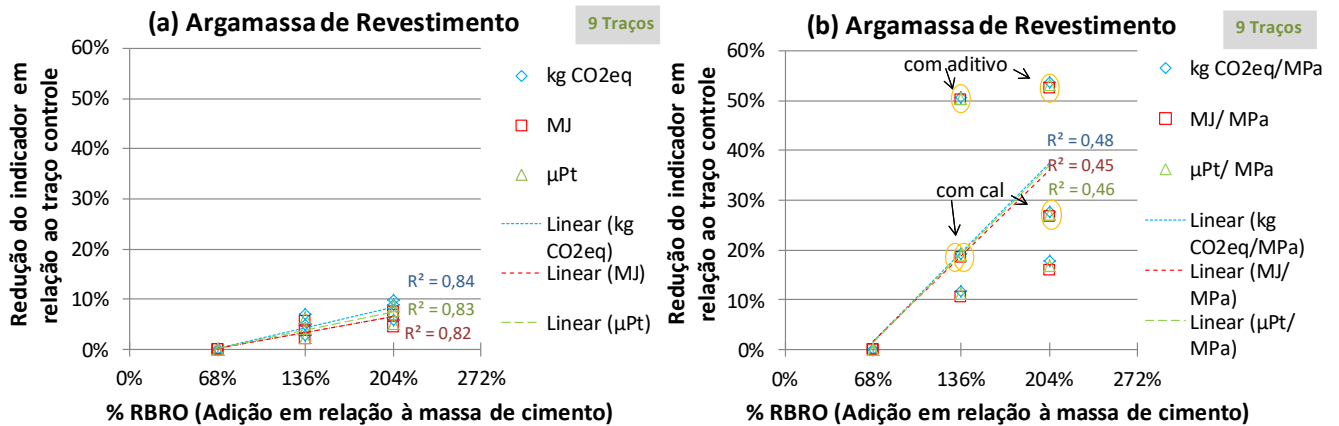


Nos traços controle analisados (sem RBRO), a cal representou de 54 a 67% do impacto de AQ do traço, 38 a 50% da EI e 46 a 59% do IT. Considerando a intensidade dos indicadores de impacto (dividindo cada indicador pelo f_c), temos uma redução ainda maior, como apresentado na Figura 22b. A substituição total da cal do traço pelo RBRO provoca uma redução média de 71, 58 e 65%, para os indicadores de AQ, EI e IT, respectivamente. Isso se deve ao fato de que substituição da cal por RBRO, além de diminuir o impacto, contribui para o aumento da resistência à compressão axial.

4.4.2 Argamassa de revestimento

Na Figura 23a, apresentam-se os resultados de redução de impacto dos traços de argamassa de revestimento. No estudo em questão, não havia um traço controle sem RBRO, sendo então utilizados como traços de referência para realizar a comparação, aqueles com menor percentual de adição de RBRO em relação à massa de cimento (68% RBRO). Além disso, adições de aditivo e de cal foram realizadas separadamente, para uma mesma porcentagem de RBRO. Nota-se que com o aumento da adição ao cimento, obtém-se um avanço na redução dos indicadores de impacto. As maiores reduções em relação ao respectivo traço controle são notadas para os traços sem cal ou aditivo, onde de 5,7 a 7,1% e de 7,6 a 9,8% de redução é notado para 136 e 204% de adição de RBRO, respectivamente, em relação ao traço com 68% RBRO.

Figura 23 – Argamassa de revestimento – Adição ao cimento. (a) Indicadores (b) Intensidade dos indicadores.



Contudo, devido à redução do consumo de cimento, os traços com aditivo são os que apresentam os menores valores absolutos dos indicadores. Sendo que o traço controle com aditivo apresenta uma redução de 8,3 a 9,3% dos indicadores comparado ao traço controle sem aditivo (Apêndice D). Para os traços onde houve a adição de cal, os indicadores de impacto dos traços sofreram menores reduções com aumento de RBRO, observando-se 2,1 a 2,9% e 4,5 a 5,9% de redução para 136 e 204% de adição de RBRO, respectivamente, em relação ao traço com 68% RBRO.

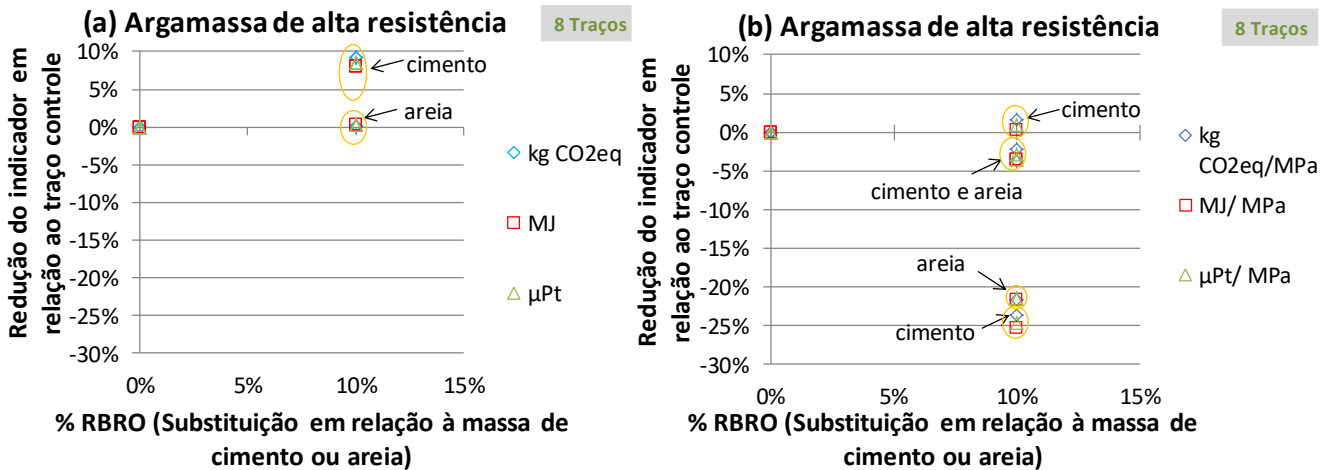
Na Figura 23b, considera-se a resistência à compressão axial como um balizador dos indicadores. Nota-se nos traços com aditivo a maior redução da intensidade dos indicadores devido ao ganho de f_c com maiores teores de adição de RBRO. Ademais, nos traços sem adição de aditivos e de cal, o aumento da redução da intensidade é de até 11,8% para 136% RBRO, atingindo até 17,8% com 204% de adição do RBRO, quando comparado ao traço controle (com 68% de adição de RBRO). Apesar de apresentar os menores percentuais de redução em relação ao controle, os traços sem aditivo e sem cal apresentaram os menores valores absolutos de intensidade dos indicadores (Apêndice D).

4.4.3 Argamassa de alta resistência

Na Figura 24a, observa-se a influência da substituição de 10% de cimento ou areia por RBRO em traços de argamassas de alta resistência (f_c de 28 a 54 MPa). Nota-se que a substituição de 10% da areia por RBRO causa uma baixa redução (de 0,1 a

0,3%) nos indicadores, enquanto a substituição de 10% do cimento causou uma redução de 8,0 a 9,2% dos indicadores analisados.

Figura 24 – Argamassa de alta resistência – Substituição do cimento ou areia. (a) Indicadores (b) Intensidade dos indicadores.



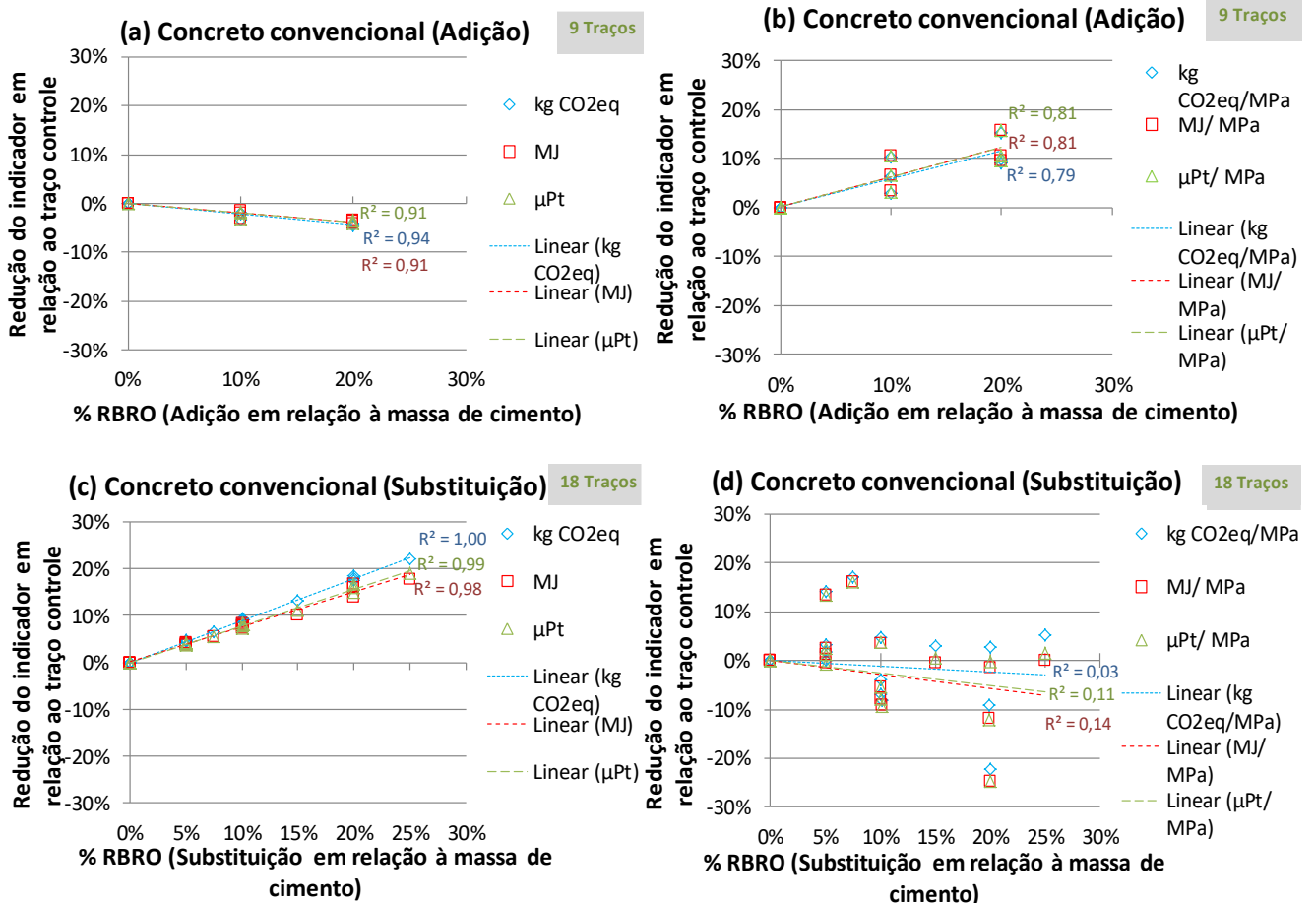
Na Figura 24b, considerando-se também a resistência à compressão axial nos indicadores, nota-se que não há um comportamento previsível de redução da intensidade dos indicadores de impacto com relação à porcentagem de RBRO. Para um estudo, a substituição de 10% de cimento por RBRO ocasionou uma redução de até 1,6% em relação ao controle, enquanto para os traços de outro estudo, houve um aumento de até 25,4% da intensidade dos indicadores (valor negativo no eixo y). Além disso, a substituição de 10% de areia também ocasionou até 21,7% de aumento da intensidade dos indicadores, devido à baixa contribuição dessa substituição em reduzir o impacto total do traço, e em favorecer a perda de resistência do material.

Conclui-se que para a argamassa de alta resistência, a substituição de cimento por RBRO apresenta-se como melhor alternativa, desde que a perda de resistência à compressão axial não seja muito significativa. O valor máximo ideal de perda de resistência não deve ser maior do que 9%, a redução de impacto máxima notada na Figura 24a, para não causar um aumento na intensidade dos indicadores (Figura 24b). Além disso, os traços que apresentaram os menos valores absolutos de intensidade dos indicadores são devidos ao uso de aditivo superplastificante, onde o consumo de água diminui, diminuindo a relação a/c, e, por consequência, aumentando a resistência à compressão axial (Apêndice D).

4.4.4 Concreto convencional

Na Figura 25a, nota-se que para o aumento de adição de RBRO em relação à massa de cimento, um aumento de impacto é associado (um valor negativo de redução no eixo y representa um aumento). Observa-se até 4,7% de aumento com 20% de RBRO, e um valor máximo de 3,4% de aumento para 10% de adição. Isso é devido ao fato de que, ao realizar-se a adição de RBRO, ocorreu também um pequeno aumento no consumo de cimento (Apêndice A). Com 10% de RBRO, o aumento de consumo de cimento foi de cerca de até 3,7%, chegando a até 5,2% para 20% de adição de RBRO.

Figura 25 – Concreto convencional – Adição e substituição ao cimento. (a) Indicadores - adição (b) Intensidade dos indicadores - adição. (c) Indicadores - substituição (d) Intensidade dos indicadores - substituição.



Contudo, já na Figura 25b, um efeito oposto é observado. O aumento de adição de RBRO associa-se com uma redução significativa da intensidade dos indicadores, sendo uma média aproximada de 6% de redução para 10% de RBRO, e de 12% para 20% de RBRO. Isso deve-se ao estilo de dosagem adotado, onde o aumento do

consumo de cimento combinado à adição do RBRO aprimorou as propriedades mecânicas do concreto. Esta análise demonstra que apesar de um pequeno aumento do impacto por volume do traço (m^3) da adição, uma redução pôde ser obtida no impacto por f_c do traço.

Na Figura 25c nota-se que com o aumento da porcentagem de substituição do cimento por RBRO, ocorre uma redução dos indicadores de impacto. Com 25% de substituição, ocorre uma redução de 18 a 22% dos indicadores. Uma boa correlação linear entre o percentual de RBRO e a redução dos 3 indicadores é notada dentre os 18 traços de 3 estudos diferentes. Sendo que a cada 10% de substituição do cimento por RBRO acarretam em uma redução de 8,9%, 7,4% e 7,8 % dos indicadores de AG, EI e IT, respectivamente.

Entretanto, como se observa na Figura 25d, considerando-se a resistência do material, a relação do percentual de substituição com a redução dos indicadores muda, e um padrão linear não é observado. Os percentuais de substituição de 5 e 8% apresentam os melhores resultados, com uma redução máxima dos indicadores de 14 e 17%, respectivamente, devido à baixa redução de resistência mecânica com esses teores de substituição. Sendo que a substituição de 20% apresentou o pior resultado, com um aumento de até 24% da intensidade dos indicadores, devido à redução do f_c . Não obstante, para uma substituição de 25% de RBRO, uma redução de 0,7 a 5,7% ainda pôde ser obtida. Essa variação deve-se aos diferentes resultados de resistência à compressão axial dos estudos, que adotaram diferentes tipos de cimento e diferentes tipos de dosagem. Quando a redução do f_c é maior do que a redução de impacto observada para os indicadores, um aumento da intensidade dos indicadores de impacto é obtido.

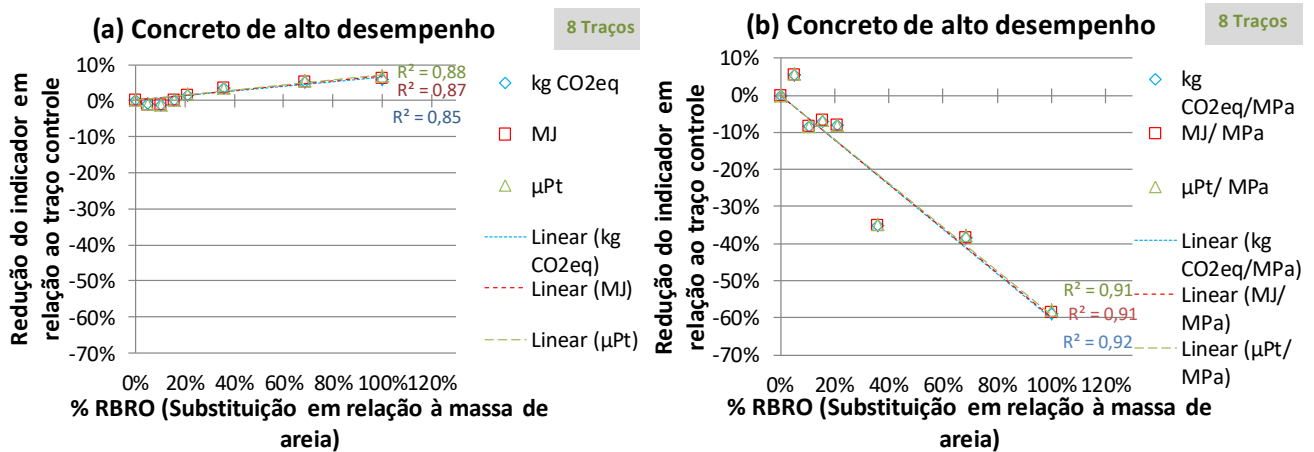
Conclui-se que, em traços de concreto convencional, o uso de RBRO como adição é apropriado de um ponto de vista ambiental se o consumo de cimento não for superior à de um traço equivalente, sem RBRO. Já os menores valores absolutos de intensidade dos indicadores impacto são obtidos para os traços onde se realiza a substituição do cimento pelo RBRO (Anexo D). Nos traços com 20% de adição de RBRO, o valor mínimo para o indicador de AG é de 15,7 kg CO_2 eq., sendo de 9,8 kg CO_2 eq. para 20% de substituição do RBRO. Porém, a redução de impacto não deve

ser maior do que 9% para 10% de substituição do RBRO, para não comprometer as propriedades do concreto com o ganho ambiental do uso do RBRO.

4.4.5 Concreto de alto desempenho

Para concretos de alto desempenho (f_c de 50 a 100 MPa), a substituição de areia por RBRO foi realizada, e notou-se uma redução dos indicadores de impacto de até 6,7% quando a areia foi totalmente substituída pelo RBRO (Figura 26a). Em baixos percentuais de substituição (5 e 10%), um aumento de aproximadamente 1% foi notado devido ao aumento de consumo de cimento do traço.

Figura 26 – Concreto de alto desempenho – Substituição da areia. (a) Indicadores (b) Intensidade dos indicadores.



Inversamente, quando considerado a influência da porcentagem de RBRO nas propriedades mecânicas do concreto, os melhores resultados são observados para baixos percentuais de substituição (5%), tendo uma redução de 5,7% da intensidade dos indicadores (Figura 26b). Para a substituição total da areia por RBRO, um aumento de até 59% é observado. Isso se deve à grande perda de resistência do material, sendo de aproximadamente 41% para a total substituição da areia. Como a substituição total da areia causou uma redução de impacto menor do que 7%, o ideal é que a perda de resistência não fosse maior do que esse valor.

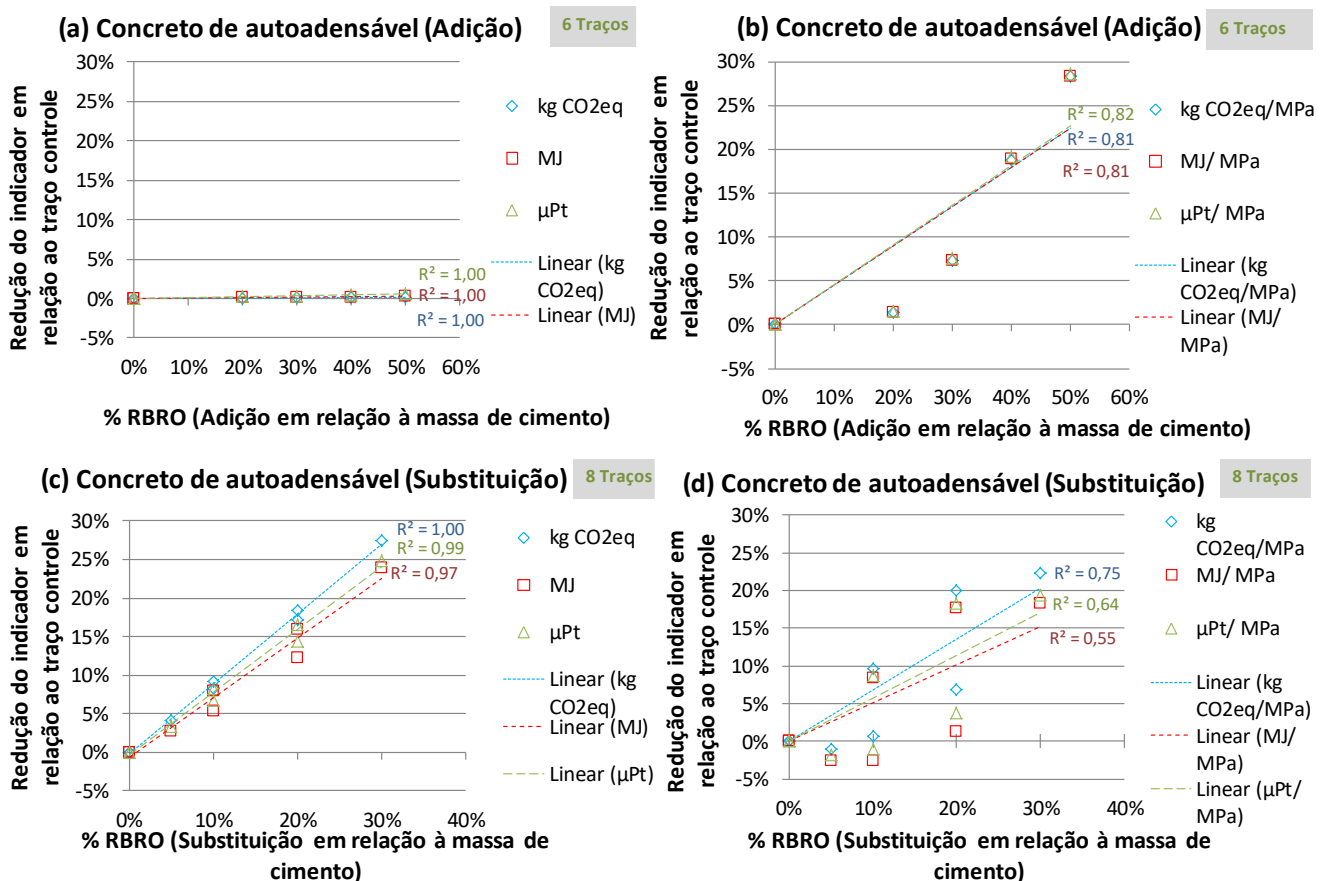
Sendo assim, a substituição total da areia por RBRO não é recomendada, pois o ganho ambiental não compensa as perdas das propriedades mecânicas do material. Contudo, um teor de substituição de até 20%, aumenta a intensidade dos indicadores

em cerca de 8%, com uma redução dos indicadores de até 1,6%, ainda se apresentando como solução viável.

4.4.6 Concreto autoadensável

Na Figura 27a, nota-se que a contribuição da adição do RBRO para redução dos indicadores é insignificante, sendo menor que 0,6% para 50% de adição. Isso se deve ao fato de que o consumo de cimento do traço foi mantido constante (400 kg/m³), e a adição de RBRO substituiu em parte os agregados do traço.

Figura 27 – Concreto autoadensável – Adição e substituição ao cimento. (a) Indicadores - adição (b) Intensidade dos indicadores - adição. (c) Indicadores - substituição (d) Intensidade dos indicadores - substituição.



Contudo, na Figura 27b nota-se que a adição de RBRO atuou de forma muito positiva para redução dos indicadores, quando considerado também o efeito sobre a resistência à compressão axial. Para uma adição de 50%, uma redução de até 28,7% dos indicadores é obtida. Ainda, um traço com consumo de cimento de 600 kg/m³ e sem RBRO apresenta um valor até 20,2% menor de intensidade dos indicadores se

comparado ao traço controle com 400 kg/m³ (Apêndice D), devido ao grande aumento da resistência a compressão axial obtida. Contudo, uma redução similar pode ser observada para um traço com menor consumo de cimento (400 kg/m³) e com 40% de RBRO, alcançando até 19,1% de redução dos indicadores.

Na Figura 27c, nota-se uma contribuição significativa da substituição do cimento por RBRO para redução dos indicadores de impacto. Para 30% de substituição, uma redução de 23,9 a 27,5% dos indicadores é observada. Sendo que, para cada 10% de substituição, reduções médias de 9,1%, 7,7% e 8,2 % são obtidas para os indicadores de AG, EI e IT, respectivamente. Considerando-se a resistência a compressão axial, obtém-se uma correlação linear mais fraca entre a redução da intensidade dos indicadores e a porcentagem de RBRO (Figura 27d). Contudo, ainda se tem que o percentual 30% de RBRO com a maior redução de impacto, chegando até a 22,6% para o indicador de AG.

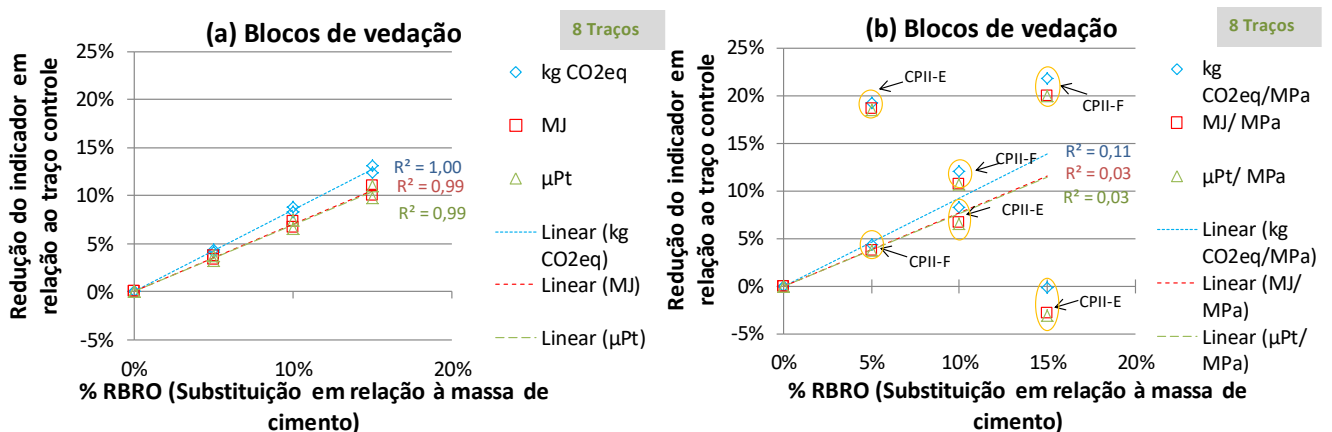
Vale ressaltar que o traço de CAA com o menor valor absoluto dos indicadores de impacto foi produzido com o cimento CP III e um teor equivalente de substituição do cimento por RBRO de 31% (Apêndice D). Em tal estudo, os valores dos indicadores de impacto AG, EI, e IT foram 189 kg CO₂ eq., 2234 MJ e 58156 µPt, respectivamente. O segundo traço com os menores valores absolutos dos indicadores de impacto possui teor de substituição de 30%, porém seus valores absolutos de impacto são mais elevados, devido ao uso do cimento CP I-S. O traço com CP III apresenta um valor de 40,1 a 56,3% menor para os indicadores de impacto quando comparado ao traço com CP I-S, devido à grande diferença de impacto entre os dois tipos de cimento. Comparando-se a intensidade dos indicadores (impacto/fc), o traço com CP III apresenta um valor de 38,9 a 55,7% menor quando comparado ao traço com CP I-S. Isso demonstra que o RBRO pode ser utilizado em combinação com cimentos compostos com alto teor de adições minerais, melhorando ainda mais o desempenho ambiental dos traços de concreto sem prejudicar suas propriedades mecânicas.

Adicionalmente, comparativamente aos traços de concreto convencional (Figura 25), os resultados de intensidade de impacto dos traços de CAA (Figura 27) apresentaram melhores resultados, devido ao CAA ser projetado para um maior percentual de finos em sua composição.

4.4.7 Blocos de vedação

Para os blocos de vedação, uma redução de até 13,2% dos indicadores é observada quando 15% de RBRO são utilizados como substituição do cimento (Figura 28a). Uma correlação linear é notada onde para cada 10% de substituição, reduções de 8,5%, 7,0% e 6,9 % dos indicadores de AG, EI, e IT são obtidas, respectivamente.

Figura 28 – Blocos de vedação – Substituição do cimento. (a) Indicadores (b) Intensidade dos indicadores.



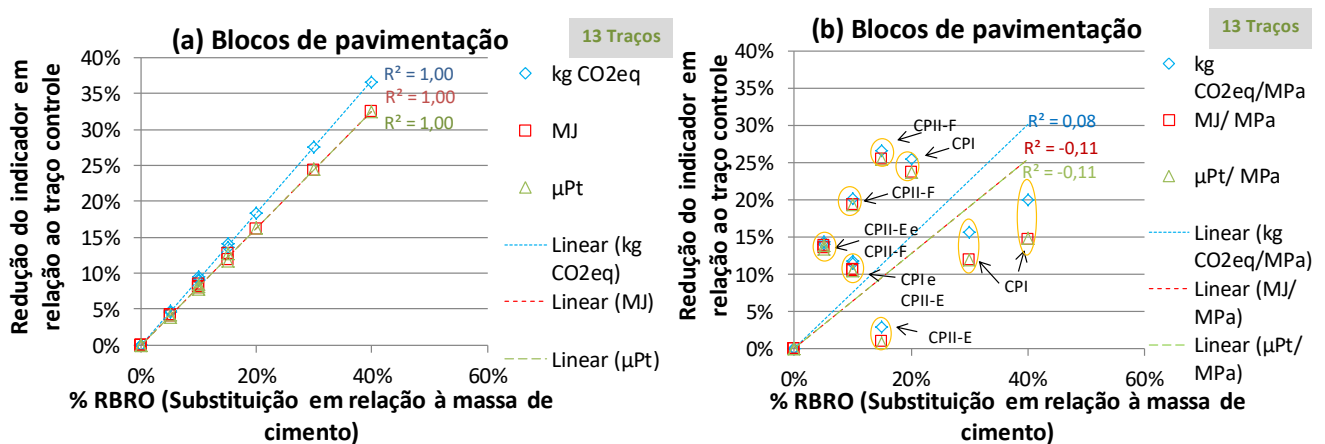
Considerando-se o f_c do material, como pode ser observado na Figura 28b, um padrão linear não é observado para as misturas analisadas, devido ao uso de diferentes tipos de cimento nos dois estudos considerados. O estudo utilizando CP II-E apresenta uma redução de até 19,3% para 5% de RBRO e um aumento de até 3% para 15% de RBRO. Isso é devido à perda de resistência do traço com o aumento do RBRO em combinação com esse tipo de cimento. Já para o estudo que utilizou CP II-F, uma redução inicial de até 4,4% para 5% de RBRO é notada, chegando até a 22% para 15% de RBRO, sendo devido ao aumento da resistência combinando esse cimento com RBRO.

Contudo, os traços utilizando CP II-E apresentaram menores valores absolutos de intensidade dos indicadores do que os traços utilizando CP II-F. Como exemplo, os traços utilizando CP II-E com 0 e 15% de RBRO obtiveram 59,6 e 59,7 kg CO₂ eq./MPa, respectivamente; enquanto os traços com CP II-F obtiveram 99,3 e 77,6 kg CO₂ eq./MPa para 0 e 15% de RBRO, respectivamente.

4.4.8 Blocos de pavimentação

Para os blocos de pavimentação, uma significativa redução dos indicadores é observada, atingindo até 36,6% para 40% de substituição do cimento por RBRO (Figura 29a). Ademais, uma correlação linear entre percentual de RBRO e redução de impacto é observada, sendo que a cada 10% de RBRO, reduções de 9,2%, 8,1% e 8,1% dos indicadores de AQ, EI e IT são obtidas, respectivamente.

Figura 29 – Blocos de pavimentação – Substituição do cimento. (a) Indicadores (b) Intensidade dos indicadores.



Considerando o f_c , mais uma vez o tipo de cimento utilizado no traço, e que foi substituído por RBRO, influencia na análise de redução dos indicadores (Figura 29b). O estudo utilizando CP II-E apresenta uma redução de até 14,0% para 5% de RBRO e de até 2,8% para 15% de RBRO. Já para o estudo que utilizou CP II-F, uma redução inicial de até 14,4% para 5% de RBRO é notada, chegando até a 26,6% para 15% de RBRO. Enquanto que para o estudo com CPI, uma redução inicial de até 11,5% para 10% de RBRO é notada, atingindo o máximo de 25,5% de redução para 20% de RBRO.

Essa análise da intensidade de impacto da substituição do cimento em blocos de vedação e de pavimentação mostra que elevados teores (15%) de substituição de um cimento que já possui um menor impacto ambiental (CP II-E) pelo RBRO, a perda de resistência provocada nos blocos (11%) é de certa forma equilibrada pelo benefício da redução dos indicadores de impacto do traço (11,8 a 13,7%). Enquanto que a substituição de um cimento com um maior impacto incorporado (CP I e CP II-F) pelo

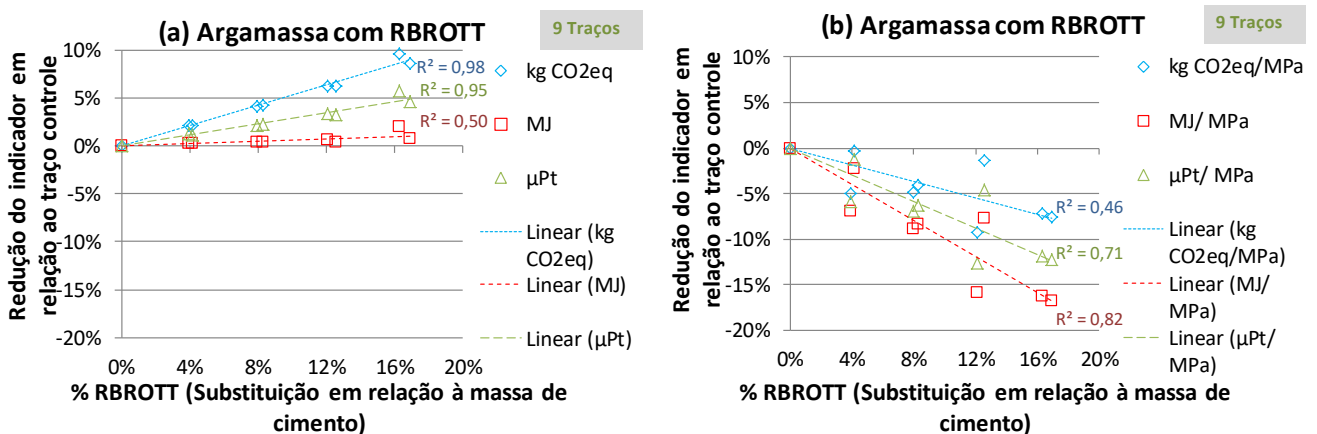
RBRO provoca uma maior redução da intensidade de impacto, devido ao benefício de substituir-se um cimento mais impactante por um resíduo reciclado.

Contudo, os indicadores absolutos dos traços utilizando CP II-E são menores do que os utilizam CP I e CP II-F (Anexo D). Como exemplo, o menor valor de intensidade de impacto dos traços é notado utilizando CP II-E e 5% RBRO, com 7 kg CO₂ eq./MPa. Enquanto que para os traços utilizando os cimentos CP I e CP II-F, os menores valores são 9,2 e 9,1 kg CO₂ eq./MPa, respectivamente, com 40 e 15% de substituição do cimento pelo RBRO, respectivamente.

4.4.9 Argamassa com RBROTT

Na Figura 30a observa-se a influência do aumento percentual de substituição do cimento pelo RBROTT nos indicadores ambientais de argamassas incorporando RBROTT. O indicador de AG é o mais influenciado, sofrendo uma redução de até 9,5% para 16% de substituição em massa do cimento por RBROTT. Para o mesmo percentual de RBROTT, uma redução máxima de 2,0 e 5,7% dos indicadores de EI e IT é observada, respectivamente.

Figura 30 – Argamassa com RBROTT – Substituição do cimento. (a) Indicadores (b) Intensidade dos indicadores.



Inversamente, na Figura 30b, nota-se um aumento na intensidade dos indicadores de impacto com o aumento do teor de substituição, na análise que considera também a influência da substituição no fc do traço. O indicador mais influenciado foi o de EI, com até 16,8 % de aumento para 17% de RBROTT. Para o mesmo percentual de RBROTT, aumentos de 7,5 e 12,3% da intensidade dos indicadores de AG e IT são observados,

respectivamente. Esse aumento é devido à perda de resistência dos traços com o acréscimo da substituição do cimento por RBROTT. A perda de resistência comparada com o traço controle foi de até 15% para 16% de substituição do cimento por RBROTT. Logo, a redução de f_c dos traços (de até 15%) com maiores teores de RBROTT superou a redução dos indicadores de impacto (de até 9,5%) obtida para os traços, aumentando assim o impacto de 1 MPa do traço.

Como exemplo, o indicador de AG reduziu de 528 para até 478 kg CO₂ eq./m³ com 16% de RBROTT (Anexo D). Já quando considerado o f_c como balizador, o indicador aumentou de 9,6 para 10,3 kg CO₂ eq./(m³·MPa), devido à perda de resistência, de 55,2 para 46,6 MPa. Contudo, nota-se que apesar do aumento na intensidade dos indicadores (Figura 30b), todos os traços mantiveram-se numa faixa de resistência elevada (45 – 55 MPa), mesmo utilizando 16% de RBROTT, com resultados considerados satisfatórios para até 12% de substituição do cimento em massa.

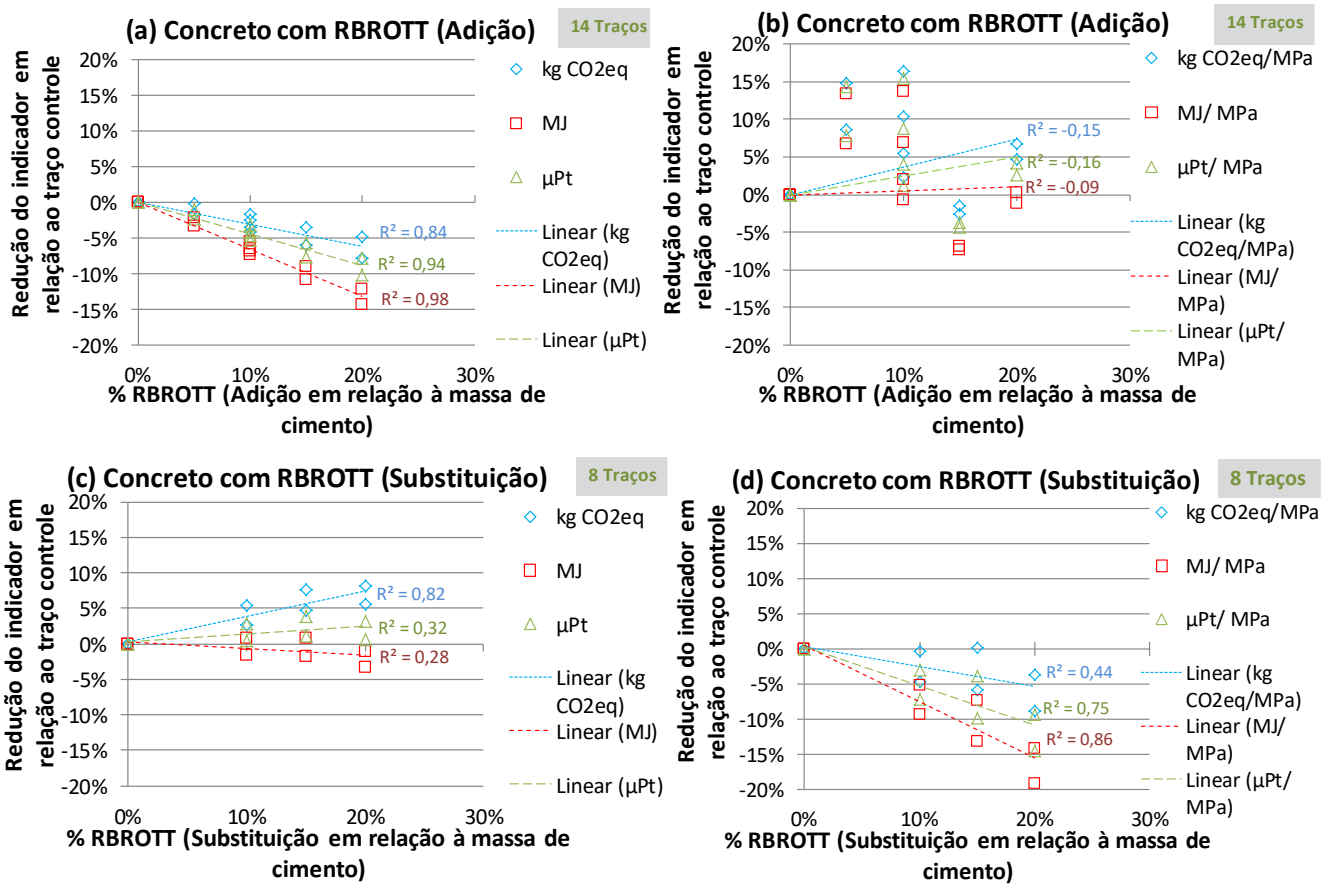
4.4.10 Concreto com RBROTT

Na Figura 31a, nota-se que o aumento do percentual de adição do RBROTT provocou um aumento dos indicadores de impacto. Isso é devido à baixa redução do consumo de cimento dos traços (máximo de 4,2% para 20% de adição do RBROTT) com o aumento dos teores de adição. O RBROTT, apesar de apresentar impacto inferior que a maioria dos cimentos (Figura 20), é um material que possui um impacto significativo para sua produção; logo, um aumento do impacto é esperado se o mesmo é adicionado ao traço em quantidade muito superior à qual a quantidade de cimento é reduzida. Para cada 10% de adição, aumentos médios de 3,1%, 6,5% e 4,4% são obtidos para os indicadores de AG, EI e IT, respectivamente.

Já na Figura 31b, considerando-se também a influência da substituição no f_c do traço, tem-se que os percentuais de adição de 5 e 10% foram os mais eficientes para redução da intensidade dos indicadores de impacto. Isso é devido aos ganhos expressivos no f_c do concreto, de até 24%, para 10% de RBROTT, combinado com um baixo aumento de impacto. Logo, esse efeito é refletido nesta análise, onde para o teor de 10% RBROTT, reduções de até 14,9%, 13,4% e 14,3% para os indicadores de AG, EI, e IT, respectivamente, são notadas. Em maiores percentuais de RBROTT,

a redução é menor, ou mesmo um aumento é provocado, pois o aumento de impacto da adição do RBROTT ao cimento não foi compensado em termos de ganho de resistência mecânica. Contudo, no teor máximo de RBRO analisado (20%), reduções de até 6,7% para intensidade de AQ e de 4,1% para intensidade de IT podem ser obtidas. Em suma, para os teores de adição, o percentual de 10% de RBROTT se mostrou o mais eficaz, por combinar o melhor aumento de resistência mecânica do material sem aumentar expressivamente seu impacto ambiental.

Figura 31 – Concreto com RBROTT – Adição e substituição ao cimento. (a) Indicadores - adição (b) Intensidade dos indicadores - adição. (c) Indicadores - substituição (d) Intensidade dos indicadores - substituição.



Na Figura 31c, considerando agora a substituição do cimento por RBROTT, nota-se que os indicadores de AQ e IT sofrem uma redução de até 8,2 e 3,9%, respectivamente, para teores de 20 e 15% RBRO, respectivamente. Já para EI, um aumento de até 3,4% é observado para o teor de 20% RBRO, sendo devido ao grande consumo energético para produção do RBROTT, bem como ao aumento do consumo de materiais cimentícios (3,8%) e de agregados (2,6%) do traço, e ao impacto do

transporte do RBROTT no cenário analisado. A produção de RBROTT possui um grande impacto de EI, sendo a categoria de impacto em maior desvantagem do material quando comparado com diversos tipos de cimento (Figura 20). Ademais, o RBROTT é transportado por 200 km a mais do que o CP V, ultrapassando o limite ideal de 110 km para o indicador de EI, como definido na Figura 21. Como para os outros dois indicadores, a distância limite é muito mais elevada (1025 e 3513 km para IT e AG, respectivamente), o uso do RBROTT contribui para uma redução dos indicadores.

Na Figura 31d, para 20% de substituição, aumentos de até 8,8%, 19,1% e 14,5% para a intensidade dos indicadores de AG, EI e IT são observados, respectivamente. Isso se deve à perda de resistência do concreto com aumento dos teores de substituição, chegando até a redução de 13% com 20% de substituição. Logo, menores valores de intensidade dos indicadores são notados para o menor teor de RBROTT, a 10%, considerado como o teor ideal de substituição dentre os analisados.

4.4.10.1 Considerações de durabilidade

Mittri (2016) e Degen (2017) apresentaram resultados positivos para durabilidade de estruturas de concretos (em condições agressivas de ataque por íons cloretos) com uso de RBROTT. Mittri (2016) obteve uma redução de mais de 40% da carga total passante, e de mais de 30% do coeficiente de difusão no estado estacionário para 10% de adição de RBROTT. Já Degen (2017), notou uma redução de mais de 60% da taxa de corrosão para concretos com 10% de adição/substituição de RBROTT.

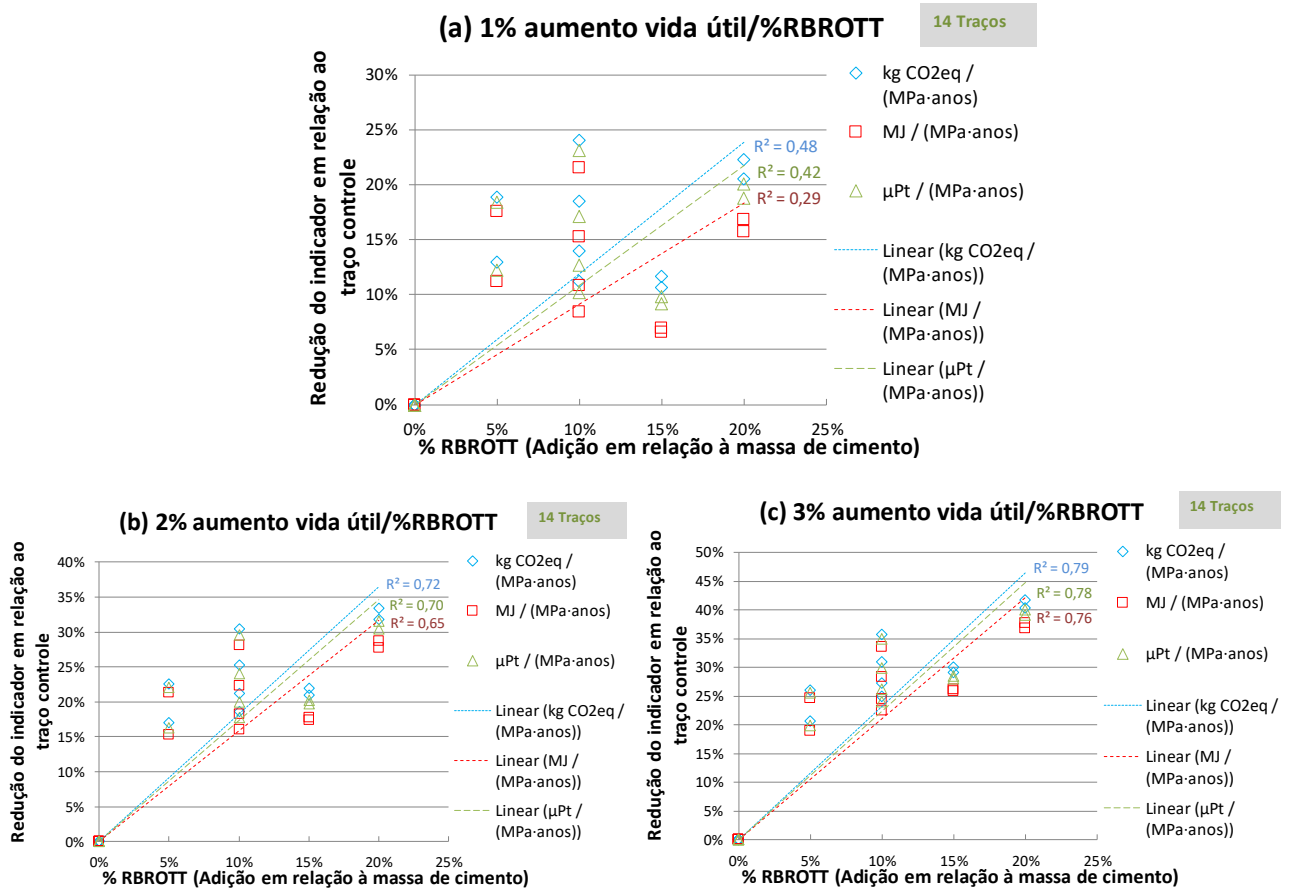
Sendo assim, utilizou-se a influência de melhora da durabilidade como outro parâmetro na ACV. Considera-se que os traços de concreto serão aplicados em estrutura de concreto armado próximas ao mar, onde a penetração de cloretos é um fator determinante para a durabilidade da estrutura. Primeiramente, tomou-se como base a vida útil que foi estimada no trabalho de Mittri (2016) a partir do coeficiente de difusão no estado estacionário. O autor utilizou a segunda lei de difusão de Fick, considerando 4 cm de cobrimento, concentração de cloretos para início da corrosão de 0,4% em relação à massa de cimento e a concentração superficial de cloretos de 0,93% em relação à massa de cimento (MITTRI, 2016). Calculando a influência (em

%) do percentual de RBROTT na vida útil de cada traço, normalizando essa influência para % de RBROTT e tirando-se a média desse valor de todos traços, obtém-se aproximadamente um aumento de 3% de vida útil por 1% de adição de RBROTT. Esse valor representa o aumento de vida útil teórico que a adição de 1% de RBRO, em relação a massa de cimento, proporcionaria ao concreto nas condições apresentadas. Isso pressupõe que o aumento de vida útil seja diretamente proporcional ao aumento de RBRO.

A vida útil mínima de projeto de uma estrutura de concreto armado de acordo com a Norma de Desempenho NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2013) é de 50 anos. Dessa forma, considerou-se esse valor de vida útil para os traços controles (sem RBROTT) dos estudos de Mittri (2016) e Degen (2017). Para os traços referentes a esses estudos com adição de RBROTT, este estudo considerou um aumento de 1 a 3% da vida útil da estrutura para cada 1% de RBROTT (tomando como base máxima o aumento de vida útil teórico de 3% estimado anteriormente a partir de Mittri (2016)). Logo, a partir dessas considerações, obter-se-ia 52,5 a 57,5 anos para 5% RBROTT, chegando de 60 a 80 anos para 20% RBROTT. Para uma avaliação mais aprofundada, recomenda-se a determinação do coeficiente de difusão por diferentes métodos combinada com a utilização de modelos de previsão de vida útil, como a utilização do *software* Life-365 (LIFE-365, 2018). Vale a ressalva de que esses valores obtidos com o uso de modelos não devem ser considerados como absolutos, e sim, relativos; vale-se a cautela, devido às incertezas dos modelos.

Nota-se na Figura 32a uma redução média de 9,2 a 11,9% da intensidade dos indicadores a cada ano de vida útil para cada 10% de adição de RBROTT. Já na Figura 32b e 32c, a redução média observada é de 15,8 a 18,2% e 21,1 a 23,2%, respectivamente, para cada 10% de adição de RBROTT. O menor aumento considerado foi de 1% de vida útil por % de RBROTT (Figura 32a) e já se demonstra significativo para a redução da intensidade dos indicadores de impacto. Assim, nota-se que, ao se considerar a aplicação dos traços em estruturas expostas ao ambiente marinho, o aumento de durabilidade possibilitado pelo RBROTT apresenta-se como fator considerável para o favorecimento da consideração ambiental de seu uso.

Figura 32 – Concreto com adição RBROTT com considerações de durabilidade - % de aumento da vida útil/%RBROTT (a) 1%; (b) 2%; (c) 3%.

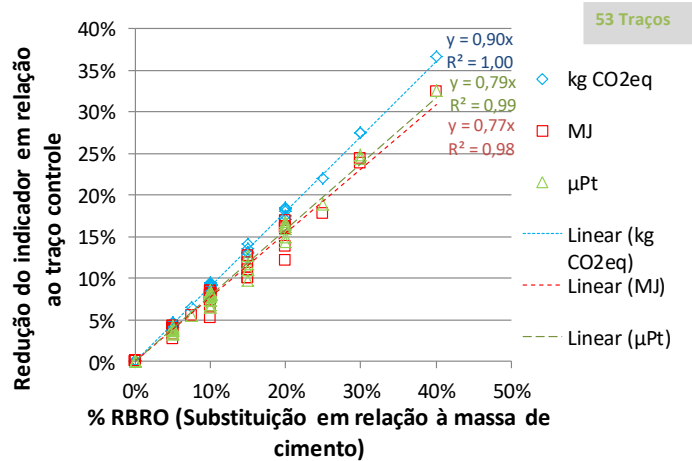


4.5 QUAL A REDUÇÃO MÉDIA DOS INDICADORES DE IMPACTO AMBIENTAL PARA A SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR RBRO?

Na maioria dos traços analisados, foi realizada substituição do RBRO em relação à massa de cimento. Portanto, será realizada uma breve análise para tal caso. Notou-se que para todos os materiais onde o RBRO substitui o cimento, ocorre uma redução dos indicadores de impacto (Figura 24a, Figura 25c, Figura 27c, Figura 28a, Figura 29a). Na Figura 33 apresenta-se a relação da redução dos indicadores em relação ao teor de RBRO em substituição ao cimento dos 53 traços que utilizaram tal abordagem. Observam-se a cada 10% de RBRO, reduções de 9,0%, 7,7% e 7,9% nos indicadores de AG, EI, e IT, respectivamente. Na substituição do cimento pelo RBRO, os valores médios de redução se aproximam da redução relativa de impacto do RBRO comparado ao cimento (material que substitui) multiplicado pela contribuição do

cimento para o valor total do indicador de impacto do traço, considerando que as outras variáveis se mantenham constantes.

Figura 33 – Redução dos indicadores para substituição do cimento por RBRO



O valor médio de redução de impacto do traço para um determinado teor de RBRO em relação ao controle também pode ser usado como um índice de perda de resistência máxima ideal para um determinado teor de substituição do RBRO. Pois se a perda de resistência for maior do que o valor de redução de impacto, a intensidade do indicador aumentará, indicando um aumento no impacto por unidade de resistência do material. Sendo assim, a perda de resistência máxima ideal seria de 7,7% para cada 10% de cimento substituído por RBRO.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

"It is a capital mistake to theorize before one has data. Insensibly one begins to twist facts to suit theories, instead of theories to suit facts."

Sherlock Holmes,

Em *"A Scandal in Bohemia"* (1891), de Arthur Conan Doyle

5. CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSOES GERAIS

Este estudo aplicou a avaliação do ciclo de vida para avaliar a viabilidade ambiental da utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais para fabricação de materiais de construção civil à base de cimento. A análise incluiu 127 traços, classificados em 10 categorias diferentes de materiais, provenientes de 20 estudos. Análises específicas sobre a secagem e transporte do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais foram realizadas, bem como avaliação de sua queima e utilização na fabricação de materiais.

Este estudo demonstrou que o RBRO é uma alternativa viável ambientalmente para ser utilizada em materiais de construção civil à base de cimento, atestando sua viabilidade ambiental. O material apresentou-se competitivo ambientalmente com fíler calcário, areia e pó de pedra. Ademais, o RBRO possui grande potencial para ser utilizado como substituição parcial ao cimento no estado do ES, visto que o volume de produção de ambos é similar, ultrapassando 1 milhão de toneladas anualmente. Apresentou resultados satisfatórios de redução de impacto quando usado como adição/substituição em altos teores (acima de 50%) na produção de argamassas de revestimento e assentamento e de concreto autoadensável. Nos traços utilizando substituição de cimento em blocos de vedação (até 20%) e de pavimentação (até 40%) também apresentou significativa redução de impacto ambiental. Já nos traços de concreto convencional, pode ser utilizado até teor de 25% como substituição.

O material pode ser comercializado em bags como um fíler pronto para ser utilizado na fabricação de concretos e artefatos (CALMON; BRAGA; PREZOTTI, 2007). Contudo, uma alternativa é que o mesmo seja utilizado futuramente na fabricação de cimento, pois dessa forma, conseguir-se-ia absorver uma maior quantidade de RBRO pela indústria, e não depender-se-ia apenas das concreteiras, construtoras e fábricas de artefatos. Dessa forma, a normatização da utilização do RBRO como fíler na produção de materiais de construção civil e na fabricação de cimentos é encorajada.

Ademais, busca-se também com este trabalho incentivar a criação de legislações ambientais que fomentem e induzam ao reaproveitamento do RBRO.

Os resultados e conclusões deste estudo têm repercussões significantes para pesquisa nessa área, que normalmente considerou este tópico como de menor importância. Usualmente, os estudos que realizam a incorporação de diferentes resíduos e subprodutos industriais consideram sempre que essa incorporação é uma solução positiva do ponto de vista ambiental, o que nem sempre é o caso. Raramente é realizada alguma análise para fundamentar a hipótese do benefício ambiental. A realização da ACV, ainda que a nível relativo e probabilístico, se apresenta como poderosa ferramenta para fundamentar justificativas ambientais, sendo uma importante ferramenta para tomada de decisão.

5.2 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS

Como conclusões específicas sobre a secagem do RBRO, têm-se:

- A secagem ao ar livre, por utilizar apenas energia para movimentação do material e destorroamento, se apresentou como a solução menos impactante;
- O secador tipo spray se mostrou o menos eficiente ambientalmente;
- O secador rotativo (menos impactante), mesmo no cenário mais otimista equivaleria de 5,8 a 16,4 vezes o impacto da secagem ao ar livre;
- Contudo, o RBRO seco no secador rotativo se apresentou competitivo em relação ao fíler calcário, sendo uma solução interessante em comparação com a produção de novos materiais.

Como conclusões específicas sobre o transporte do RBRO, têm-se:

- Comparativamente ao pó de pedra, à areia e ao fíler calcário, a distância adicional limite de transporte do RBRO para os 3 indicadores analisados foi de: 11 a 64 km; 29 a 41 km; e 104 a 197 km, respectivamente.
- O RBRO apresenta-se como uma boa alternativa para redução de impacto ambiental dentro do estado do ES, seja substituindo um material com maior impacto incorporado, como o fíler calcário, ou até mesmo a areia e o pó de pedra, que possuem menores valores de impacto incorporado.

Como conclusões específicas sobre a queima do RBRO, têm-se:

- O RBROTT apresenta um menor impacto do que os cimentos com elevados percentuais de clínquer (CP I, CP I-S / CP V) para os 5 indicadores analisados, e um impacto menor que o CP II-F e a cal para 4 indicadores;
- O desempenho ambiental do RBROTT pode ser considerado análogo com o do cimento CP II-E, que apresenta até 34% de escória em sua composição;
- O potencial de aumento de vida útil devido ao uso do RBROTT em estruturas de concreto armado em ambientes marinhos demonstra ser fator decisivo para o embasamento de seu aspecto benéfico ambiental.

Como conclusões específicas para a influência do resíduo para redução dos indicadores e intensidade dos indicadores dos traços de diferentes materiais, têm-se:

- Para argamassas de assentamento, a substituição da cal por RBRO contribuiu significativamente para redução dos indicadores de impacto.
- Para argamassa de revestimento, os traços com maior percentual de adição do RBRO em relação à massa de cimento apresentaram a maior redução dos indicadores e da intensidade de impacto.
- Para argamassas de alta resistência, a substituição de cimento por RBRO apresentou-se mais efetiva do que a substituição de areia para redução de impacto. A intensidade dos indicadores também pode ser reduzida desde que a perda de resistência à compressão axial não seja muito significativa, sendo o ideal um valor menor do que 9%.
- Para o concreto convencional, o aumento do teor de adição de RBRO provocou um aumento dos indicadores, porém, uma redução da intensidade dos indicadores. De modo inverso, nos traços com substituição, o aumento do teor de RBRO provocou uma redução dos indicadores, e para redução da intensidade dos indicadores, os teores de 5 e 8% apresentaram os melhores resultados.
- Para o concreto de alto desempenho, uma redução dos indicadores de impacto de até 6,7% foi notada quando a areia foi totalmente substituída pelo RBRO. Contudo, observou-se um grande aumento (até 59%) da intensidade dos indicadores devido à perda de até 41% da resistência do material.

- Para o concreto autoadensável, não foi notada uma redução significativa dos indicadores para de adição do RBRO. Contudo, considerado o f_c como parâmetro, uma redução de até 28,7% foi observada para 50% de adição. Já nos traços com substituição do cimento por RBRO, a cada 10%, uma redução média de até 9,1% foi observada. Na intensidade dos indicadores, o percentual 30% de RBRO apresentou a maior redução de impacto, chegando até a 22,6%. Este material apresentou-se como um dos mais efetivos para absorver o RBRO, devido à sua grande capacidade de absorção de materiais finos sem perda de resistência mecânica.
- Para os blocos de vedação e blocos de pavimentação, a cada 10% de substituição, uma redução média de até 9,2% dos indicadores foi obtida. Os traços com CP II-F, apresentaram uma maior redução para mais elevados teores de RBRO. Contudo, traços com CP II-E apresentam menores valores absolutos dos indicadores e intensidade do que traços com CP I e CP II-F.
- Para a argamassa com RBROTT, uma redução de até 9,5% dos indicadores foi observada para 16% de substituição do cimento. Contudo, para teor similar, um aumento na intensidade dos indicadores de até 16,8% foi notado. Logo, têm-se que a redução de f_c dos traços superou a influência da redução dos indicadores de impacto.
- Para o concreto com adição de RBROTT, o percentual de 10% de RBROTT se mostrou o mais eficaz, por combinar o melhor aumento de resistência mecânica do material sem aumentar expressivamente seu impacto ambiental. Para RBROTT como substituição, menores valores de intensidade dos indicadores são notados para os menores teores de RBROTT, considerado 10% também como o teor ideal.
- O aumento de vida útil proporcionado pelo RBROTT em estruturas de concreto armado em ambientes próximos ao mar se apresenta como fator determinante para embasamento técnico e ambiental de sua utilização.

Ademais, a abordagem de substituição do cimento pelo RBRO foi a mais amplamente adotada nos estudos, atingindo de 7,7 a 9,0% de redução dos indicadores a cada 10% de RBRO. Logo, a perda de resistência máxima ideal do traço, visando não prejudicar

o ganho ambiental, pode ser considerada de 7,7% para cada 10% de cimento substituído por RBRO.

5.3 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Utilização da metodologia ACV para avaliação:

- Da incorporação do RBRO em matrizes cerâmicas e betuminosas;
- Comparativa do impacto de produção do RBROTT com pozolanas;
- Da utilização do RBROTT para fabricação de cimentos compostos, e do uso do RBRO na farinha de cru para queima no forno rotativo para fabricação de clínquer;
- Da incorporação de resíduos e subprodutos industriais que ainda não tenham sido analisados pela ótica da ACV.

Ademais, recomenda-se:

- Incluir aplicação de modelos de previsão de vida útil para encontrar o aumento de vida útil para o caso do RBROTT;
- Analisar a inclusão do RBRO para produção de cimento, o adicionando na farinha, antes do forno rotativo, para fabricação de clínquer.
- Utilização de métodos mais avançados, probabilísticos, para a realização da ACV, utilizando funções de distribuição na entrada de dados de inventário.

REFERÊNCIAS

"You never lose by giving credit. You often gain."
Marian Petre e Gordon Rugg,
Em *"The Unwritten Rules Of Phd Research"* (2010)

REFERÊNCIAS

ABIROCHAS. **ABIROCHAS em Notícia / ABINEWS**. Disponível em: <https://issuu.com/abirochas/docs/abirochas_noticia_4>. Acesso em: 29 mar. 2017.

ABIROCHAS. **Produção Brasileira de Lavra - O Setor Brasileiro de Rochas Ornamentais**, 2018. Disponível em: <http://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2018/06/Panorama/Produ%C3%A7%C3%A3o_Brasileira_Lavra.pdf> Acesso em: 15 jul. 2018.

ALMEIDA, N.; BRANCO, F.; DE BRITO, J.; SANTOS, J. R. High-performance concrete with recycled stone slurry. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 2, p. 210–220, 2007.

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**, p. 17–21, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5732 - Cimento Portland comum**. Rio de Janeiro, 1991a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5733 - Cimento Portland com alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1991b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5735 - Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro, 1991c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11578 - Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro, 1991d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10004 - Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 14040 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15575-1 - Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8953 - Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, 2015.

BACARJI, E.; TOLEDO FILHO, R. D.; KOENDERS, E. A. B.; FIGUEIREDO, E. P.; LOPES, J. L. M. P. Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 1–10, 2013.

BAEZA, F.; PAYÁ, J.; GALAO, O.; SAVAL, J. M.; GARCÉS, P. Blending of industrial waste from different sources as partial substitution of Portland cement in pastes and mortars. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 645–653, 2014.

BAITZ, M. *et al.* LCA's theory and practice: Like ebony and ivory living in perfect harmony? **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 1, p. 5–13, 2013.

BILGIN, N.; YEPREM, H. A.; ARSLAN, S.; BILGIN, A.; GÜNAY, E.; MAROGLU, M. Use of waste marble powder in brick industry. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 449–457, 2012.

BOVEA, M. D.; POWELL, J. C. Developments in life cycle assessment applied to evaluate the environmental performance of construction and demolition wastes. **Waste Management**, v. 50, p. 151–172, 2016.

BRASIL. **Resolução CONAMA Nº 001, de 23 de janeiro de 1986**. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, 1986. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>> Acesso em: 15 fev. 2017.

BRASIL. **Resolução CONAMA Nº436, de 22 de dezembro de 2011**. Alterada pelas Resoluções nº 11/86, nº 5/87 e nº 237/97. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA_RES_CONS_2006_382.pdf> Acesso em: 07 fev. 2017.

BUENO, C.; HAUSCHILD, M. Z.; ROSSIGNOLO, J. A.; OMETTO, A. R.; MENDES, N. C. Sensitivity analysis of the use of Life Cycle Impact Assessment methods: A case study on building materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2208–2220, 2016.

BUSHI, L.; FINLAYSON, G.; MEIL, J. **A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Ready-Mixed Concrete Manufacture by NRMCA Members**. Athena Sustainable Materials Institute, 39 p., 2014.

BUZZI, D. C. **Estudo de classificação e quantificação das lamas geradas no processo de beneficiamento de rochas ornamentais**. 365p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. Vitória-ES, 2008.

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÉLLO, F. S. S.; DA SILVA, S. A. C.; MATTOS, F. V. **Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento**. II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. **Anais...**Salvador - BA: 1997

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÉLLO, F. S. S.; DA SILVA, S. A. C.; MATTOS, F. V. **Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de tijolos de solo-cimento**. VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais...**Florianópolis-SC: 1998

CALMON, J. L.; MORATTI, M.; MORAES, S.; CENCI, D. **Self-compacting concrete using marble and granite sawing wastes as filler**. World Sustainable Building Conference - SB05Tokyo. **Anais...**Tokyo: 2005

CALMON, J. L.; BRAGA, F. DOS S.; PREZOTTI, J. C. S. **Projeto básico de central de tratamento de resíduos gerados no processo de beneficiamento de rochas ornamentais**. Vitória-ES, 2007.

CARVALHO, J. DE. **Análise de Ciclo de Vida Ambiental Aplicada a Construção Civil - Estudo de Caso: Comparação entre Cimentos Portland com Adição de Resíduos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. São Paulo-SP, 2002.

CARVALHO, J. O. **A Indústria do Cimento e a Infraestrutura no Brasil**. Comissão de serviços de infraestrutura. Senado Federal. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. SNIC, 2009.

CASTRO, N. F.; MARCON, D. B.; FREIRE, L. C. Impacto do APL de Rochas Ornamentais do Espírito Santo nas Comunidades. In: **Recursos minerais e sustentabilidade territorial: arranjos produtivos locais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, p. 139–176. 2011.

CBCS. **Projeto Avaliação de Ciclo de Vida Modular de Blocos e Pisos de Concreto**. Conselho Brasileiro de Construção Sustentável - CBCS, 2014. Disponível em: <www.acv.net.br> Acesso em: 19 fev. 2017

CHIODI FILHO, C.; CHIODI, D. K. **Relatório Técnico 33 - Perfil de Rochas Ornamentais e de Revestimento**. Ministério de Minas e Energia - MME, 2009.

CIB; UNEP. **Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries - A discussion document**. The International Council for Research and Innovation in Building and Construction - CIB; United Nations Environment Programme- UNEP. WSSD edition. Pretoria: CSIR Building and Construction Technology, 2002.

CIMEF. **Multifio VB 42**. Disponível em: <http://www.cimef.com.br/pt/prod_teares_multifio_vb_42.php>. Acesso em: 5 mar. 2017.

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.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G.; NAIK, T. R. Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 1, p. 113–117, 2010.

CSM. **Argamassadeira MC 45**. Disponível em: <<http://www.csm.ind.br/maquinas/produtos/argamassadeira-mc-45/#1461780619735-a58db12e-3b94>>. Acesso em: 7 mar. 2018.

CUENCA-MOYANO, G. M.; ZANNI, S.; BONOLI, A.; VALVERDE-PALACIOS, I. Development of the life cycle inventory of masonry mortar made of natural and recycled aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 1272–1286, 2017.

DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 555–562, 2010.

DE PAULA, T. H. P. Arranjo produtivo local de rochas ornamentais do Estado do Espírito Santo: delimitação e análise dos níveis de desenvolvimento dos municípios constituintes. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 39, n. 1, p. 66–83, 2008.

DE SOUZA, D. M.; LAFONTAINE, M.; CHARRON-DOUCET, F.; BENGGOA, X.; CHAPPERT, B.; DUARTE, F.; LIMA, L. Comparative Life Cycle Assessment of ceramic versus concrete roof tiles in the Brazilian context. **Journal of Cleaner Production**, v. 89, p. 165–173, 2015.

DE 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**, v. 137, p. 70–82, 2016.

DEGEN, M. K. **Avaliação de desempenho mecânico e de durabilidade em concretos produzidos com resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente (RBROTT)**. 126 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. Vitória-ES, 2017.

DELBONI JR., H. Cominuição. Parte II. In: FERNANDES, F. R. C. *et al.* (Eds.). **Tendências Tecnológicas Brasil 2015**. 2008

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. **Anuário Mineral Brasileiro**. ISSN 0100 - 9303. Brasília. 2010.

DESCHAMPS, J.; SIMON, B.; TAGNIT-HAMOU, A.; AMOR, B. Is open-loop recycling the lowest preference in a circular economy? Answering through LCA of glass powder in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 185, p. 14–22, 2018.

EDELEN, A.; INGWERSEN, W. **Guidance on Data Quality Assessment for Life Cycle Inventory Data**. US Environmental Protection Agency (EPA), 37p., 2016.

EPE. **Balço energético nacional 2016: Ano base 2015 - BEN**. Rio de Janeiro. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). 2016.

ERGÜN, A. Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 2, p. 806–812, 2011.

EUROPEAN FEDERATION OF CONCRETE ADMIXTURE ASSOCIATIONS - EFCA. **EFCA Environmental Declaration. Superplasticizing Admixtures**, 2002.

EVANGELISTA, B. L.; ROSADO, L. P.; PENTEADO, C. S. G. Life cycle assessment of concrete paving blocks using electric arc furnace slag as natural coarse aggregate substitute. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, n. January, p. 176–185, 2018.

FILKOVÁ, I.; HUANG, L. X.; MUJUMDAR, A. S. Chapter 9. Industrial Spray Drying Systems. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. CRC Press. Taylor & Francis Group, p. 191–226. 2014.

FRISCHKNECHT, R. *et al.* **Overview and Methodology. ecoinvent report No. 1.** Ecoinvent Centre, Dübendorf, Suíça. 2007a.

FRISCHKNECHT, R. *et al.* **Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods: Data v2.0. ecoinvent report No. 3, Swiss centre for Life Cycle Inventories.** Ecoinvent Centre, Dübendorf, Suíça. 2007b.

GALETAKIS, M.; SOULTANA, A. A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 769–781, 2016.

GARCÍA, N.; IRUSTA, R.; NÚÑEZ, Y.; MORAL, A. **Environmental performance of waste based construction materials. LCA study.** Sustainable construction materials and technologies. **Anais...**Coventry, U.K.: 2007

GESOĞLU, M.; GÜNEYISI, E.; KOCABAĞ, M. E.; BAYRAM, V.; MERMERDAŞ, K. Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 160–170, 2012.

GOEDKOOP, M.; OELE, M.; LEIJTING, J.; PONSIOEN, T.; MEIJER, E. **Introduction to LCA with SimaPro.** PRé Consultants, 2013.

GOEDKOOP, M. J.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M. A. J.; DE SCHRYVER, A. M.; STRUIJS, J.; VAN ZELM, R. **ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; First edition Report I: Characterisation.** 2009.

GONÇALVES, J. P.; MOURA, W. A.; DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação da influência da utilização do resíduo de corte de granito (RCG), como adição , em propriedades mecânicas do concreto. **Ambiente Construído**, v. 2, n. 1, p. 53–68, 2002.

GREEN DESIGN INSTITUTE. **Approaches to Life Cycle Assessment**Carnegie Mellon University, 2008. Disponível em: <www.eiolca.net/Method/LCAapproaches.html>. Acesso em: 20 jan. 2017

HAUSCHILD, M.; POTTING, J. **Spatial differentiation in Life Cycle impact assessment - The EDIP2003 methodology**. Institute for Product Development. Technical University of Denmark. 2003.

HELLWEG, S.; CANALS, L. M. I. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. **Science**, v. 344, n. 6188, p. 1109–1113, 2014.

HOSSAIN, M. U.; POON, C. S.; LO, I. M. C.; CHENG, J. C. P. Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 109, p. 67–77, 2016.

IEMA. **Instrução Normativa Nº 011, de 11 de outubro de 2016**, 2016. Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA). Disponível em: <<http://servicos.iema.es.gov.br/legislacao/FileHandler.ashx?id=858&type=2>> Acesso em: 02 fev. 2018.

IPCC. **IPCC Fifth Assessment Report. The Physical Science Basis**. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>> Acesso em: 08 jun. 2018.

IPEA. Diagnóstico dos resíduos sólidos da construção civil. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). **Relatório de Pesquisa**, p. 34, 2012.

ISO. **ISO 14040: Environmental management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework**. International Organisation for Standardisation (ISO). Geneve, 2006a.

ISO. **ISO 14044: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines**. International Organisation for Standardisation (ISO). Geneve, 2006b.

JARFEL. **LINHA TRITURADOR JAG**. Disponível em: <<http://www.jarfel.com.br/produtos/maquinas-para-tijolos-ecologicos/triturador-jag.php>>. Acesso em: 30 ago. 2017.

JOLLIET, O.; MARGNI, M.; CHARLES, R.; HUMBERT, S.; PAYET, J.; REBITZER, G. Presenting a New Method IMPACT 2002 + : A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 8, n. 6, p. 324–330, 2003.

JORNAL FATO. **Nassau negocia venda de terreno para grupo Carone**. Disponível em: <<https://www.jornalfato.com.br/geral/nassau-negocia-venda-de-terreno-para-grupo-carone,272758.jhtml>>. Acesso em: 12 jun. 2018.

KELLENBERGER, D.; ALTHAUS, H.-J.; N., J.; T., K.; M., L.; P., T. **Life cycle inventories of building products. Final report ecoinvent data v2.0 No.7 EMPA Dübendorf**. Dübendorf, CH. 2007. Disponível em: <www.ecoinvent.org>. Acesso em 05 fev. 2017.

KHODABAKHSHIAN, A.; DE BRITO, J.; GHALEHNOVI, M.; ASADI SHAMSABADI, E. Mechanical, environmental and economic performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 237–251, 2018.

KLEIJER, A. L.; LASVAUX, S.; CITHERLET, S.; VIVIANI, M. Product-specific Life Cycle Assessment of ready mix concrete: Comparison between a recycled and an ordinary concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 210–218, 2017.

KNOERI, C.; SANYÉ-MENGUAL, E.; ALTHAUS, H. J. Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 5, p. 909–918, 2013.

LIFE-365. **Versão 2.2.1, Service life prediction model**. Disponível em: <<http://www.life-365.org>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

MAGDALINI, K.; MARINOS-KOURIS, D.; MUJUMDAR, A. S. Chapter 7. Rotary Drying. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. CRC Press. Taylor & Francis Group, p. 139–160. 2014.

MAGNAVITA, A.; BOURGUIGNON, D.; CORREA, G.; DE SOUZA, J. A. C.; DOS SANTOS, S. A. **Processo de produção do cimento**. Faesa - Vitória-ES: Slideshare, 2009

MARCEAU, M. L.; NISBET, M.; VANGEEM, M. G. **Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete**. Skokie, Illinois. 121 p. 2007

MARCEAU, M.; VANGEEM, M. G. **Sustainability and slag cement. Slag cement association**. 2003. Disponível em: <<http://www.slagcement.org/sustainability/sustainability.html>>. Acesso em: 15 maio. 2016

MARINGOLO, V. **Clínquer co-processado: produto de tecnologia integrada para a sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento**. São Paulo, Brasil: Universidade de São Paulo, 2001.

MARINKOVIĆ, S.; RADONJANIN, V.; MALESEV, M.; LUKIC, I. **Life Cycle Environmental Impact Assessment of Concrete**. (L. Bragança *et al.*, Eds.) Proceedings of the COST Action C25. **Anais...**2008

MARINKOVIĆ, S.; RADONJANIN, V.; MALEŠEV, M.; IGNJATOVIĆ, I. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. **Waste Management**, v. 30, n. 11, p. 2255–2264, 2010.

MARTINEAU, G. **Ecoinvent 3.3 dataset documentation limestone production, crushed, for mill - CA-QC**. Ecoinvent, 2014a.

MARTINEAU, G. **Ecoinvent 3.3 dataset documentation limestone quarry operation - CA-QC**. Ecoinvent, 2014b.

MARTINEAU, G. **Ecoinvent 3.3 dataset documentation quicklime production, in pieces, loose - CA-QC**. Ecoinvent, 2014c.

MARTINEAU, G. **Ecoinvent 3.3 dataset documentation lime production, hydrated, loose weight - CA-QC** Ecoinvent, 2014d.

MARTÍNEZ-ROCAMORA, A.; SOLÍS-GUZMÁN, J.; MARRERO, M. LCA databases focused on construction materials: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 565–573, 2016.

MASHALY, A. O.; EL-KALIOUBY, B. A.; SHALABY, B. N.; EL-GOHARY, A. M.; RASHWAN, M. A. Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 731–741, 2016.

MCTIC. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil** Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações - MCTIC, 2016.

MELLO, R. Z.; COELHO, F. Z.; CALMON, J. L. **Avaliação do ciclo de vida de concreto autoadensável com diferentes teores de adição de escória de alto-forno**. XXII SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. **Anais...**Bauru-SP: 2015

MELLO, R. Z.; COELHO, F. Z.; CALMON, J. L. **LCA of waste PET particles as a partial replacement for sand in self-compacting concrete**. SBE16 Brazil & Portugal. **Anais...**Vitória-ES: 2016

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, n. 1, p. 160–175, 2016.

MENDOZA, J. M. F.; FECED, M.; FEIJOO, G.; JOSA, A.; GABARRELL, X.; RIERADEVALL, J. Life cycle inventory analysis of granite production from cradle to gate. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 1, p. 153–165, 2014.

MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; LIRA, H. DE L.; FERREIRA, H. C. Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 25, n. 7, p. 1149–1158, 2005.

MICROSOFT CORPORATION. **Excel 2010. Parte do Microsoft Office Professional Plus**, 2010.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Produto 32 - Perfil de argilas para Cerâmica Vermelha. Relatório Técnico 32: Perfil da Argila.** Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2009a.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Produto RT 72. Perfil da Cal.** Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2009b.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Produto 22 - Agregados para construção civil. Relatório Técnico 31 Perfil de areia para construção civil.** Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2009c.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Produto 22 - Agregados para construção civil. Relatório Técnico 30: Perfil de brita para construção civil.** Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2009d.

MITTRI, S. H. DE M. **Contribuição ao estudo do comportamento de concretos produzidos com resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente em relação aos aspectos mecânicos e de durabilidade.** 168f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. Vitória-ES, 2016.

MONTANI, C. **Dossier Brasile Dossiê Brasil 2017 Dossier Brazil.** Abirochas. 2017. Disponível em: <<http://abirochas.com.br/dossie-brasil/>> Acesso em 16 jun. 2018.

MONTEIRO, S. N.; PEÇANHA, L. A.; VIEIRA, C. M. F. Reformulation of roofing tiles body with addition of granite waste from sawing operations. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 24, n. 8, p. 2349–2356, 2004.

MORAGA, G.; BALDAUF, J.; KIRCHHEM, 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. **Anais...**Fortaleza-CE: 2016

MOURA, W. A.; LIMA, M. B. L.; CALMON, J. L.; MORATTI, M.; SOUZA, F. L. DOS S. **Utilização De Resíduo De Serragem De Rochas Ornamentais (RSRO) Como Substituição Parcial Do Cimento Na Produção De Blocos Pré-Moldados De Argamassa.** XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. **Anais...**Florianópolis-SC: ENTAC, 2006a

MOURA, W. A.; LIMA, M. B. L.; CALMON, J. L.; MORATTI, M.; SOUZA, F. L. DOS S. **Produção de pisos intertravados com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais.** XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído - ENTAC2006. **Anais...**Florianópolis-SC: 2006b

MOURA, W. A.; CALMON, J. L.; LIMA, M. B. L.; MORATTI, M.; CORREIA, R. DE F.; SENNA, D. O.; BOAVENTURA, M. C. **Relatório final do projeto utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais (RSRO) na produção de peças pré-moldadas para habitação de interesse social.** Feira de Santana - BA, 2007.

MOURA, W. A.; GONÇALVES, J. P.; LEITE, R. DA S. Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso. **Sitientibus**, n. 26, p. 49–61, 2002.

MOURA, W. A.; LEITE, M. B. Estudo da viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação. **REM: R. Esc. Minas**, v. 64, n. 2, p. 147–154, 2011.

MUJUMDAR, A. S. Chapter 1. Principles, Classification, and Selection of Dryers. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.) **Handbook of Industrial Drying.** CRC Press. Taylor & Francis Group, p. 3–30. 2014.

NAPOLANO, L.; MENNA, C.; GRAZIANO, S. F.; ASPRONE, D.; D'AMORE, M.; DE GENNARO, R.; DONDI, M. Environmental life cycle assessment of lightweight concrete to support recycled materials selection for sustainable design. **Construction and Building Materials**, v. 119, p. 370–384, 2016.

NEVES, M. A.; NADAI, C. P. DE; FONSECA, A. B. DA; PRADO, A. C. DE A.; GIANNOTTI, J. D. G.; RAYMUNDO, V. pH e umidade dos resíduos finos de beneficiamento de rochas ornamentais. **REM: R. Esc. Minas**, v. 66, n. 2, p. 239–244, 2013.

NICOLETTI, G. M.; NOTARNICOLA, B.; TASSIELLI, G. Comparative Life Cycle Assessment of flooring materials: Ceramic versus marble tiles. **Journal of Cleaner Production**, v. 10, n. 3, p. 283–296, 2002.

PETROBRAS. **COQUE VERDE DE PETRÓLEO**. 2014. Disponível em: <<http://www.br.com.br/pc/produtos-e-servicos/para-industrias/coqueverdedepetroleo>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

PRÉ CONSULTANTS. **Simapro 8.4.0.0. Faculty Version**, 2017.

RANA, A.; KALLA, P.; VERMA, H. K.; MOHNOT, J. K. Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 312–331, 2016.

RANA, A.; KALLA, P.; CSETENYI, L. J. Sustainable use of marble slurry in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 94, p. 304–311, 2015.

RODRIGUES, L. H. C. H. **Análise da incorporação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente na composição do cimento Portland**. 129 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. Vitória-ES, 2018 (versão não definitiva).

ROSADO, L. P.; VITALE, P.; PENTEADO, C. S. G.; ARENA, U. Life cycle assessment of natural and mixed recycled aggregate production in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 151, p. 634–642, 2017.

SADEK, D. M.; EL-ATTAR, M. M.; ALI, H. A. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 19–32, 2016.

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 Envolórias**. XIV ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais...**Juiz de Fora-MG: 2012

SILVA, S. A. C. da. **Caracterização do Resíduo da Serragem de Blocos de Granito. Estudo do Potencial de Aplicação na Fabricação de Argamassas de Assentamento e de Tijolos de Solo-Cimento**. 159f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. Vitória-ES, 1998.

SILVA, M. G.; SAADE, M. R. M.; GOMES, V. Influence of service life , strength and cement type on life cycle environmental performance of concrete. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 6, n. 6, p. 844–853, 2013.

SINGH, M.; CHOUDHARY, K.; SRIVASTAVA, A.; SINGH SANGWAN, K.; BHUNIA, D. A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 13, n. February, p. 87–95, 2017.

SINGH, S.; KHAN, S.; KHANDELWAL, R.; CHUGH, A.; NAGAR, R. Performance of sustainable concrete containing granite cutting waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 119, p. 86–98, 2016.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - SNIC. **Consumo aparente de cimento por regiões e estados - Consumo regional 2017** - Números da indústria, 2017. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-industria.php>>. Acesso em: 15 jul. 2018

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - SNIC. **Dados do setor**, 2018. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>>. Acesso em: 15 jul. 2018

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - SNIC. **Relatório Nacional 2013**, 2014. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2013.pdf>

SOUZA, A. DE. **Avaliação do ciclo de vida da areia em mineradora de pequeno porte, na região de São José do Rio Preto - SP**. 118f. Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos. São Carlos-SP, 2012.

STAFFORD, F. N.; RAUPP-PEREIRA, F.; LABRINCHA, J. A.; HOTZA, D. Life cycle assessment of the production of cement: A Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1293–1299, 2016.

STEINMANN, Z. J. N.; SCHIPPER, A. M.; HAUCK, M.; HUIJBREGTS, M. A. J. How Many Environmental Impact Indicators Are Needed in the Evaluation of Product Life Cycles? **Environmental Science & Technology**, v. 50, n. 7, p. 3913–3919, 2016.

SURGELAS, VALDIMIR; 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.** (ENTAC, Ed.) XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais...2010**

SUTHERLAND, J. W. *et al.* The role of manufacturing in affecting the social dimension of sustainability. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 65, n. 2, p. 689–712, 2016.

TRELOAR, G. J.; LOVE, P. E. D.; FANIRAN, O. O.; IYER-RANIGA, U. A hybrid life cycle assessment method for construction. **Construction Management and Economics**, v. 18, n. 1, p. 5–9, 2000.

ULIANA, J. G.; CALMON, J. L.; VIEIRA, G. L.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; NUNES, E. Heat treatment of processing sludge of ornamental rocks: application as pozzolan in cement matrices. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 2, p. 100–123, 2015.

UNEP. **Life Cycle Assessment: What it is and How to do it.** United Nations Environment Programme (UNEP). 1996.

UNEP. **The 10YFP Programme on Sustainable Buildings and Construction.** United Nations Environment Programme (UNEP). 2016. Disponível em: <<http://web.unep.org/10yfp/programmes/sustainable-buildings-and-construction-programme>>. Acesso em: 3 maio 2018.

USLCI. **United States Life Cycle Inventory**. National Renewable Energy Laboratory, 2015. Disponível em: <<https://uslci.lcacommons.gov/uslci/search>> Acesso em 08 jun. 2018.

UYSAL, M.; SUMER, M. Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 11, p. 4112–4120, 2011.

VAN DEN HEEDE, P.; DE BELIE, N. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes: Literature review and theoretical calculations. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 4, p. 431–442, 2012.

VIEIRA, D. R.; CALMON, J. L.; ZULCÃO, R.; COELHO, F. Z. Consideration of strength and service life in cradle-to-gate life cycle assessment of self-compacting concrete in a maritime area: a study in the Brazilian context. **Environment, Development and Sustainability**, 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**, v. 124, p. 656–666, 2016.

VINCO, L. G. F.; OLIVEIRA, J. D. DE; TRISTÃO, F. A.; VIEIRA, G. L. Viabilidade técnica e econômica de argamassas de revestimento produzidas com incorporação de resíduos de rochas ornamentais. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 4, p. 165–182, 2017.

VINHAL, L. D.; BULHÕES, B. B.; LIMA, T. Q. DE; 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. **Anais...**Fortaleza-CE: 2016

WEIDEMA, B. P.; BAUER, C.; HISCHIER, R.; MUTEL, C.; NEMECEK, T.; REINHARD, J.; VADENBO, C. O.; WENET, G. **Data quality guideline for the ecoinvent**. Swiss Center For Life Cycle Inventories. 2013

WEIDEMA, B. P.; WESNAES, M. S. Data quality management for life cycle inventories- an example of using data quality indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 4, n. 3-4, p. 167-174, 1996.

World Business Council for Sustainable Development - WBCSD. **Cement Sustainability Initiative. Getting the Numbers Right Project. Emissions Report 2014**, 2014. Disponível em: <<http://www.wbcscement.org/GNR-2014/index.html>> Acesso em 11 jul. 2018.

APÊNDICE A – Informações dos traços analisados.

Nº Artigo	Fonte	Tipo de RBRO (Comp. Química)	Tipo cimento	Nome do traço	CP(kg)	Cal (kg)	RBRO (kg)	Areia (kg)	Aditivo (kg)	Água (kg)	Res. Comp. 28 (Mpa)	Res. Tração 28 (Mpa)	Controle (C); Substituição (S); Adição (A)/ Cimento (Cim); Areia (Are)	
Argamassa de assentamento (1 m³)													% RBRO	
1	Calmon et al. (1997) ²	Granito (59,9% SiO ₂ ; 10,3% Al ₂ O ₃ ; 6,5% CaO; 6,1% Fe ₂ O ₃)	CP III-32	T1	144,3	163,0	0,0	1335,2	0,0	375,1	1,6	0,2	0%	C [1] ¹
				T3	149,0	126,4	69,3	1379,0	0,0	347,2	2,7	0,3	35%	S: Cal [1]
				T4	147,0	83,2	136,6	1360,8	0,0	348,5	2,2	0,2	62%	S: Cal [1]
				T5	137,6	38,9	191,7	1272,9	0,0	383,8	2,2	0,2	83%	S: Cal [1]
				T9	145,8	0,0	271,0	1349,1	0,0	339,7	2,8	0,3	100%	S: Cal [1]
				T2	217,0	122,8	0,0	1506,1	0,0	303,8	4,6	0,5	0%	C [2]
				T6	200,9	85,2	46,6	1394,3	0,0	350,6	4,6	0,4	35%	S: Cal [2]
				T7	199,9	56,6	93,0	1387,3	0,0	348,8	4,7	0,6	62%	S: Cal [2]
				T8	198,9	28,0	138,7	1380,6	0,0	347,1	4,8	0,7	83%	S: Cal [2]
				T10	199,3	0,0	185,2	1383,4	0,0	340,9	5,5	0,6	100%	S: Cal [2]
Argamassa de revestimento (1 m³)													% RBRO	
2	Vinco et al. (2017) ²	Granito (57,9% SiO ₂ ; 24,9% Al ₂ O ₃ ; 4,1% Fe ₂ O ₃ ; 2,7% CaO)	CP II F - 32	TR	224,3	0,0	152,5	1314,5	0,0	300,6	4,1	1,4	68%	C [1]
				2	206,2	0,0	280,4	1208,2	0,0	284,5	4,3	1,4	136%	A: Cim [1]
				3	198,6	0,0	405,2	1164,0	0,0	282,1	4,5	1,8	204%	A: Cim [1]
				4	202,7	0,0	137,8	1187,7	0,4	239,2	2,0	0,9	68%	C [2]
				5	190,9	0,0	259,6	1118,6	0,4	231,0	3,9	1,4	136%	A: Cim [2]
				6	181,3	0,0	369,9	1062,5	0,4	237,5	4,0	1,7	204%	A: Cim [2]
				7	202,5	64,8	137,7	1186,8	0,0	275,4	3,2	1,3	68%	C [3]
				8	195,6	62,6	266,0	1146,3	0,0	268,0	3,9	1,4	136%	A: Cim [3]
				9	188,3	60,3	384,1	1103,4	0,0	263,6	4,2	1,7	204%	A: Cim [3]
Argamassa de alta resistência (1 m³)													% RBRO	
3	Baeza et al. (2014)	Mármore (63,7% CaO; 3,7% SiO ₂ ; 0,35% Fe ₂ O ₃)	CP II - F	C	450,0	0,0	0,0	1350,0	0,0	225,0	38,0	-	0%	C [1]
				1-M10	405,0	0,0	45,0	1350,0	0,0	225,0	27,9	-	10%	S: Cim [1]
4	Corinaldesi, Moriconi e Naik (2010)	Mármore (66% CaCO ₃ ; 3% Quartz; 2% Ankerita)	CP II - F	REF	450,0	0,0	0,0	1350,0	0,0	275,0	39,0	-	0%	C [2]
				10% CEM	405,0	0,0	45,0	1350,0	0,0	276,0	36,0	-	10%	S: Cim [2]
				10% SAND	450,0	0,0	135,0	1215,0	0,0	266,0	32,0	-	10%	S: Are [2]
				REF + A	450,0	0,0	0,0	1350,0	2,3	220,0	54,0	-	0%	C [3]
				10% CEM + A	405,0	0,0	45,0	1350,0	2,0	200,0	48,0	-	10%	S: Cim [3]
				10% SAND + A	450,0	0,0	135,0	1215,0	2,3	240,0	52,0	-	10%	S: Are [3]

¹ O número entre colchetes identifica os grupos para análise comparativa. Ex.: Para a argamassa de assentamento, os traços identificados como S:Cal [1] realizaram a substituição da cal pelo RBRO e são analisados em relação ao traço controle C[1], e os traços identificados como S:Cal [2] são analisados em relação ao traço controle C[2].

² O consumo dos componentes dos traços (em kg/m³) das argamassas de assentamento, revestimento, com RBROTT, blocos de vedação e pavimentação, não estava presente nos artigos e foi calculado a partir do traço unitário em massa e da massa específica do traço e de seus componentes, fornecidas pelos artigos. Utilizou-se a seguinte relação:

$$C = \frac{1000 - V_{ar}}{\frac{1}{\rho_{cimento}} + \frac{cal}{\rho_{cal}} + \frac{RBRO}{\rho_{RBRO}} + \frac{areia}{\rho_{areia}} + \frac{pó\ de\ pedra}{\rho_{pó\ de\ pedra}} + a/c}, \text{ onde } C = \text{consumo de cimento do traço, } V_{ar} = \text{Volume de ar incorporado, } \rho = \text{massa específica real, } a/c = \text{relação água/cimento.}$$

Nº Artigo	Fonte	Tipo de RBRO (Comp. Química)	Tipo cimento	Nome do traço	CP(kg)	RBRO (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Aditivo (kg)	Água (kg)	Res. Comp. 28 (Mpa)	Res. Tração 28 (Mpa)	Res. Flex. 28 (Mpa)	Controle (C); Substituição (S); Adição (A)/ Cimento (Cim); Areia (Are)	
Concreto convencional (1 m³)														% RBRO	
5	Gonçalves, Moura e Dal Molin (2002)	Granito (59,6% SiO ₂ ; 12,7% Al ₂ O ₃ ; 4,8% CaO; 9,5% Fe ₂ O ₃)	CP I	REF 0.4	480,0	0,0	638,4	1113,6	0,0	192,0	31,1	4,4	8,2	0%	C [1]
				REF 0.55	347,0	0,0	763,4	1110,4	0,0	190,9	21,4	3,4	6,1	0%	C [2]
				REF 0.7	271,0	0,0	832,0	1103,0	0,0	189,7	18,1	2,5	4,1	0%	C [3]
				10%RCG 0.4	491,0	49,1	549,9	1139,1	0,0	196,4	35,4	4,5	8,9	10%	A: Cim [1]
				10%RCG 0.55	360,0	36,0	705,6	1148,4	0,0	198,0	23,6	3,7	5,7	10%	A: Cim [2]
				10%RCG 0.7	277,0	27,7	772,8	1124,6	0,0	193,9	19,0	2,8	5,2	10%	A: Cim [3]
				20%RCG 0.4	505,0	101,0	459,6	1151,4	0,0	202,0	35,8	4,2	9,1	20%	A: Cim [1]
				20%RCG 0.55	364,0	72,8	615,2	1146,6	0,0	200,2	26,3	3,3	5,9	20%	A: Cim [2]
				284,0	56,8	707,2	1136,0	0,0	198,8	20,9	2,6	5,5	20%	A: Cim [3]	
6	Rana, Kalla e Csetenyi (2015)	Granito com Mármore (42,1% CaO; 44,1% SiO ₂ ; 2,2% Al ₂ O ₃ ; 2,98% Fe ₂ O ₃)	CP I - S	R1	405,0	0,0	579,2	1093,5	6,1	153,9	43,0	-	6,6	0%	C [4]
				R2	384,8	20,3	579,2	1093,5	6,1	153,9	42,4	-	6,3	5%	S: Cim [4]
				R3	364,5	40,5	579,2	1093,5	6,1	153,9	41,1	-	6,2	10%	S: Cim [4]
				R4	344,3	60,8	579,2	1093,5	7,3	153,9	38,5	-	5,4	15%	S: Cim [4]
				R5	324,0	81,0	579,2	1093,5	7,3	153,9	36,5	-	5,1	20%	S: Cim [4]
				R6	303,8	101,3	579,2	1093,5	7,3	153,9	35,4	-	5,0	25%	S: Cim [4]
7	Bacarji et al. (2013)	Granitos - 3 tipos (54,1 a 58,7% SiO ₂ ; 9,7 a 11,3% Al ₂ O ₃ ; 5,9 a 7,6% Fe ₂ O ₃ ; 6,1 a 13% CaO)	CPII F-32	0.5; 0%	450,0	0,0	699,3	937,9	0,0	225,0	33,0	-	-	0%	C [5]
				0.5; 5%	427,5	22,5	699,3	937,9	0,0	225,0	32,0	-	-	5%	S: Cim [5]
				0.5; 10%	405,0	45,0	699,3	937,9	0,0	225,0	28,0	-	-	10%	S: Cim [5]
				0.5; 20%	360,0	90,0	699,3	937,9	0,0	225,0	22,0	-	-	20%	S: Cim [5]
				0.65; 0%	346,0	0,0	770,7	953,5	0,0	225,0	22,0	-	-	0%	C [6]
				0.65; 5%	328,7	17,3	770,7	953,5	0,0	225,0	21,0	-	-	5%	S: Cim [6]
				0.65; 10%	311,0	35,0	770,7	953,5	0,0	225,0	18,5	-	-	10%	S: Cim [6]
				0.65; 20%	277,0	69,0	770,7	953,5	0,0	225,0	16,5	-	-	20%	S: Cim [6]
8	Ergün (2011)	Mármore (51,7% CaO; 0,2% SiO ₂ ; 0,7% Al ₂ O ₃ ; 0,1% Fe ₂ O ₃)	CP V - ARI	Control	300,0	0,0	820,0	1213,7	3,0	150,0	35,4	-	5,7	0%	C [7]
				M5	285,0	15,0	820,0	1213,7	3,0	150,0	39,4	-	6,0	5%	S: Cim [7]
				M7.5	277,5	22,5	820,0	1213,7	3,0	150,0	39,9	-	5,6	7,5%	S: Cim [7]
				M10	270,0	30,0	820,0	1213,7	3,0	150,0	31,1	-	5,1	10%	S: Cim [7]
Concreto de Alto Desempenho (1 m³)														% RBRO	
9	Almeida et al. (2007)	Mármore (54,3% CaO; 0,9% SiO ₂ ; 3,7% Al ₂ O ₃ ; 0,4% Fe ₂ O ₃)	CP II - F	CMSD0	401,0	0,0	726,0	1071,0	6,0	142,5	85,1	4,2	-	0%	C [1]
				CMSD5	405,0	38,0	696,0	1080,0	6,2	135,5	91,1	4,8	-	5%	S: Are[1]
				CMSD10	406,0	77,0	661,0	1085,0	6,1	132,0	79,4	4,2	-	10%	S: Are[1]
				CMSD15	401,0	114,0	617,0	1071,0	6,0	142,5	79,5	4,3	-	16%	S: Are[1]
				CMSD20	395,0	152,0	568,0	1054,0	6,0	155,9	77,5	4	-	21%	S: Are[1]
				CMSD34	388,0	256,0	458,0	1037,0	5,8	169,0	60,8	3,3	-	36%	S: Are[1]
				CMSD67	381,0	489,0	225,0	1017,0	5,8	184,6	58,2	3,2	-	68%	S: Are[1]
				CMSD100	379,0	716,0	0,0	1013,0	5,7	187,8	50,3	3	-	100%	S: Are[1]

Nº Artigo	Fonte	Tipo de RBRO (Comp. Química)	Tipo cimento	Nome do traço	CP(kg)	RBRO (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Pó de pedra (kg)	Aditivo (kg)	Água (kg)	Res. Comp. 28 (Mpa)	Res. Tração 28 (Mpa)	Res. Flex. 28 (Mpa)	Res. Abrasão ³	Controle (C); Substituição (S); Adição (A)/ Cimento (Cim); Areia (Are)	
Concreto Autoadensável (1 m³)																% RBRO	
10	Calmon et al. (2005)	-	CP 40 III RS	MGSW	430,0	190,0	826,0	790,0	0,0	6,8	150,0	69,3	-	-	-	31%	C [1]
11	Sadek, El-Attar e Ali (2016)	Granito (1,2% CaO; 72,9% SiO ₂ ; 13,4% Al ₂ O ₃ ; 1,1% Fe ₂ O ₃)	CP I - S	C1	400,0	0,0	900,0	900,0	0,0	8,0	180,0	36,0	2,7	8,7	-	0%	C [2]
				C2	600,0	0,0	817,0	817,0	0,0	8,0	180,0	61,8	4,8	13,5	-	0%	C [3]
				20% GP	400,0	80,0	860,0	860,0	0,0	8,0	180,0	36,5	-	-	-	20%	A: Cim [2]
				30% GP	400,0	120,0	841,0	841,0	0,0	8,0	180,0	38,8	-	-	-	30%	A: Cim [2]
				40% GP	400,0	160,0	821,0	821,0	0,0	8,0	180,0	44,3	-	-	-	40%	A: Cim [2]
12	Gesoglu et al. (2012)	Mármore (52,4% CaO; 1,3% SiO ₂ ; 0,4% Al ₂ O ₃ ; 0,8% Fe ₂ O ₃)	CP V - ARI	PC	520,0	0,0	717,0	953,0	0,0	12,8	182,0	59,0	3,9	-	-	0%	C [4]
				5M	494,0	26,0	716,0	951,0	0,0	13,9	182,0	56,0	3,5	-	-	5%	S: Cim [4]
				10M	468,0	52,0	714,0	949,0	0,0	15,1	182,0	54,5	3,8	-	-	10%	S: Cim [4]
				20M	416,0	104,0	710,0	945,0	0,0	15,8	182,0	52,5	3,7	-	-	20%	S: Cim [4]
13	Uysal e Sumer (2011)	Mármore (55,5% CaO; 0,7% SiO ₂ ; 0,3% Al ₂ O ₃ ; 0,1% Fe ₂ O ₃)	CP I - S	Control	550,0	0,0	869,0	778,0	0,0	8,8	182,0	75,9	-	-	-	0%	C [5]
				MP10	495,0	55,0	867,0	777,0	0,0	8,8	182,0	76,3	-	-	-	10%	S: Cim [5]
				MP20	440,0	110,0	865,0	774,0	0,0	8,8	182,0	77,5	-	-	-	20%	S: Cim [5]
				MP30	385,0	165,0	863,0	775,0	0,0	8,8	182,0	70,8	-	-	-	30%	S: Cim [5]
Bloco de vedação (1 m³)																% RBRO	
14	Moura et al. (2006a) ^{2,4}	Granito c/ granalha (58,7% SiO ₂ ; 2,5% CaO; 8,7% Al ₂ O ₃ ; 7,2% Fe ₂ O ₃)	CP II E 40	VREF	250,3	0,0	600,7	0,0	1401,5	0,0	191,5	3,2	-	-	-	0%	C [1]
				V5%PA	237,7	12,5	600,5	0,0	1401,1	0,0	191,4	3,8	-	-	-	5%	S: Cim [1]
				V10%PA	225,1	25,0	600,3	0,0	1400,6	0,0	191,3	3,2	-	-	-	10%	S: Cim [1]
				V15%PA	212,5	37,5	600,1	0,0	1400,2	0,0	191,3	2,8	-	-	-	15%	S: Cim [1]
15	Moura e Leite (2011) ^{2,4}	Mármore c/ granalha (79,1% CaO; 5,9% SiO ₂ ; 1,2% Al ₂ O ₃ ; 9,1% Fe ₂ O ₃)	CP II F 32	REF	245,9	0,0	983,7	0,0	983,7	0,0	162,3	2,7	-	-	-	0%	C [2]
				0,05	233,5	12,3	983,2	0,0	983,2	0,0	162,2	2,7	-	-	-	5%	S: Cim [2]
				0,1	221,1	24,6	982,7	0,0	982,7	0,0	162,1	2,8	-	-	-	10%	S: Cim [2]
				0,15	208,7	36,8	982,1	0,0	982,1	0,0	162,1	3,0	-	-	-	15%	S: Cim [2]
Bloco de pavimentação (1 m³)																% RBRO	
16	Moura et al. (2006b) ^{2,4}	Granito s/ granalha (UFES) (67,4% SiO ₂ ; 2,54% CaO; 7,7% Al ₂ O ₃ ; 1,1% Fe ₂ O ₃); Mármore s/ granalha (UEFS) (86,8% CaO; 6,9% SiO ₂ ; 1,3% Al ₂ O ₃ ; 0,5% Fe ₂ O ₃)	CP II E 32	PREF-UFES	462,4	0,0	388,4	906,2	554,8	0,0	175,7	39,9	-	-	8,80	0%	C [1]
				P5%FD-UFES	439,0	23,1	388,2	905,7	554,5	0,0	175,6	44,3	-	-	9,10	5%	S: Cim [1]
				P10%FD-UFES	415,6	46,2	387,9	905,1	554,2	0,0	175,5	41,1	-	-	9,00	10%	S: Cim [1]
			CP II F 32	P15%FD-UFES	392,3	69,2	387,7	904,6	553,8	0,0	175,4	35,5	-	-	7,20	15%	S: Cim [1]
				PREF-UEFS	441,5	0,0	706,3	529,7	529,7	0,0	185,4	36,4	-	-	7,00	0%	C [2]
				P5%FD-UEFS	419,0	22,1	705,7	529,2	529,2	0,0	185,2	40,5	-	-	5,90	5%	S: Cim [2]
				P10%FD-UEFS	396,6	44,1	705,0	528,7	528,7	0,0	185,1	41,3	-	-	5,40	10%	S: Cim [2]
17	Mashaly et al. (2016)	Mármore (55,3% CaO; 0,1% SiO ₂ ; 0,1% Al ₂ O ₃ ; 0,1% Fe ₂ O ₃)	CP I - S	MC-0	350,0	0,0	700,00	1180,0	0,0	0,0	157,50	33,4	-	3,6	0,11	0%	C [3]
				MC-10	315,0	35,0	695,00	1175,0	0,0	0,0	158,00	34,3	-	4,2	0,10	10%	S: Cim [3]
				MC-20	280,0	70,0	682,00	1163,0	0,0	0,0	159,00	36,6	-	4,4	0,09	20%	S: Cim [3]
				MC-30	245,0	105,0	670,00	1150,0	0,0	0,0	162,00	28,7	-	3,3	0,13	30%	S: Cim [3]
				MC-40	210,0	140,0	660,00	1140,0	0,0	0,0	164,00	26,4	-	2,4	0,14	40%	S: Cim [3]

³ Perda de volume. Quanto menor o valor, mais resistente à abrasão.

⁴ Na falta de dados nestes artigos, ou devido à inconsistência dos mesmos, utilizou-se como fonte o relatório final de pesquisa (MOURA *et al.* 2007).

Nº Artigo	Fonte	Tipo de RBRO (Comp. Química)	Tipo cimento	Nome do traço	CP(kg)	RBROTT (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Res. Comp. 28 (Mpa)	Carga passante 28 (C)	Coef. Difusão estacionário - Ds (cm²/s)	Penetração de cloretos 28 (mm)	Despassivação da armadura (dias)	Controle (C); Substituição (S); Adição (A)/ Cimento (Cim); Areia (Are)		
Argamassa com RBROTT (1 m³)															% RBROTT		
18	Uliana et al. (2015) ²	Resíduo de Granito Tratado termicamente c/granalha (62,9% SiO ₂ ; 24,8% Al ₂ O ₃ ; 4,6% Fe ₂ O ₃ ; 2,8% CaO); s/granalha (64,6% SiO ₂ ; 22,1% Al ₂ O ₃ ; 1,5% Fe ₂ O ₃ ; 2,6% CaO)	CPV-ARI	AREF	491,1	0,0	1473,3	0,0	245,6	55,2	-	-	-	-	0%	C [1]	
				ALGf 5	469,8	20,2	1469,9	0,0	245,0	53,9	-	-	-	-	-	4%	S: Cim [1]
				ALGf 10	448,4	40,6	1467,1	0,0	244,5	50,8	-	-	-	-	-	8%	S: Cim [1]
				ALGf 15	427,5	61,5	1467,0	0,0	244,5	51,1	-	-	-	-	-	13%	S: Cim [1]
				ALGf 20	404,5	82,4	1460,8	0,0	243,5	46,9	-	-	-	-	-	17%	S: Cim [1]
				ALDf 5	470,1	19,2	1468,0	0,0	244,7	51,5	-	-	-	-	-	4%	S: Cim [1]
				ALDf 10	450,2	38,9	1467,3	0,0	244,6	50,5	-	-	-	-	-	8%	S: Cim [1]
				ALDf 15	428,7	58,8	1462,6	0,0	243,8	47,4	-	-	-	-	-	12%	S: Cim [1]
ALDf 20	401,8	78,1	1439,8	0,0	240,0	46,6	-	-	-	-	-	16%	S: Cim [1]				
Concreto com RBROTT (1 m³)															% RBROTT		
19	Mittri (2016)	Resíduo de Granito Tratado termicamente (67,1% SiO ₂ ; 23,4% Al ₂ O ₃ ; 2,6% CaO; 1,5% Fe ₂ O ₃)	CPV-ARI	1 - Ref 0,4	499,2	0,0	654,0	1108,2	199,7	55,2	3699,0	1,64E-08	20,05	-	0%	C [1]	
				2 - Ref 0,6	296,0	0,0	855,5	1107,2	177,6	40,4	4581,0	3,70E-08	33,38	-	0%	C [2]	
				3 - 5% 0,4	488,3	24,4	639,6	1084,0	195,3	60,5	3609,0	2,15E-08	17,67	-	5%	A: Cim [1]	
				4 - 5% 0,6	294,1	14,7	849,9	1099,9	176,5	48,2	3753,0	2,69E-08	22,33	-	5%	A: Cim [2]	
				5 - 10% 0,4	488,1	48,8	639,4	1083,6	195,2	63,1	3465,0	1,35E-08	12,64	-	10%	A: Cim [1]	
				6 - 10% 0,6	292,8	29,3	846,2	1095,1	175,7	50,0	2596,5	2,19E-08	16,39	-	10%	A: Cim [2]	
20	Degen (2017)	Resíduo de Granito Tratado termicamente (67,1% SiO ₂ ; 23,4% Al ₂ O ₃ ; 2,6% CaO; 1,5% Fe ₂ O ₃)	CPV-ARI	Ref 0,5	381,0	0,0	784,9	1120,1	190,5	53,2	-	-	-	126	0%	C [3]	
				A10 0,5	370,0	37,0	762,2	1087,8	185,0	57,2	-	-	-	161	10%	A: Cim [3]	
				A15 0,5	368,0	55,2	758,1	1081,9	184,0	54,2	-	-	-	189	15%	A: Cim [3]	
				A20 0,5	365,0	73,0	751,9	1073,1	182,5	59,8	-	-	-	182	20%	A: Cim [3]	
				S10 0,5	340,0	37,8	778,6	1111,8	170,0	50,2	-	-	-	133	10%	S: Cim [3]	
				S15 0,5	321,0	56,6	776,8	1110,7	160,5	49,2	-	-	-	140	15%	S: Cim [3]	
				S20 0,5	308,0	77,0	794,6	1133,4	154,0	47,1	-	-	-	161	20%	S: Cim [3]	
				REF 0,65	265,0	0,0	882,5	1102,4	172,3	40,8	-	-	-	126	0%	C [4]	
				A10 0,65	264,0	26,4	879,1	1098,2	171,6	43,5	-	-	-	161	10%	A: Cim [4]	
				A15 0,65	263,0	39,5	875,8	1094,1	171,0	42,1	-	-	-	189	15%	A: Cim [4]	
				A20 0,65	262,0	52,4	872,5	1089,9	170,3	46,1	-	-	-	182	20%	A: Cim [4]	
				S10 0,65	243,0	27,0	887,0	1110,5	158,0	37,9	-	-	-	133	10%	S: Cim [4]	
S15 0,65	230,0	40,6	887,8	1113,2	149,5	36,7	-	-	-	140	15%	S: Cim [4]					
S20 0,65	220,0	55,0	904,2	1133,0	143,0	35,4	-	-	-	161	20%	S: Cim [4]					

APÊNDICE B – Inventário do ciclo de vida.

Processo principal	Tipo do fluxo	Fluxo	Quantidade	Un.	Fonte para a quantidade dos fluxos	CF	IT	TP	GG	TC
Cimento (1 kg)	Materiais	Clínquer	Variável	kg	Norma brasileira de cimentos - ABNT ¹	4	1	2	2	3
		Gesso	Variável	kg	Norma brasileira de cimentos	4	1	2	2	3
		Fíler Calcário	Variável	kg	Norma brasileira de cimentos	4	1	2	2	3
		Escória	Variável	kg	Norma brasileira de cimentos	4	1	2	2	3
	Energia/	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	0,0555	kWh	EPE (2016) [0.111 (total) dividido por dois]	4	1	1	2	5
	Processamento	Embalagem (<i>Packing, cement [GLO]</i>)	1	kg	Ecoinvent 3.3 - Kellenberguer et al. (2007)	5	5	5	5	3
Emissões	Particulados (<i>Particulates, SPM</i>)	0,09	g	Estimativa. Limite CONAMA (BRASIL, 2011), planta padrão	4	1	2	2	5	
Clínquer (1 kg)	Materiais	Calcário, britado	1,3	kg	MCTIC (2016)	4	1	1	2	3
		Argila	0,2	kg	Carvalho (2009)	5	5	3	2	3
		Areia	0,1	kg	Carvalho (2009)	5	5	3	2	3
		Minério de ferro	0,03	kg	Carvalho (2009)	5	5	3	2	3
	Energia	Coque de petróleo [33MJ/kg] (<i>Petroleum coke [USLCI]</i>) ²	101,08	g	Vieira et al. 2017. Estimativa baseada em EPE (2016)	4	1	1	2	3
		Carvão vegetal [31MJ/kg] (<i>Charcoal</i>)	3,46	g	Vieira et al. 2017. Estimativa baseada em EPE (2016)	4	1	1	2	3
		Carvão mineral [20 MJ/kg] (<i>Hard coal</i>)	3,45	g	Vieira et al. 2017. Estimativa baseada em EPE (2016)	4	1	1	2	3
		Lenha [15MJ/kg] (<i>Bundle, energy wood</i>)	4,6	g	Vieira et al. 2017. Estimativa baseada em EPE (2016)	4	1	1	2	3
		Óleo diesel (<i>Diesel, burned in build. machine</i>)	59,1	kJ	Vieira et al. 2017. Estimativa baseada em EPE (2016)	4	1	1	2	3
		Gás natural [36MJ/m ³] (<i>Natural Gas</i>)	0,33	dm ³	Vieira et al. 2017. Estimativa baseada em EPE (2016)	4	1	1	2	3
		Óleo combustível [40 MJ/kg] (<i>Heavy fuel oil</i>)	0,22	g	Vieira et al. 2017. Estimativa baseada em EPE (2016)	4	1	1	2	3
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	0,0555	kWh	EPE (2016) [0.111 (total) dividido por dois]	4	1	1	2	5
	Emissões	Dióxido de carbono (<i>Carbon dioxide</i>)	0,947	kg	MCTIC (2016)	4	1	1	2	3
		Monóxido de carbono (<i>Carbon monoxide</i>)	0,47	g	Ecoinvent 3.3 - Künniger et al. (2001) apud Kellenberguer et al. (2007)	1	5	5	5	5
		Óxidos de nitrogênio (<i>Nitrogen oxides</i>)	2,17	g	Estimativa. Limite CONAMA (BRASIL, 2011), planta padrão	4	1	2	2	3
		Óxidos de enxofre (<i>Sulfur oxides</i>)	0,32	g	Carvalho (2002)	4	5	4	3	3
Particulados (<i>Particulates, SPM</i>)		0,16	g	Estimativa. Limite CONAMA (BRASIL, 2011), planta padrão	4	2	2	3	3	
Fíler calcário (1 kg)	Materiais	Calcário, britado	1	kg	Sem perdas assumidas	4	4	1	1	1
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	0,06334	kWh	Estimativa para empresa visitada [Brasil - ES]	4	4	3	1	1

Legenda: CF – Confiabilidade; IT – Integridade; TP – Representatividade temporal; GG – Geográfica; TC – Tecnológica.

¹ Ver Tabela 3 com a composição dos diferentes cimentos.

² O inventário do USLCI foi utilizado, ao invés do Ecoinvent, devido aos valores de energia incorporada do Ecoinvent não considerarem o poder calorífico do coque de petróleo.

Processo principal	Tipo do fluxo	Fluxo	Quantidade	Un.	Fonte para a quantidade dos fluxos	CF	IT	TP	GG	TC
Calcário, britado (1 kg)	Materiais	Calcário, bruto	1	kg	Sem perdas assumidas	5	4	1	1	1
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	0,000255	kWh	Ecoinvent 3.3 (CA-QC) - Martineau (2014b)	1	5	2	5	3
		Óleo diesel (<i>Diesel, burned in build. machine</i>)	0,0034	MJ	Ecoinvent 3.3 (CA-QC) - Martineau (2014b)	1	5	2	5	3
	Emissões	Particulados (<i>Particulates</i>), < 2.5 um	1,75E-05	kg	Ecoinvent 3.3 (CA-QC) - Martineau (2014b)	1	5	2	5	3
		Particulados (<i>Particulates</i>), > 2.5 um, and < 10um	7,51E-05	kg	Ecoinvent 3.3 (CA-QC) - Martineau (2014b)	1	5	2	5	3
Particulados (<i>Particulates</i>), > 10 um		0,000148	kg	Ecoinvent 3.3 (CA-QC) - Martineau (2014b)	1	5	2	5	3	
Calcário, bruto (1kg)	Materiais	Calcita (<i>Calcite, from nature</i>)	1	kg	Sem perdas assumidas	4	4	1	1	1
	Solo	Água (<i>Water, unspecified natural origin, BR</i>)	2,14E-02	dm ³	Ecoinvent 3.3 - Kellenberguer et al. (2007)	3	5	5	5	3
		Ocupação (<i>Occupation, mineral extraction site</i>)	1,34E-03	m ² a	Ecoinvent 3.3 (CA-QC) - Martineau (2014a)	2	5	2	5	3
	Energia/ Processamento	Desmonte por explosivo (<i>Blasting</i>)	1,82E-05	kg	Ecoinvent 3.3 (CA-QC) - Martineau (2014a)	2	5	2	5	3
		Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	2,73E-05	kWh	Ecoinvent 3.3 (CA-QC) - Martineau (2014a)	1	5	2	5	3
		Óleo diesel (<i>Diesel, burned in build. machine</i>)	0,0333	MJ	Ecoinvent 3.3 (CA-QC) - Martineau (2014a)	1	5	2	5	3
	Emissões	Água evaporada (<i>Water, to air</i>)	2,14E-02	dm ³	Ecoinvent 3.3 - Kellenberguer et al. (2007)	3	5	5	5	3
		Particulados (<i>Particulates</i>), < 2.5 um	6,08E-06	kg	Ecoinvent 3.3 (CA-QC) - Martineau (2014a)	1	5	2	5	3
		Particulados (<i>Particulates</i>), > 2.5 um, and < 10um	5,89E-05	kg	Ecoinvent 3.3 (CA-QC) - Martineau (2014a)	1	5	2	5	3
	Particulados (<i>Particulates</i>), > 10 um	0,000159	kg	Ecoinvent 3.3 (CA-QC) - Martineau (2014a)	1	5	2	5	3	
Argila (1 kg)	Materiais	Mineral argila (<i>Clay, from nature</i>)	1	kg	MME (2009a) - Perfil da argila	5	1	1	1	1
	Solo	Ocupação (<i>Occupation, mineral extraction site</i>)	1,67E-04	m ² a	Ecoinvent 3.3 - Kellenberguer et al. (2007)	5	2	5	5	3
	Energia	Óleo diesel (<i>Diesel, burned in build. machine</i>)	0,0288	MJ	MME (2009a) - Perfil da argila	4	1	3	1	1
Gesso (<i>Gypsum, mineral {RoW}</i>)	Variados	Variados [Inventário não modificado]	-	-	Ecoinvent 3.3 - Kellenberguer et al. (2007)					-
Escória (<i>Ground granulated blast furnace slag {RoW}</i>)	Variados	Variados [inventário não modificado]	-	-	Ecoinvent 3.3 - Marceau and Vangeem (2003)					-
Minério de ferro (<i>Iron ore, crude ore, 46% Fe {GLO}</i>)	Variados	Variados [Inventário não modificado]	-	-	Ecoinvent 3.3					-
Cal hidratada (1 kg)	Materiais	Cal virgem	0,757	kg	Balaço de massa molar	3	5	1	1	1
		Água de poço (<i>Water, well, BR</i>)	0,243	dm ³	Balaço de massa molar	3	5	1	1	1
	Energia/ Processamento	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	0,0321	kWh	Ecoinvent 3.3 (CA-QC) - Martineau (2014d)	1	5	2	5	3
		Embalagem (<i>Packing, lime product {GLO}</i>)	1	kg	Ecoinvent 3.3 - Kellenberguer et al. (2007)	5	5	5	5	3

Processo principal	Tipo do fluxo	Fluxo	Quantidade	Un.	Fonte para a quantidade dos fluxos	CF	IT	TP	GG	TC	
Cal virgem (1 kg)	Materiais	Calcário, britado	1,78	kg	Balaço de massa molar	3	5	1	1	1	
		Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	0,0438	kWh	Ecoinvent 3.3 (CA-QC) - Martineau (2014)	2	5	3	5	3	
	Energia	Óleo diesel (<i>Diesel, burned in build. machine</i>)	0,0148	MJ	Ecoinvent 3.3 (CA-QC) - Martineau (2014c)	1	5	3	5	3	
		Coque de petróleo [33MJ/kg] (<i>Petroleum coke [USLCI]</i>) ²	39,00	g	MME (2009b) - Perfil do cal	4	5	2	2	3	
		Carvão vegetal [31MJ/kg] (<i>Charcoal</i>)	13,84	g	MME (2009b) - Perfil do cal	4	5	2	2	3	
		Lenha [15MJ/kg] (<i>Bundle, energy wood</i>)	57,20	g	MME (2009b) - Perfil do cal	4	5	2	2	3	
		Gás natural [36MJ/m ³] (<i>Natural Gas</i>)	23,83	dm ³	MME (2009b) - Perfil do cal	4	5	2	2	3	
		Óleo combustível [40 MJ/kg] (<i>Heavy fuel oil</i>)	21,45	g	MME (2009b) - Perfil do cal	4	5	2	2	3	
		Emissões	Dióxido de carbono (<i>Carbon dioxide</i>)	1,141	kg	Balanco de massa molar; MME (2009b) - Perfil do cal	4	5	2	2	3
	Monóxido de carbono (<i>Carbon monoxide</i>)		0,208	kg	Ecoinvent 3.3 (CA-QC) - Martineau (2014c)	1	5	2	5	3	
	Óxidos de nitrogênio (<i>Nitrogen oxides</i>)		1,61	g	Ecoinvent 3.3 (CA-QC) - Martineau (2014c)	1	5	2	5	3	
	Óxidos de enxofre (<i>Sulfur oxides</i>)		1,99	g	Ecoinvent 3.3 (CA-QC) - Martineau (2014c)	1	5	2	5	3	
	Particulados (<i>Particulates</i>), < 2.5 um		0,0066	g	Ecoinvent 3.3 (CA-QC) - Martineau (2014c)	1	5	2	5	3	
	Particulados (<i>Particulates</i>), > 2.5 um, and < 10um		0,00194	g	Ecoinvent 3.3 (CA-QC) - Martineau (2014c)	1	5	2	5	3	
Particulados (<i>Particulates</i>), > 10 um	0,00169		g	Ecoinvent 3.3 (CA-QC) - Martineau (2014c)	1	5	2	5	3		
Areia (1 kg)	Materiais	Areia quartzosa (<i>Sand, quartz</i>)	1	kg	Sem perdas assumidas	4	4	2	3	3	
	Solo	Ocupação (<i>Occupation, mineral extraction site</i>)	1,25E-03	m ² a	Estimativa	5	5	1	3	3	
	Energia	Óleo diesel (<i>Diesel, burned in build. machine</i>)	0,0609	MJ	Valor médio de três estudos (Souza, 2012; Marinkovic 2008; Hossain 2016)	2	5	3	3	3	
Brita/pó de pedra ³ (1 kg)	Materiais	Granito (<i>Granite</i>)	1,05	kg	Rosado et al. 2017.	4	5	1	3	2	
		Água de poço (<i>Water, from well, BR</i>)	8,07E-03	dm ³	Rosado et al. 2017.	1	5	1	3	2	
	Energia	Solo	Ocupação (<i>Occupation, mineral extraction site</i>)	1,34E-03	m ² a	Aproximado pelo valor do calcário bruto	2	5	2	5	4
		Desmonte por explosivo (<i>Blasting</i>)	1,45E-04	kg	Rosado et al. 2017.	1	5	1	3	2	
		Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	3,72E-03	kWh	Rosado et al. 2017.	2	5	1	3	2	
		Óleo diesel (<i>Diesel, burned in build. machine</i>)	8,28E-03	MJ	Rosado et al. 2017.	2	5	1	3	2	
		Óleo lubrificante (<i>Lubricating oil</i>)	6,00E-03	g	Rosado et al. 2017.	1	5	1	3	2	
		Transporte interno (<i>lorry 16-32 metric ton, EURO3</i>)	1	kgkm	Rosado et al. 2017.	1	5	1	3	2	
		Emissões	Particulados (<i>Particulates</i>), < 2.5 um	6,08E-06	kg	Aproximado pelo valor do calcário bruto	2	5	2	5	4
	Particulados (<i>Particulates</i>), > 2.5 um, and < 10um		5,89E-05	kg	Aproximado pelo valor do calcário bruto	2	5	2	5	4	
Particulados (<i>Particulates</i>), > 10 um	1,59E-04		kg	Aproximado pelo valor do calcário bruto	2	5	2	5	4		
Aditivo/Superplastificante	Variados	Variados [Inventário não modificado]	-	-	EFCA (2002)	-	-	-	-	-	
Água potável (<i>Tap water {GLO}</i>)	Variados	Variados [Inventário não modificado]	-	-	Ecoinvent 3.3	-	-	-	-	-	

³ Considerou-se alocação em massa para toda a produção de agregados britados. Sendo assim, ainda que a entrada de 1 t de rocha bruta tenha saídas de diferentes granulometrias e quantidades de brita e pó de pedra, a produção de 1 t de brita e 1 t de pó de pedra possui o mesmo inventário.

Processo principal	Tipo do fluxo	Fluxo	Quantidade			Un.	Fonte para a quantidade dos fluxos	CF	IT	TP	GG	TC
RBROTT (1 kg)	Material	RBRO (seco ao ar livre)	1,04			kg	Estimativa, baseado na CTR AAMOL	3	4	1	1	1
		Energia de referência para estimativa dos combustíveis abaixo	4	3	5	MJ	Estimativa, consumo projetado	5	5	1	5	4
	Energia térmica	Coque de petróleo [33MJ/kg] (Petroleum coke [USLCl]) ²	99,34	74,51	124,18	g	Aproximado pela energia térmica da produção do clínquer	5	5	1	2	4
		Carvão vegetal [31MJ/kg] (Charcoal)	3,40	2,55	4,25	g		5	5	1	2	4
		Carvão mineral [20 MJ/kg] (Hard coal)	3,39	2,54	4,24	g		5	5	1	2	4
		Lenha [15MJ/kg] (Bundle, energy wood)	4,52	3,39	5,65	g		5	5	1	2	4
		Óleo diesel (Diesel, burned in build. machine)	58,08	43,56	72,60	kJ		5	5	1	2	4
		Gás natural [36MJ/m ³] (Natural Gas)	0,32	0,24	0,41	dm ³		5	5	1	2	4
		Óleo combustível [40 MJ/kg] (Heavy fuel oil)	0,22	0,16	0,27	g	5	5	1	2	4	
	Energia elétrica	Eletricidade (Electricity, medium voltage [BR])	0,06334	0,04751	0,07918	kWh	Aproximado pela moagem para produção do filer calcário	4	4	3	1	4
	Processamento	Embalagem (Packing, cement {GLO})	1			kg	Aproximado pela embalagem do cimento	5	5	5	5	4
	Emissões	Dióxido de carbono (Carbon dioxide)	0,370	0,277	0,462	kg	Aproximado pelas emissões específicas do clínquer	5	5	1	2	4
		Monóxido de carbono (Carbon monoxide)	0,46	0,35	0,58	g		5	5	5	5	5
		Óxidos de nitrogênio (Nitrogen oxides)	2,13	1,60	2,67	g		5	5	2	2	4
		Óxidos de enxofre (Sulfur oxides)	0,31	0,24	0,39	g		5	5	4	3	4
Particulados (Particulates, SPM)		0,16	0,12	0,20	g	5		5	2	3	4	
	Água evaporada (water, to air)	0,04			dm ³	Estimativa	5	4	1	1	1	

Processo principal	Tipo do fluxo	Fluxo	Quantidade	Un.	Fonte para a quantidade dos fluxos	CF	IT	TP	GG	TC
RBRO, secador rotativo (1 kg)	Materiais	RBRO (seco ao ar livre)	1,04	kg	Estimativa	3	4	1	1	1
	Energia	Calor, gás natural (<i>Heat, natural gas, at industrial furnace >100kW</i>)	0.276 [0.16; 0.43]	MJ	Estimativa, baseado em Mujumdar (2014). [Sensibilidade: Otimista (--25%) ; Pessimista (++25%)]	5	4	1	5	4
	Emissões	Água evaporada (<i>water, to air</i>)	0,04	dm ³	Estimativa	3	4	1	1	1
RBRO, secador spray (1 kg)	Materiais	RBRO, torta (filtro prensa)	1,15	kg	Estimativa	3	4	1	1	1
	Energia	Calor, gás natural (<i>Heat, natural gas, at industrial furnace >100kW</i>)	1.2 [0.68; 1.88]	MJ	Estimativa, baseado em Mujumdar (2014). [Sensibilidade: Otimista (--25%) ; Pessimista (++25%)]	5	4	1	5	4
	Emissões	Água evaporada (<i>water, to air</i>)	0,15	dm ³	Estimativa	3	4	1	1	1
RBRO (seco ao ar livre) (1 kg)	Materiais	RBRO, torta (filtro prensa)	1,106	kg	Estimativa	3	4	1	1	1
	Energia	Máquina (<i>Machine operation, diesel, 18.64 to 74.57 kW, high-load</i>)	0,04	s	Estimativa	4	4	1	1	4
	Emissões	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	0,000156	kWh	Estimativa, baseado em Jarfel (2017)	5	4	1	1	4
	Emissões	Água evaporada (<i>water, to air</i>)	0,106	dm ³	Estimativa	3	4	1	1	1
RBRO, torta (filtro prensa) (1 kg)	Transporte	Transporte interno (<i>lorry 16-32 metric ton, EURO3</i>)	1,5	kgkm	Estimativa, baseado na CTR AAMOL	3	4	1	1	1
	Materiais	RBRO, lama	1,478	kg	Estimativa, baseado na CTR AAMOL	3	4	1	1	1
	Materiais	Água recuperada, retorna para beneficiamento (<i>Water, well, BR</i>)	-0,478	dm ³	Estimativa, baseado na CTR AAMOL	3	4	1	1	1
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	0,000592	kWh	Estimativa, baseado na CTR AAMOL	3	4	1	1	1
Concreteira (1 m ³ de concreto)	Solo	Ocupação de aterro evitada (<i>Occupation, dump site</i>)	-5,21E-04	m2a	Estimativa, baseado na CTR AAMOL	4	4	1	1	1
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	5,05	kWh	Bushi, Finlayson e Meil (2014)	1	1	1	5	2
Argamassa industrializada (1 m ³)	Energia	Óleo diesel (<i>Diesel, burned in build. machine</i>)	26,73	MJ	Bushi, Finlayson e Meil (2014)	1	2	1	5	2
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	6,768	kWh	Estimativa para empresa visitada [Brasil - ES]	2	4	1	1	1
Argamassadeira (1 m ³)	Processamento	Embalagem (<i>Packing, cement {GLO}</i>)	1,700	t	Aproximado pela embalagem do cimento. Não inclui energia, somente materiais da embalagem	5	5	5	5	4
Fábrica de blocos (1 m ³)	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	0,630	kWh	CSM (2018)	3	5	1	1	2
Fábrica de blocos (1 m ³)	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	14,6	kWh	Evangelista, Rosado e Penteado (2018)	2	5	1	3	3

APÊNDICE C – Formulários para coleta de dados de inventário.

CALCÁRIO			
Qtd.	Unid.	Processo	Observações
	ton/mês	Calcário Mineração	Valor médio mensal de rocha extraída na jazida em 2016 (média dos 12 meses)
	m ²	Área da jazida	
	anos	Vida útil estimada da jazida	Valor estimado
	m	Profundidade explorável da jazida	Valor médio
	t/m ³	Densidade da rocha extraída	Intervalo ou Valor médio
	ton/mês	Explosivos para detonação	Consumo médio mensal em 2016 (média dos 12 meses)
	l/mês	Diesel para transporte da jazida à fábrica	Consumo médio mensal em 2016 (média dos 12 meses)
	ton/mês	Calcário Britagem/ Etapa 1 de Cominuição	Valor médio mensal de calcário britado em 2016 (média dos 12 meses)
	h/mês	1º Britador. Tipo: Mandíbula	Valor médio mensal do tempo de funcionamento do britador em 2016 (média dos 12 meses)
	cv	Potência do 1º Britador	
	h/mês	2º Britador. Tipo: Mandíbula	Valor médio mensal do tempo de funcionamento do britador em 2016 (média dos 12 meses)
	cv	Potência do 2º Britador	
	ton/mês	Calcário Moagem/ Etapa 2 de Cominuição	Valor médio mensal de calcário moído em 2016 (12 meses)
	h/mês	Moinho 1. Tipo:	Valor médio mensal do tempo de funcionamento do moinho em 2016 (média dos 12 meses)
	cv	Potência do conjunto do moinho 1	
	h/mês	Moinho 2. Tipo:	Valor médio mensal do tempo de funcionamento do moinho em 2016 (média dos 12 meses)
	cv	Potência do conjunto do moinho 2	
	h/mês	Moinho 3. Tipo:	Valor médio mensal do tempo de funcionamento do moinho em 2016 (média dos 12 meses)
	cv	Potência do conjunto do moinho 3	
	h/mês	Moinho 4. Tipo:	Valor médio mensal do tempo de funcionamento do moinho em 2016 (média dos 12 meses)
	cv	Potência do conjunto do moinho 4	
	h/mês	Moinho 5. Tipo:	Valor médio mensal do tempo de funcionamento do moinho em 2016 (média dos 12 meses)
	cv	Potência do conjunto do moinho 5	
	h/mês	Moinho 6. Tipo:	Valor médio mensal do tempo de funcionamento do moinho em 2016 (média dos 12 meses)
	cv	Potência do conjunto do moinho 6	
	h/mês	Filtro de manga	Valor médio mensal do tempo de funcionamento do filtro em 2016 (média dos 12 meses)
	cv	Potência do filtro	
	h/mês	Outros motores (esteiras, dutos, etc.)	Valor médio mensal do tempo de funcionamento em 2016 (média dos 12 meses)
	cv	Soma da potência dos outros motores	
	ton/mês	Produção final/Vendas	Valor médio mensal de cada produto produzido em 2016 (média dos 12 meses)
	ton/mês	Areia média	Forma de saída final/venda: () Saco ___ kg ; () Big bag ___ kg Equipamentos de produção: Britador: ()1 () 2; Moinho: ()1 ()2 ()3 ()4 ()5 ()6 () filtro de manga
	ton/mês	Areia fina	Forma de saída final/venda: () Saco ___ kg ; () Big bag ___ kg Equipamentos de produção: Britador: ()1 () 2; Moinho: ()1 ()2 ()3 ()4 ()5 ()6 () filtro de manga
	ton/mês	Carbonato de Cálcio peneirado	Forma de saída final/venda: () Saco ___ kg ; () Big bag ___ kg Equipamentos de produção: Britador: ()1 () 2; Moinho: ()1 ()2 ()3 ()4 ()5 ()6 () filtro de manga
	ton/mês	Carbonato de Cálcio fino	Forma de saída final/venda: () Saco ___ kg ; () Big bag ___ kg Equipamentos de produção: Britador: ()1 () 2; Moinho: ()1 ()2 ()3 ()4 ()5 ()6 () filtro de manga
	ton/mês	Carbonato de Cálcio micronizado	Forma de saída final/venda: () Saco ___ kg ; () Big bag ___ kg Equipamentos de produção: Britador: ()1 () 2; Moinho: ()1 ()2 ()3 ()4 ()5 ()6 () filtro de manga
	h/mês	Ensacadeiras	Valor médio mensal do tempo de funcionamento das ensacadeiras em 2016 (média dos 12 meses)
	cv	Potência do motor da ensacadeira	
	kWh/mês	Consumo médio mensal de energia de toda a fábrica	(média dos 12 meses)

ARGAMASSA			
Qtd.	Unid.	Processo	Observações
		Argamassa Produção	<i>Dosagem e mistura dos insumos, e ensacamento da argamassa</i>
		Traço dos materiais - porcentagem relativa em massa	
	%	Cimento	<i>Tipo: CII, CP III</i>
	%	Cal	<i>Tipo:</i>
	%	Filler Calcário	<i>Tipo:</i>
	%	Areia fina	<i>Tipo: Passante peneira #40</i>
	%	Areia média	<i>Tipo: Passante peneira #20</i>
	%	Aditivo em pó	<i>Tipo: Celulósico, polimérico</i>
	kg/dosagem	Um processo de dosagem/mistura	<i>Quantidade total de material dosado em um processo de dosagem/mistura [=volume de material que cabe no misturador]</i>
	min/dosagem	Um processo de dosagem/mistura	<i>Tempo médio do processo (motores funcionando) para cada dosagem/mistura</i>
	cv	Potência dos motores (dosador + misturador)	
	sacos/dosagem	Saco de argamassa produzida (20 kg)	<i>Quantidade de sacos de argamassa ensacadas por dosagem</i>
	cv	Potência do motor da ensacadeira	
	ton/mês	Produção final/Vendas por tipo de argamassa	Valor médio mensal de cada produto produzido em 2016 (média dos 12 meses)
	ton/mês	Assentamento de blocos	
	ton/mês	Reboco	
	ton/mês	Reboco projetável	
	ton/mês	Contrapiso	
	ton/mês	Chapisco	
	ton/mês	Colante	
	ton/mês	Rejunte	
	ton/mês	Massa única	

APÊNDICE D – Resultados da avaliação de impacto do ciclo de vida.

Material / Processo	Origem	Descrição	Materiais sem impacto do transporte para consumo final				
			IPCC 2013 100a v.1.03	CED v.1.09	EDIP 2003 v.1.06	Impact 2002+ v.2.14	ReCiPe 2008 (H) W (H/A) V1.13
			kg CO ₂ eq	MJ	μPt	μPt	mPt
Cimento (1 kg)	Região Sul - ES	CP I	1,008	6,790	757	201	76
		CP I - S / CPV - ARI	0,960	6,504	725	192	73
		CP II - F	0,911	6,218	693	183	69
		CP II - E	0,603	4,514	662	129	48
	Região Central - ES	CP III	0,326	2,997	661	81	30
		CP I	1,030	7,135	821	210	79
		CP I - S / CPV - ARI	0,981	6,849	789	201	75
		CP II - F	0,933	6,564	757	192	72
		CP II - E	0,610	4,622	682	132	49
		CP III	0,317	2,852	634	77	29
Cal hidratada (1 kg)	MG	CH I / CH III	0,943	5,606	1495	195	63
Areia (1 kg)	Mercado local	Areia quartzosa	0,0053	0,083	19	2,7	0,7
Brita/pó de pedra (1 kg)	Mercado local	Brita/pó de pedra	0,0023	0,045	16	4,1	0,9
Aditivo/ Superpl. (1 kg)	SP	Aditivo/ Superplastificante	1,603	45,490	3577	690	181
Fíler calcário (1 kg)		Fíler calcário	0,0159	0,481	46	9,9	2,9
RBROTT (1 kg)	Região Sul - ES	Cenário referência - 4MJ	0,456	6,416	624	136	48
		Cenário [+25%] - 5 MJ	0,568	7,972	772	169	60
		Cenário [-25%] - 3 MJ	0,343	4,859	477	102	36
RBRO (1 kg)	3 regiões do ES	RBRO, seco ao ar livre	0,0007	0,014	2	0,2	0,1
		RBRO, secador spray [ref.]	0,0806	1,345	65	22,8	7,9
		RBRO, secador spray [++25%]	0,1262	2,105	102	35,7	12,4
		RBRO, secador spray [--25%]	0,0457	0,764	37	12,9	4,5
		RBRO, secador rotativo [ref.]	0,0192	0,323	17	5,5	1,9
		RBRO, secador rotativo [++25%]	0,0296	0,495	25	8,4	2,9
		RBRO, secador rotativo [--25%]	0,0115	0,193	11	3,3	1,1
Transporte (1 tkm)		Transporte, caminhão EURO3, 7,5 a 16 t	0,1856	2,954	533	71	21
		Transporte, caminhão EURO3, 3,5 a 7,5 t	0,4266	6,714	1186	155	48
		Transporte, caminhão EURO3, 16 a 32 t (utilizado)	0,1466	2,366	437	59	17
		Transporte, caminhão EURO3, maior que 32 t	0,0810	1,338	252	36	10
Água (1l)	Global	Água potável	0,0005	0,007	1,9	0,19	0,05
Electricidade (1 kWh)	Matriz BR	Electricidade, voltagem média	0,1874	6,577	479	83,9	18,2
Diesel (1 MJ)	Global	Diesel, consumido em máquina	0,0862	1,355	314	42,4	10,7
Cimento (1 kg)	Global	Embalagem, cimento	0,0055	0,177	32,85	2,00	0,60
Traços de concreto (m³)		Concreteira	3,25	69,45	10805	1556	379
Traços de argamassa (m³)		Industrializada + argamassadeira	10,69	349,55	59384	4022	1147
Traços de blocos (m³)		Fábrica de blocos	2,74	96,02	6987	1224	266

Nº Art	Nome do traço	Total (materiais)			Total (materiais + produção + transporte)			Redução do impacto em relação ao traço controle			fck	Intensidade de impacto (Indicador/fck)			Redução da intensidade de impacto			Controle (C); Substituição (S); Adição (A)/ Cimento (Cim); Areia	
		kg CO2eq	MJ	µPt	kg CO2eq	MJ	µPt	kg CO2eq	MJ	µPt		fck 28 (Mpa)	kg CO2eq/MPa	MJ/ Mpa	µPt/ Mpa	kg CO2eq/MPa	MJ/ Mpa		
Argamassa de assentamento (1 m³)																		% RBRO	
1	T1	235	1898	58170	252	2348	64720	0,0%	0,0%	0,0%	1,60	157,5	1468	40450	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [1] ¹
	T3	200	1669	50466	217	2119	57016	14,0%	9,8%	11,9%	2,65	81,8	800	21515	48,1%	45,5%	46,8%	35%	S: Cal [1]
	T4	155	1360	40324	172	1810	46874	31,9%	22,9%	27,6%	2,18	78,7	830	21502	50,0%	43,4%	46,8%	62%	S: Cal [1]
	T5	105	1003	28832	122	1453	35383	51,7%	38,1%	45,3%	2,15	56,6	676	16457	64,1%	54,0%	59,3%	83%	S: Cal [1]
	T9	69	777	21115	86	1227	27665	66,0%	47,8%	57,3%	2,77	30,9	443	9987	80,4%	69,8%	75,3%	100%	S: Cal [1]
	T2	220	1878	55999	237	2328	62550	0,0%	0,0%	0,0%	4,61	51,4	505	13568	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [2]
	T6	175	1542	45335	192	1992	51885	19,2%	14,5%	17,0%	4,61	41,5	432	11255	19,2%	14,5%	17,0%	35%	S: Cal [2]
	T7	145	1339	38665	162	1789	45215	31,8%	23,2%	27,7%	4,68	34,6	382	9661	32,8%	24,3%	28,8%	62%	S: Cal [2]
	T8	115	1136	32020	132	1587	38570	44,3%	31,9%	38,3%	4,83	27,4	328	7985	46,8%	35,0%	41,1%	83%	S: Cal [2]
	T10	87	944	25659	104	1394	32209	56,3%	40,1%	48,5%	5,46	19,0	255	5899	63,1%	49,4%	56,5%	100%	S: Cal [2]
Argamassa de revestimento (1 m³)																		% RBRO	
2	TR	232	1838	52971	249	2288	59521	0,0%	0,0%	0,0%	4,10	60,7	558	14517	0,0%	0,0%	0,0%	68%	C [1]
	2	214	1708	49134	231	2158	55684	7,1%	5,7%	6,4%	4,32	53,5	500	12890	11,8%	10,5%	11,2%	136%	A: Cim [1]
	3	208	1664	47770	225	2114	54320	9,8%	7,6%	8,7%	4,50	49,9	470	12071	17,8%	15,8%	16,8%	204%	A: Cim [1]
	4	210	1680	48158	227	2130	54709	0,0%	0,0%	0,0%	2,02	112,5	1055	27083	0,0%	0,0%	0,0%	68%	C [2]
	5	199	1600	45772	216	2050	52322	4,9%	3,8%	4,4%	3,89	55,5	527	13450	50,6%	50,0%	50,3%	136%	A: Cim [2]
	6	190	1536	43874	207	1986	50425	8,9%	6,8%	7,8%	3,97	52,2	500	12701	53,6%	52,6%	53,1%	204%	A: Cim [2]
	7	277	2123	62981	294	2573	69531	0,0%	0,0%	0,0%	3,21	91,5	802	21661	0,0%	0,0%	0,0%	68%	C [3]
	8	268	2068	61254	285	2518	67804	2,9%	2,1%	2,5%	3,86	73,9	652	17566	19,2%	18,6%	18,9%	136%	A: Cim [3]
	9	259	2007	59374	276	2458	65925	5,9%	4,5%	5,2%	4,18	66,1	588	15771	27,8%	26,6%	27,2%	204%	A: Cim [3]
Argamassa de alta resistência (1 m³)																		% RBRO	
3	C	447	3386	97967	464	3836	104517	0,0%	0,0%	0,0%	38,00	12,2	101	2750	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [1]
	1-M10	404	3081	89078	421	3531	95629	9,2%	8,0%	8,5%	27,90	15,1	127	3428	-23,7%	-25,4%	-24,6%	10%	S: Cim [1]
4	REF	447	3386	97976	464	3837	104526	0,0%	0,0%	0,0%	39,00	11,9	98	2680	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [2]
	10% CEM	404	3081	89088	421	3531	95638	9,2%	8,0%	8,5%	36,00	11,7	98	2657	1,6%	0,3%	0,9%	10%	S: Cim [2]
	10% SAND	446	3377	97646	463	3827	104196	0,1%	0,2%	0,3%	32,00	14,5	120	3256	-21,7%	-21,6%	-21,5%	10%	S: Are [2]
	REF + A	451	3494	99653	467	3944	106203	0,0%	0,0%	0,0%	54,00	8,7	73	1967	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [3]
	10% CEM + A	408	3177	90588	424	3627	97138	9,2%	8,0%	8,5%	48,00	8,8	76	2024	-2,2%	-3,5%	-2,9%	10%	S: Cim [3]
10% SAND + A	450	3485	99328	467	3935	105878	0,1%	0,2%	0,3%	52,00	9,0	76	2036	-3,7%	-3,6%	-3,5%	10%	S: Are [3]	

¹ O número entre colchetes identifica os traços do referido material que estão sendo correlacionados na análise comparativa no capítulo 5 – Resultados e discussões. Ex.: Para a argamassa de assentamento, os traços identificados como S:Cal [1] são analisados em relação ao traço controle C[1], e os traços identificados como S:Cal [2] são analisados em relação ao traço controle C[2].

Nº Art	Nome do traço	Total (materiais)			Total (materiais + produção + transporte)			Redução do impacto em relação ao traço controle			fck Res. Comp. 28 (Mpa)	Intensidade de impacto (Indicador/fck)			Redução da intensidade de impacto			Controle (C); Substituição (S); Adição (A)/ Cimento (Cim); Areia (Are)	
		kg CO2eq	MJ	µPt	kg CO2eq	MJ	µPt	kg CO2eq	MJ	µPt		kg CO2eq/MPa	MJ/ Mpa	µPt/ Mpa	kg CO2eq/Mpa	MJ/ Mpa	µPt/ Mpa		
Concreto convencional (1 m³)																		% RBRO	
5	REF 0.4	524	3906	116604	536	4117	121729	0,0%	0,0%	0,0%	31,10	17,2	132,4	3914,1	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [1]
	REF 0.55	385	2934	88150	397	3146	93275	0,0%	0,0%	0,0%	21,40	18,6	147,0	4358,6	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [2]
	REF 0.7	306	2378	71835	318	2589	76960	0,0%	0,0%	0,0%	18,10	17,6	143,0	4251,9	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [3]
	10%RCG 0.4	535	3981	118852	547	4193	123978	-2,1%	-1,8%	-1,8%	35,40	15,4	118,4	3502,2	10,3%	10,5%	10,5%	10%	A: Cim [1]
	10%RCG 0.55	399	3031	91055	411	3242	96181	-3,4%	-3,1%	-3,1%	23,60	17,4	137,4	4075,5	6,2%	6,5%	6,5%	10%	A: Cim [2]
	10%RCG 0.7	312	2418	73057	324	2629	78183	-1,9%	-1,6%	-1,6%	19,00	17,1	138,4	4114,9	2,9%	3,3%	3,2%	10%	A: Cim [3]
	20%RCG 0.4	549	4077	121663	561	4288	126789	-4,7%	-4,2%	-4,2%	35,80	15,7	119,8	3541,6	9,0%	9,5%	9,5%	20%	A: Cim [1]
	20%RCG 0.55	402	3047	91528	414	3259	96653	-4,3%	-3,6%	-3,6%	26,30	15,8	123,9	3675,0	15,2%	15,7%	15,7%	20%	A: Cim [2]
20%RCG 0.7	319	2463	74395	331	2674	79520	-4,0%	-3,3%	-3,3%	20,90	15,8	128,0	3804,8	9,9%	10,5%	10,5%	20%	A: Cim [3]	
6	R1	435	3505	100551	447	3716	105676	0,0%	0,0%	0,0%	43,00	10,4	86,4	2457,6	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [4]
	R2	415	3362	96365	427	3573	101490	4,5%	3,9%	4,0%	42,40	10,1	84,3	2393,6	3,2%	2,5%	2,6%	5%	S: Cim [4]
	R3	395	3219	92179	407	3430	97305	9,0%	7,7%	7,9%	41,10	9,9	83,5	2367,5	4,8%	3,4%	3,7%	10%	S: Cim [4]
	R4	376	3133	88893	389	3344	94019	13,1%	10,0%	11,0%	38,50	10,1	86,9	2442,0	2,9%	-0,5%	0,6%	15%	S: Cim [4]
	R5	356	2990	84708	368	3201	89833	17,6%	13,9%	15,0%	36,50	10,1	87,7	2461,2	2,9%	-1,5%	-0,1%	20%	S: Cim [4]
	R6	336	2846	80522	348	3058	85648	22,1%	17,7%	19,0%	35,40	9,8	86,4	2419,4	5,3%	0,1%	1,6%	25%	S: Cim [4]
7	0.5; 0%	447	3408	100892	459	3619	106017	0,0%	0,0%	0,0%	33,00	13,9	109,7	3212,6	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [5]
	0.5; 5%	426	3255	96448	438	3467	101573	4,6%	4,2%	4,2%	32,00	13,7	108,3	3174,2	1,7%	1,2%	1,2%	5%	S: Cim [5]
	0.5; 10%	405	3103	92003	417	3314	97129	9,3%	8,4%	8,4%	28,00	14,9	118,4	3468,9	-6,9%	-7,9%	-8,0%	10%	S: Cim [5]
	0.5; 20%	362	2797	83115	374	3009	88240	18,5%	16,9%	16,8%	22,00	17,0	136,8	4010,9	-22,2%	-24,7%	-24,8%	20%	S: Cim [5]
	0.65; 0%	349	2705	80529	361	2917	85654	0,0%	0,0%	0,0%	22,00	16,4	132,6	3893,4	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [6]
	0.65; 5%	333	2588	77112	345	2799	82237	4,5%	4,0%	4,0%	21,00	16,4	133,3	3916,0	0,0%	-0,5%	-0,6%	5%	S: Cim [6]
	0.65; 10%	316	2468	73615	328	2679	78741	9,2%	8,1%	8,1%	18,50	17,7	144,8	4256,3	-8,0%	-9,2%	-9,3%	10%	S: Cim [6]
0.65; 20%	284	2237	66899	296	2449	72025	18,1%	16,1%	15,9%	16,50	17,9	148,4	4365,1	-9,2%	-11,9%	-12,1%	20%	S: Cim [6]	
8	Control	328	2668	78388	340	2880	83513	0,0%	0,0%	0,0%	35,40	9,6	81,3	2359,1	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [7]
	M5	313	2562	75288	325	2773	80413	4,4%	3,7%	3,7%	39,40	8,3	70,4	2040,9	14,1%	13,5%	13,5%	5%	S: Cim [7]
	M7.5	306	2509	73737	318	2720	78863	6,6%	5,5%	5,6%	39,90	8,0	68,2	1976,5	17,1%	16,2%	16,2%	7,5%	S: Cim [7]
	M10	298	2456	72187	310	2667	77312	8,8%	7,4%	7,4%	31,10	10,0	85,8	2485,9	-3,8%	-5,4%	-5,4%	10%	S: Cim [7]
Concreto de Alto Desempenho (1 m³)																		% RBRO	
9	CMSD0	413	3380	96587	425	3592	101713	0,0%	0,0%	0,0%	85,10	5,0	42,2	1195,2	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [1]
	CMSD5	417	3418	97555	429	3629	102680	-1,0%	-1,0%	-1,0%	91,10	4,7	39,8	1127,1	5,7%	5,6%	5,7%	5%	S: Are[1]
	CMSD10	418	3421	97680	430	3633	102805	-1,2%	-1,1%	-1,1%	79,40	5,4	45,8	1294,8	-8,4%	-8,4%	-8,3%	10%	S: Are[1]
	CMSD15	412	3373	96338	424	3585	101463	0,1%	0,2%	0,2%	79,50	5,3	45,1	1276,3	-6,9%	-6,8%	-6,8%	16%	S: Are[1]
	CMSD20	406	3324	94862	418	3536	99987	1,6%	1,6%	1,7%	77,50	5,4	45,6	1290,2	-8,1%	-8,1%	-7,9%	21%	S: Are[1]
	CMSD34	398	3258	92940	410	3469	98066	3,4%	3,4%	3,6%	60,80	6,8	57,1	1612,9	-35,3%	-35,2%	-34,9%	36%	S: Are[1]
	CMSD67	390	3188	90792	402	3399	95918	5,3%	5,4%	5,7%	58,20	6,9	58,4	1648,1	-38,5%	-38,4%	-37,9%	68%	S: Are[1]
	CMSD100	387	3153	89746	399	3365	94872	6,0%	6,3%	6,7%	50,30	7,9	66,9	1886,1	-59,0%	-58,5%	-57,8%	100%	S: Are[1]

Nº Art	Nome do traço	Total (materiais)			Total (materiais + produção + transporte)			Redução do impacto em relação ao traço controle			fck Res. Comp. 28 (Mpa)	Intensidade de impacto (Indicador/fck)			Redução da intensidade de impacto			Controle (C); Substituição (S); Adição (A)/ Cimento (Cim); Areia (Are)			
		kg CO2eq	MJ	µPt	kg CO2eq	MJ	µPt	kg CO2eq	MJ	µPt		kg CO2eq/Mpa	MJ/ Mpa	µPt/ Mpa	kg CO2eq/Mpa	MJ/ Mpa	µPt/ Mpa				
Concreto Autoadensável (1 m³)																			% RBRO		
10	MGSW	177	2023	53030	189	2234	58156	-	-	-	69,30	2,7	32,2	839,2	-	-	-	31%	C [1]		
11	C1	435	3591	101340	447	3802	106466	0,0%	0,0%	0,0%	36,00	12,4	105,6	2957,4	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [2]		
	C2	634	5001	142268	646	5213	147393	0,0%	0,0%	0,0%	61,80	10,5	84,3	2385,0	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [3]		
	20% GP	435	3587	101090	447	3798	106215	0,1%	0,1%	0,2%	36,50	12,2	104,1	2910,0	1,4%	1,5%	1,6%	20%	A: Cim [2]		
	30% GP	435	3585	100977	447	3796	106102	0,1%	0,1%	0,3%	38,81	11,5	97,8	2734,0	7,3%	7,4%	7,6%	30%	A: Cim [2]		
	40% GP	435	3583	100851	447	3794	105977	0,1%	0,2%	0,5%	44,32	10,1	85,6	2391,4	18,9%	18,9%	19,1%	40%	A: Cim [2]		
12	50% GP	435	3581	100726	447	3792	105851	0,1%	0,3%	0,6%	50,15	8,9	75,6	2110,8	28,3%	28,4%	28,6%	50%	A: Cim [2]		
	PC	562	4659	129505	574	4870	134631	0,0%	0,0%	0,0%	59,00	9,7	82,6	2281,9	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [4]		
	5M	538	4527	124936	550	4739	130062	4,2%	2,7%	3,4%	56,00	9,8	84,6	2322,5	-1,0%	-2,5%	-1,8%	5%	S: Cim [4]		
	10M	515	4400	120436	527	4612	125562	8,3%	5,3%	6,7%	54,50	9,7	84,6	2303,9	0,8%	-2,5%	-1,0%	10%	S: Cim [4]		
13	20M	464	4065	110162	476	4276	115288	17,1%	12,2%	14,4%	52,50	9,1	81,4	2196,0	6,9%	1,3%	3,8%	20%	S: Cim [4]		
	Control	586	4686	132430	598	4897	137555	0,0%	0,0%	0,0%	75,90	7,9	64,5	1812,3	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [5]		
	MP10	531	4296	121043	543	4508	126169	9,2%	8,0%	8,3%	76,30	7,1	59,1	1653,6	9,6%	8,4%	8,8%	10%	S: Cim [5]		
	MP20	476	3906	109643	488	4118	114768	18,3%	15,9%	16,6%	77,50	6,3	53,1	1480,9	20,0%	17,7%	18,3%	20%	S: Cim [5]		
14	MP30	421	3517	98270	433	3729	103395	27,5%	23,9%	24,8%	70,80	6,1	52,7	1460,4	22,3%	18,4%	19,4%	30%	S: Cim [5]		
	Bloco de vedação (1 m³)																			% RBRO	
	14	VREF	179	1596	48482	191	1834	53276	0,0%	0,0%	0,0%	3,20	59,6	573	16649	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [1]	
		V5%PA	171	1535	46745	183	1773	51539	4,1%	3,3%	3,3%	3,80	48,1	466	13563	19,3%	18,6%	18,5%	5%	S: Cim [1]	
V10%PA		164	1474	45010	175	1712	49804	8,2%	6,7%	6,5%	3,20	54,7	535	15564	8,2%	6,7%	6,5%	10%	S: Cim [1]		
V15%PA		156	1413	43276	167	1651	48070	12,4%	10,0%	9,8%	2,80	59,7	589	17168	-0,2%	-2,9%	-3,1%	15%	S: Cim [1]		
15	REF	257	2060	61843	268	2298	66637	0,0%	0,0%	0,0%	2,70	99,3	851	24680	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [2]		
	0,05	245	1976	59382	256	2214	64176	4,4%	3,7%	3,7%	2,70	95,0	820	23769	4,4%	3,7%	3,7%	5%	S: Cim [2]		
	0,1	233	1891	56924	245	2129	61718	8,8%	7,3%	7,4%	2,80	87,4	761	22042	12,0%	10,7%	10,7%	10%	S: Cim [2]		
16	0,15	221	1807	54469	233	2045	59263	13,2%	11,0%	11,1%	3,00	77,6	682	19754	21,8%	19,9%	20,0%	15%	S: Cim [2]		
	Bloco de pavimentação (1 m³)																			% RBRO	
	16	PREF-UFES	311	2618	77547	323	2856	82341	0,0%	0,0%	0,0%	39,90	8,1	71,6	2063,7	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [1]	
		P5%FD-UFES	297	2505	74323	308	2743	79117	4,5%	4,0%	3,9%	44,30	7,0	61,9	1785,9	14,0%	13,5%	13,5%	5%	S: Cim [1]	
		P10%FD-UFES	282	2391	71102	294	2629	75896	9,0%	7,9%	7,8%	41,10	7,1	64,0	1846,6	11,7%	10,6%	10,5%	10%	S: Cim [1]	
		P15%FD-UFES	267	2278	67886	279	2516	72680	13,6%	11,9%	11,7%	35,50	7,9	70,9	2047,3	2,8%	1,0%	0,8%	15%	S: Cim [1]	
		PREF-UEFS	441	3370	100063	452	3608	104857	0,0%	0,0%	0,0%	36,40	12,4	99,1	2880,7	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [2]	
		P5%FD-UEFS	419	3217	95612	431	3455	100406	4,7%	4,2%	4,2%	40,50	10,6	85,3	2479,2	14,4%	13,9%	13,9%	5%	S: Cim [2]	
	17	P10%FD-UEFS	398	3064	91169	410	3302	95963	9,4%	8,5%	8,5%	41,30	9,9	80,0	2323,6	20,2%	19,3%	19,3%	10%	S: Cim [2]	
		P15%FD-UEFS	377	2912	86734	388	3150	91528	14,1%	12,7%	12,7%	42,60	9,1	73,9	2148,6	26,6%	25,4%	25,4%	15%	S: Cim [2]	
MC-0		371	2855	85722	383	3093	90516	0,0%	0,0%	0,0%	33,36	11,5	92,7	2713,0	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [3]		
MC-10		336	2606	78425	348	2844	83219	9,1%	8,1%	8,1%	34,26	10,2	83,0	2428,7	11,5%	10,5%	10,5%	10%	S: Cim [3]		
17	MC-20	301	2354	71033	313	2592	75827	18,3%	16,2%	16,2%	36,60	8,5	70,8	2071,8	25,5%	23,6%	23,6%	20%	S: Cim [3]		
	MC-30	266	2102	63640	278	2340	68434	27,5%	24,4%	24,4%	28,66	9,7	81,6	2387,8	15,6%	11,9%	12,0%	30%	S: Cim [3]		
	MC-40	231	1851	56280	243	2089	61074	36,6%	32,5%	32,5%	26,42	9,2	79,1	2311,7	20,0%	14,7%	14,8%	40%	S: Cim [3]		

Nº Art	Nome do traço	Total (materiais)			Total (materiais + produção + transporte)			Redução do impacto em relação ao traço controle			fck Res. Comp. 28 (Mpa)	Intensidade de impacto (Indicador/fck)			Redução da intensidade de impacto			Controle (C); Substituição (S); Adição (A)/ Cimento (Cim); Areia (Are)	
		kg CO2eq	MJ	µPt	kg CO2eq	MJ	µPt	kg CO2eq	MJ	µPt		kg CO2eq/MPa	MJ/ Mpa	µPt/ Mpa	kg CO2eq/Mpa	MJ/ Mpa	µPt/ Mpa		
Argamassa com RBROTT (1 m³)																		% RBROTT	
18	AREF	511	3836	111422	528	4286	117972	0,0%	0,0%	0,0%	55,20	9,6	77,6	2137,2	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [1]
	ALGf 5	500	3828	110087	517	4278	116637	2,1%	0,2%	1,1%	53,89	9,6	79,4	2164,4	-0,3%	-2,2%	-1,3%	4%	S: Cim [1]
	ALGf 10	489	3821	108784	506	4271	115334	4,2%	0,3%	2,2%	50,78	10,0	84,1	2271,2	-4,1%	-8,3%	-6,3%	8%	S: Cim [1]
	ALGf 15	479	3822	107657	496	4272	114207	6,2%	0,3%	3,2%	51,09	9,7	83,6	2235,4	-1,4%	-7,7%	-4,6%	13%	S: Cim [1]
	ALGf 20	466	3806	106070	483	4256	112620	8,6%	0,7%	4,5%	46,93	10,3	90,7	2399,7	-7,5%	-16,8%	-12,3%	17%	S: Cim [1]
	ALDf 5	500	3823	109993	517	4273	116543	2,2%	0,3%	1,2%	51,47	10,0	83,0	2264,3	-4,9%	-6,9%	-5,9%	4%	S: Cim [1]
	ALDf 10	490	3822	108891	507	4272	115441	4,0%	0,3%	2,1%	50,53	10,0	84,5	2284,6	-4,8%	-8,9%	-6,9%	8%	S: Cim [1]
	ALDf 15	478	3810	107467	495	4260	114017	6,2%	0,6%	3,4%	47,37	10,5	89,9	2406,9	-9,3%	-15,8%	-12,6%	12%	S: Cim [1]
ALDf 20	461	3751	104710	478	4201	111260	9,5%	2,0%	5,7%	46,56	10,3	90,2	2389,6	-7,2%	-16,2%	-11,8%	16%	S: Cim [1]	
Concreto com RBROTT (1 m³)																		% RBROTT	
19	1 - Ref 0,4	520	3909	116282	532	4121	121408	0,0%	0,0%	0,0%	55,19	9,6	74,7	2199,8	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [1]
	2 - Ref 0,6	318	2486	74762	331	2697	79888	0,0%	0,0%	0,0%	40,37	8,2	66,8	1978,9	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [2]
	3 - 5% 0,4	521	4001	117557	533	4212	122682	-0,2%	-2,2%	-1,0%	60,54	8,8	69,6	2026,5	8,7%	6,8%	7,9%	5%	A: Cim [1]
	4 - 5% 0,6	324	2576	76573	336	2788	81699	-1,6%	-3,3%	-2,3%	48,20	7,0	57,8	1695,0	14,9%	13,4%	14,3%	5%	A: Cim [2]
	5 - 10% 0,4	533	4176	121337	545	4388	126462	-2,5%	-6,5%	-4,2%	63,09	8,6	69,5	2004,5	10,4%	6,9%	8,9%	10%	A: Cim [1]
	6 - 10% 0,6	330	2671	78534	342	2882	83659	-3,4%	-6,9%	-4,7%	50,01	6,8	57,6	1672,8	16,5%	13,7%	15,5%	10%	A: Cim [2]
20	Ref 0,5	403	3086	92292	415	3297	97418	0,0%	0,0%	0,0%	53,20	7,8	62,0	1831,2	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [3]
	A10 0,5	410	3265	95417	422	3476	100543	-1,7%	-5,4%	-3,2%	57,20	7,4	60,8	1757,7	5,4%	1,9%	4,0%	10%	A: Cim [3]
	A15 0,5	417	3381	97781	429	3592	102906	-3,4%	-8,9%	-5,6%	54,20	7,9	66,3	1898,6	-1,5%	-6,9%	-3,7%	15%	A: Cim [3]
	A20 0,5	423	3485	99839	435	3697	104965	-4,8%	-12,1%	-7,7%	59,80	7,3	61,8	1755,3	6,7%	0,3%	4,1%	20%	A: Cim [3]
	S10 0,5	381	3062	89501	393	3273	94626	5,3%	0,7%	2,9%	50,20	7,8	65,2	1885,0	-0,3%	-5,2%	-2,9%	10%	S: Cim [3]
	S15 0,5	371	3061	88445	383	3272	93571	7,6%	0,8%	3,9%	49,20	7,8	66,5	1901,8	0,1%	-7,3%	-3,9%	15%	S: Cim [3]
	S20 0,5	369	3122	89161	381	3333	94286	8,2%	-1,1%	3,2%	47,10	8,1	70,8	2001,8	-3,7%	-14,2%	-9,3%	20%	S: Cim [3]
	REF 0,65	288	2267	68367	300	2478	73492	0,0%	0,0%	0,0%	40,80	7,3	60,7	1801,3	0,0%	0,0%	0,0%	0%	C [4]
	A10 0,65	300	2450	72240	312	2661	77365	-4,1%	-7,4%	-5,3%	43,50	7,2	61,2	1778,5	2,4%	-0,7%	1,3%	10%	A: Cim [4]
	A15 0,65	305	2536	74024	317	2747	79149	-5,9%	-10,8%	-7,7%	42,10	7,5	65,3	1880,0	-2,7%	-7,4%	-4,4%	15%	A: Cim [4]
	A20 0,65	311	2621	75792	323	2832	80917	-7,8%	-14,3%	-10,1%	46,10	7,0	61,4	1755,3	4,6%	-1,1%	2,6%	20%	A: Cim [4]
	S10 0,65	279	2306	68054	291	2518	73179	2,8%	-1,6%	0,4%	37,90	7,7	66,4	1930,8	-4,7%	-9,4%	-7,2%	10%	S: Cim [3]
	S15 0,65	273	2312	67473	285	2523	72599	4,8%	-1,8%	1,2%	36,70	7,8	68,7	1978,2	-5,8%	-13,2%	-9,8%	15%	S: Cim [3]
	S20 0,65	271	2350	67860	283	2562	72985	5,6%	-3,4%	0,7%	35,40	8,0	72,4	2061,7	-8,8%	-19,1%	-14,5%	20%	S: Cim [3]