

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

RÉGIS PEREIRA WASKOW

**AVALIAÇÃO TÉCNICA, AMBIENTAL E ECONÔMICA DO USO DO JIGUE A AR
NA RECICLAGEM DO RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)
BRASILEIRO**

Porto Alegre

2019

RÉGIS PEREIRA WASKOW

**AVALIAÇÃO TÉCNICA, AMBIENTAL E ECONÔMICA DO USO DO JIGUE A AR
NA RECICLAGEM DO RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)
BRASILEIRO**

Tese submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito à obtenção do título de Doutor em Engenharia na modalidade acadêmica.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rejane Maria Candiota Tubino

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Carolina Badalotti Passuello

Área de concentração:

Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa

Porto Alegre

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitora: Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Ten Caten

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA
E DE MATERIAIS (PPGE3M)

Coordenador: Afonso Reguly

Coordenador substituto: Andréa Moura Bernardes

Waskow, Régis Pereira

Avaliação Técnica, Ambiental e Econômica do Uso do Jigue a Ar na Reciclagem do Resíduo de Construção e Demolição (RCD) Brasileiro / Régis Pereira Waskow. - 2019. 147 f.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

Orientadora: Rejane Maria Candiota Tubino.

Coorientadora: Ana Carolina Badalotti Passuello.

1. Resíduos da Construção e Demolição. 2. Beneficiamento gravimétrico. 3. Jigue a ar. 4. Intensidade de Impactos. 5. Avaliação do Ciclo de Vida.

I. Tubino, Rejane Maria Candiota, orient. II. Ana Carolina Badalotti Passuello, coorient. Avaliação Técnica, Ambiental e Econômica do Uso do Jigue a Ar na Reciclagem do Resíduo de Construção e Demolição (RCD) Brasileiro.

RÉGIS PEREIRA WASKOW

**AVALIAÇÃO TÉCNICA, AMBIENTAL E ECONÔMICA DO USO DO JIGUE A AR NA
RECICLAGEM DO RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) BRASILEIRO**

Esta tese foi analisada e julgada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, na modalidade acadêmica, e aprovada em sua forma final pela Orientadora, Coorientadora e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Rejane Maria Candiota Tubino - orientadora

Ana Carolina Badalotti Passuello - coorientadora

Afonso Reguly – Coordenador do PPGE3M

Aprovada em: 11/12/2019
BANCA EXAMINADORA

Prof^a Dr^a. Vanessa Gomes da Silva
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Prof^o. Dr. Darci Barnech Campani
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof^o. Dr. Weslei Monteiro Ambrós
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Dedico este trabalho à minha esposa, família, amigos e colegas que me acompanharam, estimularam e dispuseram de sábia paciência ao longo desta jornada.

RESUMO

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são gerados em grandes quantidades em todo o mundo. No Brasil, este resíduo supera a metade da geração do resíduo sólido urbano (RSU). Estudos acadêmicos evidenciam a possibilidade de reuso de agregados reciclados em substituição aos agregados naturais na produção de concretos. Há, entretanto, a necessidade da melhoria da qualidade dos agregados reciclados para ampliar sua aceitação pelo setor da Construção Civil. Assim, um novo paradigma surge na reciclagem do RCD: os métodos de beneficiamento. Alguns autores avaliam processos de beneficiamento adicionais aos processos unitários de reciclagem do RCD no Brasil. Entretanto, existe uma carência de estudos que considerem o beneficiamento de resíduos com características do gerado no Brasil através do uso do jigue a ar, equipamento de beneficiamento por diferenças de densidade. A legislação brasileira exige práticas que conciliem viabilidade econômica e redução dos impactos ambientais. O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade técnica, ambiental e econômica do uso do jigue a ar no beneficiamento gravimétrico dos agregados graúdos de RCD com características do gerado no Brasil. Para tal, se fez necessário: (i) Gerar e caracterizar RCD com características do gerado no Brasil; (ii) Avaliar a viabilidade técnica do beneficiamento com o uso do jigue a ar; (iii) Avaliar os impactos ambientais e a viabilidade econômica do conjunto de processos unitários utilizados atualmente para a reciclagem do RCD (Cenário Atual) e de um Cenário Proposto, onde é adicionado o uso do jigue a ar; (iv) Comparar a produção de agregados reciclados dos cenários de Reciclagem Atual e Proposto com os agregados graúdos naturais em um contexto de Intensidade de Impactos (relação impacto ambiental/custo). Os resultados confirmam a possibilidade de uso do jigue a ar na melhoria da qualidade de agregados graúdos reciclados, alcançando concentração de agregados de concreto na camada inferior do equipamento de 63%. Os parâmetros operacionais para estes resultados são: Taxa de expansão de 100%; Frequência de 100 rpm; e Tempo de Operação de 120 segundos. Os resultados demonstram que o jigue a ar não altera características dos agregados graúdos reciclados relevantes ao uso na construção civil. Os impactos ambientais da Reciclagem Proposta (com jigue a ar) são inferiores aos da Reciclagem Atual e da produção do agregado graúdo natural, no contexto de Porto Alegre-RS, para a maioria dos indicadores ambientais avaliados. Entretanto, o transporte de RCD é o principal responsável pelos impactos adversos dos indicadores Mudanças Climáticas, Depleção de Recursos Abióticos – combustíveis fósseis e Depleção da Camada de Ozônio, com contribuições que superam 90% dos indicadores. No Cenário Proposto, alguns dos indicadores ambientais são mais atrativos que os do Agregado Graúdo Natural, ainda que os locais de entrega do agregado produzido estejam a até 300 km de distância. Porém, os cenários de reciclagem avaliados (Atual e Proposto) somente atingem indicadores econômicos atrativos com soluções alternativas, como a redução de impostos, minimização/exclusão de custos de transporte ou concessão dos equipamentos da planta de reciclagem. Somente com a exclusão dos custos de transporte do RCD, são alcançados TIR e Payback adequados ao tipo de atividade. A análise de Intensidade de Impactos inicial, impacto ambiental/custos unitário, suaviza os resultados pouco atrativos dos demais indicadores econômicos. Logo, conclui-se mais adequado o uso da relação impacto ambiental/TIR ou Payback para o alcance de resultados fidedignos de Intensidade de Impactos da atividade.

Palavras-chave: Resíduos da Construção e Demolição; Processo de Reciclagem; Avaliação do Ciclo de Vida; Análise Econômica; Jigue a ar; Beneficiamento gravimétrico; Intensidade de Impactos.

ABSTRACT

Construction and demolition waste (CDW) are generated in large quantities worldwide. In Brazil, this waste exceeds half the generation of municipal solid waste (MSW). Academic studies present the reuse of recycled aggregates to replace natural aggregates in concrete production. However, improving recycled aggregates quality is needed to enhance its acceptance by the Civil Construction sector. Thus, a new paradigm emerges in the recycling of CDW: the processing methods. Some authors have assessed additional processes to recycle CDW in Brazil. However, there is a lack of studies that consider Brazilian residues beneficiation through the use of air jigs, a sorting equipment that works through density differences. Brazilian law requires practices that conciliate economic viability and reduced environmental impacts. The objective of this study is to analyse the technical, environmental and economic feasibility of using air jig in the gravimetric processing of recycled coarse aggregates with characteristics of CDW generated in Brazil. For this, it was necessary to: (i) Generate and characterize a CDW with similar characteristic of those generated in Brazil; (ii) Evaluate the technical feasibility of air jig sorting process; (iii) Assess the environmental impacts and economic viability of the set of unit processes currently used for recycling the CDW (Current Scenario) and a Proposed Scenario, where the use of air jigs is added; (iv) Compare the production of recycled aggregates from the Current and Proposed Scenarios with natural coarse aggregates in a context of Impact Intensity (environmental impact / cost ratio). The results confirm the possibility of using air jig to improve the quality of recycled coarse aggregates, reaching concrete aggregates concentration of 63% in the lower layer of the equipment. The operational parameters for these results are: Expansion rate of 100%; Frequency of 100 rpm; and 120-second operating time. Results show that air jigs do not alter the characteristics of the recycled coarse aggregates relevant to use in civil construction. The environmental impacts of the Proposed Recycling (with air jigs) are lower than those from Current Recycling and from the production of natural coarse aggregate (NCA), in the city of Porto Alegre-RS context, for most of the evaluated environmental indicators. However, CDW transport is the main responsible for the adverse impacts of the indicators Climate Change, Depletion of Abiotic Resources - fossil fuels and Depletion of the Ozone Layer, with contributions that exceed 90% of the impacts. In the Proposed Scenario, some of the environmental indicators are more attractive than the NCA, even though the delivery places of produced aggregate are up to 300 km away. Still, the evaluated recycling scenarios (Current and Proposed) only reach attractive economic indicators with alternative solutions, such as tax reduction, minimization/exclusion of transportation costs or concession of equipment at the recycling plant. Only with the exclusion of transportation costs, Internal Rate Return (IRR) and Payback appropriate values are achieved. The initial Impact Intensity analysis, environmental impact/unit costs, smooths others economic indicators unattractive results. Therefore, the use of the environmental impact/IRR or Payback ratio is more appropriate to achieve reliable results of the activity Impact Intensity.

Keywords: Construction and Demolition Wastes; Recycling Process; Life Cycle Assessment; Economic analysis; Air jig; Gravity beneficiation; Impact Intensity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição do RCD (eixo y) a partir de 31 artigos brasileiros publicados. Eixo x representado pelas publicações (Pn..) consultados pelos autores.....	21
Figura 2 – Consolidação de informações referentes a características das plantas de reciclagem de RCD no Brasil e dados sobre a gestão dos mesmos. Ambas as fontes de informações são resultadas de dados disponibilizados por unidades de destino de RCD.....	23
Figura 3 – Processo e equipamentos geralmente identificados em plantas de reciclagem de RCD no Brasil.	24
Figura 4 – Processo de estratificação no jigue a ar. Os agregados mistos alimentam o equipamento. A introdução do pulso de ar expande o leito de agregados, que pela gravidade sedimentam. O processo ocorre ciclicamente até atingir a maior capacidade de concentração do agregado mais denso na camada inferior.	25
Figura 5 - Estrutura da avaliação do ciclo de vida.....	32
Figura 6 – Diferença das abordagens Atribucional e Consequencial. Círculos representando o total de impactos ambientais global. Na abordagem Atribucional, os impactos ambientais são representados pela fração pontilhada, referindo aos impactos de uma atividade específica. Na abordagem Consequencial, os impactos ambientais alternam como consequência de adições ou subtrações de atividades relacionados por mercados equivalentes de coprodutos e produtos.	35
Figura 7 – Ilustração da fronteira do sistema de um modelo Atribucional convencional e a abordagem Atribucional acrescida da abordagem do Impacto Líquido Evitado.	36
Figura 8 - Evolução temporal da disponibilidade de artigos sobre ACV de RCD	37
Figura 9 – Dados de composição dos estudos de ACV de RCD acessados. A classificação dos estudos é dada em termos percentuais conforme os subitens a seguir: (a) tipos de modelos de sistema adotados; (b) disponibilidade dos fluxos do sistema de produto; (c) atividade de origem dos resíduos; (d) tipo de resíduo considerado no estudo; (e) destino/uso do produto principal.....	38
Figura 10 – Distribuição geográfica anual dos trabalhos identificados em revisão da literatura sobre análise econômica da reciclagem de resíduos da construção e demolição. Análises econômicas passíveis de serem aplicadas a qualquer região no mundo são definidas no gráfico como “genérico”.	43
Figura 11 – Distribuição geográfica dos trabalhos identificados em revisão da literatura sobre a análise de Intensidade de Impacto na reciclagem do RCD.	46
Figura 12 – Características dos trabalhos identificados em revisão da literatura sobre a análise de Intensidade de Impacto na reciclagem do RCD.....	48
Figura 13 – Características do índice adotado nos estudos identificados na revisão de literatura. (a) relação definida como o índice avaliado no estudo; (b) uso da normalização (referência) na análise do resultado; (c) dados de entrada econômicos; e (d) dados de entrada ambiental.	49
Figura 14 – Exemplos de relações a serem adotadas de acordo com o objetivo da análise da Intensidade de Impacto. Dados de Alternativas e Referência incluídos aleatoriamente, sendo que a análise pode incluir mais de um desses elementos.....	51
Figura 15 – Modelo proposto para ilustrar os resultados da análise de Intensidade de Impacto na reciclagem do RCD. A posição das relações custo/impacto ambiental da Reciclagem Atual (RA) e do agregado graúdo natural (AGN) foi definida aleatoriamente, exigindo ajustes de acordo com cada estudo de caso. Verde claro, menor Intensidade de Impacto que a referência (AGN). Verde escuro, menor Intensidade de Impacto que as duas referências.	52
Figura 16 – Fluxograma simplificado de suposições a serem adotadas para a análise de Intensidade de Impacto da reciclagem de RCD.	53
Figura 17 – Fluxograma simplificado das etapas a serem desenvolvidas para o atendimento ao objetivo geral deste trabalho. A numeração indica a ordem de execução de cada etapa. A definição dos cenários de reciclagem é realizada na Avaliação Ambiental (2), servindo de base também a Análise Econômica (3).....	54
Figura 18 – Fluxograma dos processos executados para análise da viabilidade técnica do uso do jigue a ar no beneficiamento gravimétrico dos agregados reciclados de RCD com características do gerado no Brasil.	55
Figura 19 – Equipamentos e materiais utilizados para a geração e caracterização dos RCD. (a) britador de mandíbula, (b) peneira, (c) agregados de argamassa gerado e após pigmentação	57
Figura 20 – (a) Jigue a ar usado para testes com indicação de seus principais componentes. (1) ventilador; (2) painel de controle; (3) válvula tipo borboleta; (4) recipiente; (5) sistema de controle de emissões. (b) Jigue em escala industrial com destaque em vermelho para a zona de estratificação simulada pelo equipamento laboratorial.	61
Figura 21 – Imagem dos agregados utilizados nos testes de beneficiamento com o jigue a ar. (a) Argamassa, (b) Concreto e (c) Cerâmica. Limite das imagens de cada material dado pelo material acrílico que compõe cada camada do recipiente do jigue a ar que simula a zona de estratificação.	61

Figura 22 - Estrutura para avaliação dos melhores Parâmetros de operação do jigge a ar em função da concentração de agregado de concreto na camada inferior.	62
Figura 23 - Sistema de coleta adaptado para os ensaios realizados	63
Figura 24 –Fronteira do sistema de produto considerada para ambos métodos de Reciclagem, Atual e Proposto, de reciclagem do RCD brasileiro. Em cinza, as unidades de processo da produção do agregado graúdo reciclado. A caixa tracejada representa a expansão do sistema, com a adoção da abordagem de impacto evitado, considerando os coprodutos da reciclagem. O “agregado graúdo reciclado” corresponde ao AGR no RA e o AGRrc no RP. Os dados quantitativos do impacto evitado são definidos e descritos posteriormente no subcapítulo 4.1.5.....	66
Figura 25 – Fronteira do sistema de produção de Agregado Graúdo Natural (AGN), baseado em Morales et al. (2019).	66
Figura 26 – Resistência a compressão prevista conforme a Equação de Cabral (2007) na produção de concretos contendo agregados graúdos reciclados produzidos nos processos de Reciclagem Atual e Proposto para o Brasil.	69
Figura 27 – <i>Dataset</i> adaptado para representação do processo brasileiro de produção de agregado graúdo natural (AGN) utilizado neste trabalho.	69
Figura 28 – Ordem da execução das fases que dão suporte e complementam a análise econômica da reciclagem de RCD brasileiro.....	70
Figura 29 - Distribuição granulométrica das frações de agregados reciclados produzidos: (a) argamassa, (b) concreto e (c) cerâmica.....	78
Figura 30 – Relação dos parâmetros Frequência, Taxa de expansão e Tempo de operação com os resultados de concentrações dos agregados graúdos reciclados de Argamassa (Ar), Concreto (Co) e Cerâmica (Ce) nas camadas Superior, Intermediária e Inferior do jigge a ar.	85
Figura 31 – Gráfico ilustrando os valores de perdas e emissões atmosféricas do processo de beneficiamento com o jigge a ar dos agregados graúdos reciclados com características do gerado no Brasil.	88
Figura 32 – Distribuição granulométrica dos diferentes diâmetros de partículas das emissões atmosféricas coletadas em cada teste de beneficiamento gravimétrico com jigge a ar dos agregados graúdos reciclados gerados.	89
Figura 33 - Relação de emissões atmosféricas por parâmetro operacional do gabarito de ar.....	89
Figura 34 – Fator de forma dos agregados de referência na avaliação da alteração da forma pelo uso do jigge a ar no beneficiamento gravimétrico dos RCD.	91
Figura 35 – Agregados graúdos reciclados Cerâmicos utilizados como indicadores da possibilidade de alteração da forma dos agregados reciclados pelo beneficiamento gravimétrico no jigge a ar.....	91
Figura 36 – Análise qualitativa dos agregados reciclados Cerâmicos indicadores da alteração da forma pelo processo de beneficiamento gravimétrico. Ilustração dos agregados reciclados Cerâmicos pré beneficiamento (preto) e pós beneficiamento (vermelho).....	92
Figura 37 - Comparação da distribuição granulométrica dos agregados antes do beneficiamento no jigge a ar e na camada inferior do teste 6.....	93
Figura 38 - Balanço de massa realizado em escala laboratorial para o agregado reciclado brasileiro: granulometria (em negrito); cada tipo de taxa de material (em preto); e porcentagem do RCD recebido (em cinza). Composição do RCD baseado em Scoot Hood (2006). A perda ou alteração da composição dos resíduos nas correias transportadoras não é considerada.	94
Figura 39 – Resistência a compressão prevista conforme a Equação de Cabral (2007) na produção de concretos contendo agregados graúdos reciclados produzidos nos processos de Reciclagem Atual e Proposto para o Brasil.	95
Figura 40 - Comparação dos resultados da avaliação dos impactos ambientais dos processos de Reciclagem Atual (RA) e Proposto (RP) para o RCD brasileiro. Os resultados tomam como base a produção de 1kg de agregado graúdo reciclado. Os valores negativos expressos no gráfico representam o impacto evitado pela substituição parcial dos AGN e AMN pelos produtos de referência e coprodutos de cada processo de reciclagem.....	103
Figura 41 – Sensibilidade do transporte do RCD até ao local de uso do agregado produzido. Em azul, resultados do método de Reciclagem Atual de reciclagem. Em laranja, resultados do método de Reciclagem Proposto, com o uso do jigge a ar. Em cinza a variação do transporte para o Agregado Graúdo Natural (AGN).	106
Figura 42 - Contribuição de literatura adicional consultada na segunda etapa da revisão. O gráfico demonstra a soma dos diferentes dados identificados nestes trabalhos sobre análise de custos da reciclagem de RCD no Brasil. A representação dos trabalhos no gráfico segue a ordem de identificação dos trabalhos. Ao atingir a estabilidade do gráfico considerou-se que os dados de entrada propostos nos artigos científicos disponíveis sobre o assunto foram esgotados.....	109
Figura 43 – Relação dos dados de entrada inventariados na literatura sobre a avaliação de custos da reciclagem de RCD no mundo e no Brasil. Alguns dos dados listados são decompostos, alguns outros são considerados ainda que seus valores seja 0 (zero) no atual estágio da reciclagem do RCD no Brasil.	110

Figura 44 - Contribuição das etapas de revisão da literatura. O gráfico demonstra o aumento de insumos considerados em artigos sobre análise de custos da reciclagem de RCD no Brasil.....	111
Figura 45 – Principais dados de entrada que compõem os Custos Fixos dos métodos de Reciclagem Atual e Proposto deste trabalho. Caixa hachurada representando a participação do jigge a ar, principal componente do Cenário Proposto.	119
Figura 46 – Contribuições mensais dos principais dados de entrada dos Custos Variáveis dos métodos de Reciclagem Atual e Proposta para o RCD brasileiro.....	120
Figura 47 – Contribuições mensais de cada dado de entrada relacionado a receitas dos métodos de Reciclagem Atual e Proposto para o RCD brasileiro.	121
Figura 48 – Indicadores econômicos conforme variação de dados de entrada: Impostos sobre a receita, Transporte e Subsídio do governo.	123
Figura 49 – Indicadores econômicos conforme variação de dados de entrada de Aquisição do Terreno, Equipamentos e Veículos. Gráficos representando os métodos de Reciclagem Atual (RA) e Reciclagem Proposta (RP) avaliados, respectivamente.....	124
Figura 50 –Indicadores de Intensidade de Impacto considerando como indicadores econômicos, além do custo unitário de produção, os valores de TIR e <i>Payback</i> . O eixo y representa os indicadores ambientais, que possuem relação equivalente com o agregado natural quando estabelecida a relação impacto ambiental/custo.....	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Distribuição granulométrica do resíduo de Argamassa, Concreto e Cerâmica pós cominuição.	77
Tabela 2 - Distribuição granulométrica das amostras de Argamassa, Concreto e Cerâmica utilizados na avaliação da forma dos agregados	79
Tabela 3 - Resultados da análise do índice de forma dos agregados de Argamassa, Concreto e Cerâmica.	80
Tabela 4 - Composição dos resultados de densidade dos agregados de RCD estudados.....	81
Tabela 5 - Critério de concentração dos agregados de RCD avaliados no estudo.	82
Tabela 6 - Distribuição granulométrica dos agregados graúdos reciclados gerados utilizados na avaliação da viabilidade técnica de beneficiamento via jigue a ar.	83
Tabela 7 – Resultados dos testes do beneficiado gravimétrico dos agregados graúdos reciclados gerados com o uso do jigue a ar. Os resultados são descritos seguindo a ordem de execução dos testes, inicialmente variando a Taxa de expansão (T), seguido da Frequência de expansão (f) e por fim o Tempo de operação (t). Os resultados são expressos em percentual mássico dos agregados reciclados gerados de Argamassa (Ar), Concreto (Co) e Cerâmica (Ce) em cada camada do equipamento.	84
Tabela 8 – Resultados dos testes de aferição dos resultados de beneficiamento gravimétrico no jigue a ar dos agregados graúdos reciclados gerados. (T) Taxa de expansão; (f) Frequência de expansão; e (t) Tempo de operação. Resultados expressos em percentual mássico de Argamassa (Ar), Concreto (Co) e Cerâmica (Ce) nas camadas do equipamento	87
Tabela 9 – Resultados da análise da Recuperação (Rec) dos testes do uso do jigue a ar no beneficiamento gravimétrico dos agregados reciclados de RCD.	87
Tabela 10 – Inventário dos dados de entrada e saída dos <i>datasets</i> criados para representarem os processos de Reciclagem Atual (RA) e Proposta (RP) para os RCD brasileiros. <i>Dataset</i> de origem, <i>treatment of waste concrete gravel, sorting plant-CH</i>	99
Tabela 11 – Resultados da avaliação ambiental da produção de agregado graúdo reciclado dos processos de Reciclagem Atual (RA) e Proposta (RP) considerando a expansão do sistema com a inclusão dos impactos evitados da substituição parcial dos AGN e AMN pelos coprodutos de cada processo de reciclagem.	101
Tabela 12 – Dados de entrada e fonte de valores adotados na análise de custos dos métodos de Reciclagem Atual e Proposto para o RCD neste trabalho.....	112
Tabela 13 – Custos Fixos e Variáveis aplicados na análise econômica, considerando os valores identificados na literatura, balanço de massa e estimativa para os métodos de Reciclagem Atual (RA) e Reciclagem Proposta (RP) de reciclagem de RCD no Brasil.	113
Tabela 14 – Indicadores da análise econômica dos métodos de Reciclagem do RCD propostos neste trabalho.	118

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos agregados graúdos quanto à massa específica.	31
Quadro 2 – Fases da Avaliação do Ciclo de Vida.	32
Quadro 3 - Exemplo de categorias de impacto.	34
Quadro 4 - Principais características definidas para os estudos avaliados por Hackenhaar et al. (2018) e Waskow et al. (2018a) na avaliação do ciclo de vida na reciclagem de resíduos de construção e demolição com produção de agregados reciclados e que podem dar suporte às etapas de análise e discussão de resultados de ACV deste tipo de atividade.	40
Quadro 5 - Comentários relacionados ao desenvolvimento e resultados da análise de Intensidade de Impacto da reciclagem de RCD identificados em artigos científicos disponíveis nas plataformas <i>Science Direct</i> e <i>Springer</i>	47
Quadro 6 - Composição dos materiais utilizados neste trabalho. Parte das características dos materiais são obtidas das suas respectivas normas de referência para desempenho. Os corpos de prova utilizados têm suas resistências à compressão previstas na elaboração, conforme informado pela instituição de ensino que disponibiliza os materiais, entretanto não são disponibilizados ensaios confirmatórios.	56
Quadro 7 – Categorias de impacto avaliadas.	65
Quadro 8 – Premissas adotadas na definição de parte dos dados de entrada da análise de custo da produção brasileira de agregado graúdo reciclado.	72
Quadro 9 – Descrição das soluções alternativas e variações aplicadas nos dados de entrada proposto para busca por resultados economicamente mais atrativos na reciclagem do RCD brasileiro.	122

LISTA DE SIGLAS

a/c	Relação água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas De Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AGN	Agregado Graúdo Natural
AGR	Agregado graúdo reciclado
AGRpc	Agregado graúdo reciclado pobre em concreto
AGRrc	Agregado graúdo reciclado rico em concreto
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
AmGR	Agregado muito graúdo reciclado (granulometria > 19,1mm)
AMR	Agregado miúdo reciclado (granulometria < 4,75 mm)
APOS	Alocação no ponto de substituição (<i>Allocation at the point of substitution</i>)
Ar	Argamassa
CC	Critério de Concentração
CCV	Custos do Ciclo de Vida
Ce	Cerâmico(a)
CH	Confederação Helvética- Suíça (referência utilizada nos conjuntos de dados da base Ecoinvent)
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
Co	Concreto
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CP	Corpos de Prova
cpm	Ciclos por minuto
DALY	Anos de Vida Perdidos Ajustados por Incapacidade (<i>Disability Adjusted Life Year</i>)
DAR-e	Depleção de recursos abióticos - elementos
DAR-f	Depleção de recursos abióticos – combustíveis fósseis
FAETP	Ecotoxicidade de água doce
<i>fc</i>	Resistência à compressão
FCLt	Fluxo de Caixa líquido no momento t
Fi	Porcentagem de massa retida individual da fração i;
F1+F2.....+Fn	Soma das percentagens retidas individuais.
GEE	Gases do efeito estufa (<i>Greenhouse gas emission</i>)
GLO	Global (referência utilizada nos conjuntos de dados da base Ecoinvent)
GWP	Potencial de Aquecimento Global (<i>Global Warming Potential</i>)
HTP	Toxicidade Humana (<i>Human toxicity</i>)
I	Taxa de desconto
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
<i>li</i>	Investimento inicial total.
ISO	Organização Internacional de Padronização (<i>International Organization for Standardization</i>)
MAETP	Ecotoxicidade de água marinha
mAGRC	Massa de Agregado Reciclado de Concreto
MPa	Mega Pascal
N	Número de períodos estipulados (anos).
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ND	Não disponível
Ni	Número de grãos a serem medidos na fração i;
NM	Normalização da Associação Mercosul de Normalização (AMN)
ODP	Depleção da Camada de Ozônio

PIS	Programa de Integração Social
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RA	Reciclagem Atual
RCD	Resíduo da Construção e Demolição
Rec	Índice de Recuperação
RP	Reciclagem Proposta
RSU	Resíduo Sólido Urbanos
SETAC	Sociedade de Toxicologia Ambiental e Química (<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>)
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
SNIS	Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento
t	Tempo de fluxo de caixa,
TETP	Ecotoxicidade terrestre
TIR	Taxa Interna de Retorno do investimento
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
UNEP	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (<i>United Nations Environment Programme</i>)
VPL	Valor presente líquido
WBCSD	Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (<i>World Business Council for Sustainable Development</i>)
ρ_f	densidade do fluido utilizado no equipamento (neste estudo o ar);
ρ_h	densidade da partícula mais pesada (g/cm^3);
ρ_l	densidade da partícula mais leve (g/cm^3).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. CONTEXTO E JUSTIFICATIVA.....	17
1.2. OBJETIVO GERAL	18
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.4. ESTRUTURA DA TESE DE DOUTORADO	19
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	20
2.2. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO: MÉTODOS DE RECICLAGEM ATUAL E PROPOSTO	22
2.2.1. A reciclagem dos resíduos de construção e demolição no Brasil	22
2.2.2. Beneficiamento gravimétrico dos agregados reciclados com o jigue a ar	24
2.2.3. Propriedades importantes no beneficiamento gravimétrico com jigue a ar	26
2.3. CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS RECICLADOS PARA PRODUÇÃO DE NOVOS CONCRETOS.....	29
2.3.1. Granulometria	29
2.3.2. Forma	30
2.3.3. Massa Unitária e Massa Específica.....	30
2.4. AVALIAÇÃO AMBIENTAL DA RECICLAGEM DO RCD.....	31
2.4.1. Avaliação do Ciclo de Vida	31
2.4.2. Modelos de sistema na Avaliação do Ciclo de Vida.....	35
2.4.3. Avaliação do Ciclo de Vida na reciclagem de resíduos da construção e demolição.....	37
2.5. ANÁLISE ECONÔMICA DA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	43
2.6. INTENSIDADE DE IMPACTO COMO SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO	45
2.6.1. Intensidade de Impacto no gerenciamento do Resíduo de Construção e Demolição.....	46
2.6.2. Principais premissas na análise de Intensidade de Impacto na reciclagem de Resíduos da Construção e Demolição	50
3. MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1. ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DO BENEFICIAMENTO GRAVIMÉTRICO	55
3.1.1. Geração e Caracterização dos Agregados de RCD.....	56
3.1.2. Critério de Concentração entre os agregados de RCD em estudo.....	59
3.1.3. Testes de jigagem e Parâmetros de operação.....	60
3.2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO BRASILEIRO.....	63
3.2.1. Definição do objetivo e escopo.....	64
3.2.2. Inventário do ciclo de vida.....	67
3.3. ANÁLISE ECONÔMICA DA RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO BRASILEIRO	70
3.3.1. Inventário dos custos da reciclagem de RCD	71
3.3.2. Definição dos indicadores econômicos.....	72
3.4. ANÁLISE DA INTENSIDADE DE IMPACTO DOS CENÁRIOS DE RECICLAGEM DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO BRASILEIRO	74
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	76
4.1. RESULTADOS DA ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DO JIGUE A AR NO BENEFICIAMENTO GRAVIMÉTRICO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO BRASILEIRO	76
4.1.1. Caracterização das amostras	76
4.1.2. Preparação dos agregados graúdos reciclados gerados para os testes no jigue a ar.....	82
4.1.3. Testes no jigue a ar	83
4.1.4. Perdas do processo e emissões atmosféricas.....	87

4.1.5. Análise da influência do beneficiamento gravimétrico dos agregados graúdos reciclados gerados	90
4.2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE AGREGADO GRAÚDO RECICLADO BRASILEIRO	96
4.2.1. Inventário do Ciclo de Vida	96
4.2.2. Avaliação do impacto do ciclo de vida	100
4.3. ANÁLISE DOS CUSTOS NA PRODUÇÃO DE AGREGADO GRAÚDO RECICLADO BRASILEIRO	108
4.3.1. Inventário dos dados de entrada da análise de custo	108
4.3.2. Levantamento de Custos Fixos e Variáveis na reciclagem do RCD	111
4.3.3. Análise dos indicadores econômicos	117
4.3.4. Soluções alternativas à viabilidade econômica	122
4.4. INTENSIDADE DE IMPACTOS DOS CENÁRIOS DE RECICLAGEM DO RCD BRASILEIRO	125
5. CONCLUSÕES	129
6. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	132
REFERÊNCIAS	133
PUBLICAÇÕES RELATIVAS À TESE	145
GLOSSÁRIO	146

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

Resíduos da Construção e Demolição (RCD) são gerados em grandes quantidades. Os valores de RCD coletado no Brasil representam, inclusive, quantidades que superam a metade da geração dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) coletados na maior parte dos municípios brasileiros (ABRELPE, 2017). As práticas atuais de gestão dos RCD evidenciam o predomínio de destinos menos nobres, como sub-base de rodovias, manutenção de estradas não pavimentadas, nivelamento de terrenos ou ainda a disposição em aterro de inertes.

As características e propriedades do RCD são exploradas por diversos estudos acadêmicos que consideram a possibilidade de reciclagem e reuso deste resíduo em substituição ao agregado natural na construção civil, como agregado miúdo e, principalmente, graúdo. A constatação do melhor desempenho de novos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados que contenham maior percentual de agregados reciclados de concreto induzem a um paradigma mais recente nas pesquisas da reciclagem do RCD brasileiro, o estudo de técnicas de beneficiamento.

O estudo das técnicas de beneficiamento do RCD no Brasil, entretanto, tem se restringido ao desempenho de equipamentos (como o jigue a ar) na separação de diferentes materiais que diferem da composição média típica do RCD gerado no Brasil. Assim, sabe-se que é possível segregar agregados graúdos reciclados de concreto, gesso, cerâmica, madeira, papéis e outros com o uso do jigue a ar, concentrando as frações de agregados reciclados de concreto a percentuais elevados sob determinados parâmetros de operação. Da mesma forma, há algumas lacunas a serem preenchidas nos estudos do uso deste equipamento no beneficiamento de agregados graúdos reciclados, principalmente referentes à geração de emissões de material particulado.

As avaliações ambientais e econômicas da reciclagem do RCD se restringem à análise dos seus respectivos vieses, sem exploração, de maneira complementar, ou paralela, de questões técnicas. Assim, são desconsideradas, muitas das vezes, características e/ou propriedades dos agregados reciclados brasileiros e desempenho das tecnologias atuais ou futuras na reciclagem do RCD no Brasil. Tanto na avaliação ambiental quanto na econômica há obstáculos a serem superados, principalmente relacionados à disponibilidade de metodologia transparente, adaptável e replicável ao cenário brasileiro de reciclagem do RCD.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) distingue resíduo e rejeito, permitindo que apenas este último seja destinado à disposição final. Os conceitos disponíveis nesta legislação permitem inferir que um mesmo material pode ser definido como resíduo ou rejeito conforme a disponibilidade técnica e econômica de reutilização e/ou reciclagem de cada região onde o mesmo é gerado. A mesma Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), estabelece dentre seus princípios a compatibilização de critérios econômicos e da redução dos impactos ambientais.

Desta forma, não se encontra disponível um estudo que concilie o uso do jigue a ar associado aos atuais processos de reciclagem do RCD brasileiro, enquadrando o cenário de reciclagem deste tipo de resíduos aos conceitos (resíduo/rejeito) e princípios dados pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), disponibilizando a avaliação da viabilidade técnica, econômica e ambiental em comparação ao uso do agregado natural na construção civil.

1.2. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade técnica, ambiental e econômica do uso do jigue a ar no beneficiamento gravimétrico dos agregados graúdos de RCD com características do gerado no Brasil.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atender ao objetivo geral da pesquisa, entende-se necessário atingir os objetivos específicos descritos a seguir:

- a) Avaliar a viabilidade técnica do beneficiamento dos agregados graúdos de RCD com características do gerado no Brasil com o uso do jigue a ar, identificando a eficiência da concentração de agregados graúdos reciclados de concreto, possíveis alterações das propriedades físicas dos agregados graúdos reciclados, parâmetros ótimos de operação do jigue a ar, perdas e emissões de material particulado;
- b) Avaliar os impactos ambientais potenciais de agregados produzidos a partir dos processos de reciclagem atual e proposto (com a adição do jigue a ar) para o RCD brasileiro e compará-lo ao Agregado Graúdo Natural (AGN);
- c) Analisar a viabilidade econômica dos processos de reciclagem avaliados;

- d) Analisar a Intensidade de Impacto dos processos de reciclagem avaliados.

1.4. ESTRUTURA DA TESE DE DOUTORADO

Esta tese de doutorado está estruturada em 6 capítulos. O **primeiro capítulo** refere-se à justificativa e definição do objetivo geral e específicos deste trabalho.

No **segundo capítulo** são apresentados a revisão da literatura, contextualização da problemática e lacunas a serem preenchidas pelos resultados desta tese. São abordadas questões referentes à geração dos resíduos da construção e demolição, o método atual de reciclagem do RCD no Brasil e seus avanços, características do RCD gerado no Brasil e adequados ao uso na Construção Civil, além de questões voltadas à avaliação ambiental e à análise econômica de processos de reciclagem.

No **terceiro capítulo** são descritos os procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento de cada etapa do trabalho. Este capítulo é apresentado em 4 subcapítulos, cada um apresentando o método aplicado para as avaliações técnica, ambiental, econômica e de Intensidade de Impacto do uso do jigue a ar na reciclagem do RCD com características do gerado no Brasil. Entende-se que a metodologia proposta é capaz de atender aos objetivos específicos e geral deste trabalho.

O **quarto capítulo** apresenta os resultados da execução dos procedimentos metodológicos apresentados no capítulo anterior. Da mesma forma, os resultados são apresentados em 4 subcapítulos onde são discutidos os resultados obtidos e sua conformidade com normas e literaturas de referência a cada tema.

O **quinto capítulo** traz as conclusões deste trabalho. De maneira objetiva, este capítulo visa concluir sobre as avaliações e análises adotadas para atender aos objetivos propostos ao início da tese de doutorado.

O **sexto capítulo**, denominado Sugestão de Trabalhos Futuros, é desenvolvido com a finalidade de sugerir trabalhos futuros complementares e/ou originados de lacunas identificadas no desenvolvimento desta tese.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Resíduos da Construção e Demolição (RCD) estão entre os mais gerados ao redor do mundo. As principais fontes de RCD, no Brasil, são as construções, reformas e a demolição. Dados da literatura revelam diferentes quantidades para cada um destes tipos de fonte de geração (PINTO e GONZALEZ, 2005; ÂNGULO et al., 2011; BERNARDES et al., 2008; MIRANDA et al., 2009), sendo desta forma difícil precisar em termos percentuais a participação de cada origem no RCD que chega ao seu destino final. Kanno et al. (2019) apresentam dados sobre métodos de quantificação da geração de RCD para o Brasil, evidenciando a lacuna e complexidade deste tipo de análise.

Da mesma forma, a quantificação do RCD gerado no Brasil não possui dados estatísticos robustos. O Sistema Nacional de Informações para o Saneamento (SNIS) pode se tornar uma das principais fontes de consulta aos dados de geração de RCD. A alimentação deste Sistema, entretanto, ainda não é atendida por muitos municípios brasileiros. Assim, neste momento dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, de 2017 (ABRELPE, 2017), parecem ser a principal fonte de informações sobre as quantidades coletadas pelas prefeituras brasileiras.

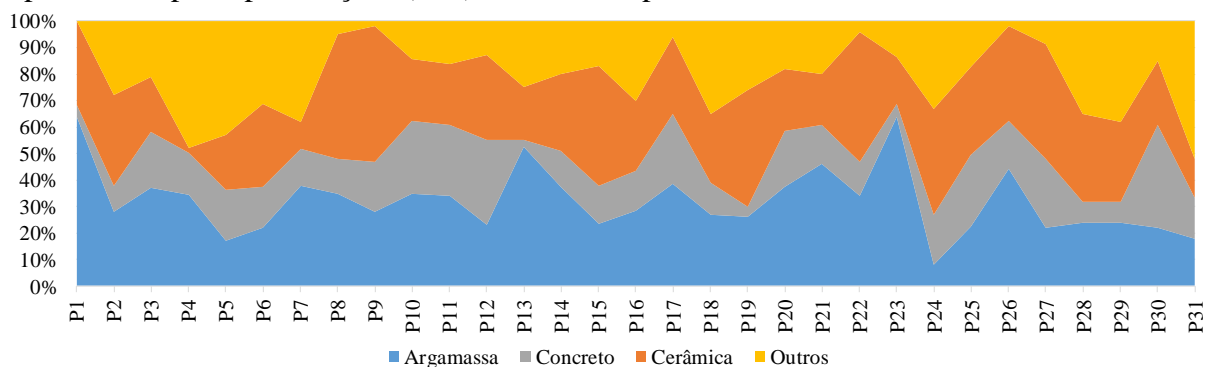
É estimada uma geração de 45 milhões de toneladas de RCD anual no Brasil (ABRELPE, 2017), permitindo inferir uma geração média de 123.421 toneladas de RCD/dia e 0,6 kg/pessoa/dia. Essa geração de RCD é superior à geração em 25 dos 28 membros da União Europeia (EUROPEAN COMMISSION, 2017).

Problemas de gestão do RCD tem na Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) a possibilidade da conversão para novas práticas que conduzam à minimização e, quando da sua geração, a correta gestão deste tipo de resíduo para condições mais sustentáveis. Além da diferenciação conceitual de resíduos e rejeitos, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), estabelece, dentre seus princípios, a necessidade de soluções que compatibilizem viabilidade econômica e redução de impactos ambientais.

A segregação do resíduo na fonte é uma das premissas para melhores práticas na gestão de qualquer tipo de resíduo. A partir da análise da composição gravimétrica do RCD de diversos municípios brasileiros é possível verificar que os materiais mais representativos são argamassa, concreto e cerâmica (de 72,5% a 83,5%), como pode ser visto na Figura 1, correspondentes aos

resíduos Classe A¹ segundo o Conselho Nacional de Meio Ambiente (BRASIL, 2002). Mais informações sobre esta pesquisa podem ser encontradas em Waskow et al. (2018a).

Figura 1 - Composição do RCD (eixo y) a partir de 31 artigos brasileiros publicados. Eixo x representado pelas publicações (Pn..) consultados pelos autores.



Fonte: o autor.

Apesar de diferir entre metodologias de análise adotadas em cada trabalho, os artigos considerados na construção da Figura 1 revelam que mesmo avaliações de uma mesma cidade apresentam variação da composição, exceção dada a alguns municípios como Porto Alegre-RS, onde Leite (2001) e Scoot Hood (2006) identificam percentuais de concreto, argamassa e cerâmicas muito próximas (41% argamassa, 22-28% concreto e 31-37% cerâmica).

Resíduos como papel, plástico, madeira e outros comumente recicláveis tem um mercado pós consumo estabelecido, e o seu uso após reciclagem é aceito para diversas finalidades. Os agregados de RCD brasileiros, entretanto, tem encontrado uma serie de barreiras ao seu uso em substituição ao agregado natural, principalmente devido à sua característica de mistura e desempenho desconhecida por profissionais do setor da construção civil.

Via de regra, a viabilidade técnica da aplicação dos agregados reciclados depende de quão próximos em desempenho estes estão dos agregados naturais. Uma maior concentração de agregados de concreto na massa de RCD permite que um novo concreto produzido como agregados reciclados atinja melhores valores de desempenho que se adotado um RCD com maior fração de argamassa ou cerâmica (JIMÉNEZ et al., 2013; ADAMS et al., 2016; MCGINNIS et al., 2017; SILVA et al., 2014; WIJAYASUNDARA et al., 2017). Nagataki et

¹ Art. 3º, inciso I da Resolução Conama 307 de 2002 (BRASIL, 2002) [...] são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras.

al. (2004), Cabral (2007) e Pedro et al. (2014) evidenciam resultados promissores na substituição parcial, ou total, de agregados naturais por agregados reciclados na produção de um novo concreto. Cabral (2007) também fornece modelo matemático que permite estimar o desempenho, por exemplo resistência à compressão (f_c), de concretos produzidos com agregados reciclados. Ainda assim, outras propriedades devem ser avaliadas, como distribuição granulométrica, forma, presença de substâncias nocivas e outros (LEITE, 2001).

2.2. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO: MÉTODOS DE RECICLAGEM ATUAL E PROPOSTO

Os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) brasileiros tem um cenário atual pouco otimista. As barreiras ao crescimento da reciclagem do RCD podem ser divididas em questões de gestão, como falta de segregação nas fontes de geração e controle da destinação, e tecnológicas, considerando a incerteza da qualidade e desempenho do agregado reciclado.

Frente a um cenário evolutivo das questões de gestão do RCD, dado pela aplicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), as questões tecnológicas necessitam, ao mesmo tempo, ser objeto de interesse para, tão logo sejam demandadas, estarem disponíveis para um avanço na gestão deste tipo de resíduo no Brasil. Assim, o processo de reciclagem do RCD, que tem etapas semelhantes em todo o Brasil, carece de avanços tecnológicos que contribuam para a produção de agregados de melhor qualidade, e por consequência, maior competitividade no mercado de agregados com os naturais.

2.2.1. A reciclagem dos resíduos de construção e demolição no Brasil

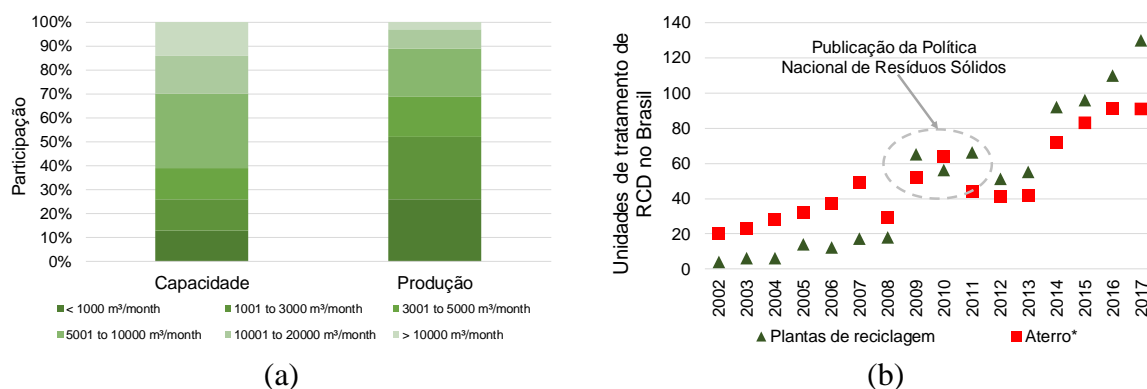
A caracterização do cenário atual de reciclagem brasileiro é dificultada pela pouca disponibilidade de dados estatísticos sobre o setor. Algumas das fontes de dados são a Associação Brasileiro para Reciclagem de Resíduos da Construção e Demolição (Abrecon), dado pela Pesquisa Setorial realizada em 2014 (ABRECON, 2015), e a série histórica do Sistema Nacional de Informações para o Saneamento (SNIS, 2018).

Dados da Abrecon revelam importantes informações de produção dos agregados reciclados no Brasil. Segundo o Relatório Setorial disponibilizado pela Associação (ABRECON, 2015), apesar de 70% das plantas de reciclagem de RCD que disponibilizaram

informações tem capacidade produtiva instalada igual ou inferior a 10.000 m³/mês, mais da metade (52%) produz menos de 3.000 m³/mês (Figura 2a).

A série histórica de informações disponíveis no SNIS, declaradas por unidades de destinação de resíduos no Brasil, sugerem uma mudança na relação entre o número de aterros de resíduos inertes, como o RCD, e plantas de reciclagem dos resíduos de construção e demolição no período de publicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, como pode ser visto na Figura 2b. A partir destes resultados, é possível inferir que os dados da Abrecon (2015) podem ter sido alterados, fato que será confirmado na nova Pesquisa Setorial em andamento pela Associação.

Figura 2 – Consolidação de informações referentes a características das plantas de reciclagem de RCD no Brasil e dados sobre a gestão dos mesmos. Ambas as fontes de informações são resultadas de dados disponibilizados por unidades de destino de RCD.

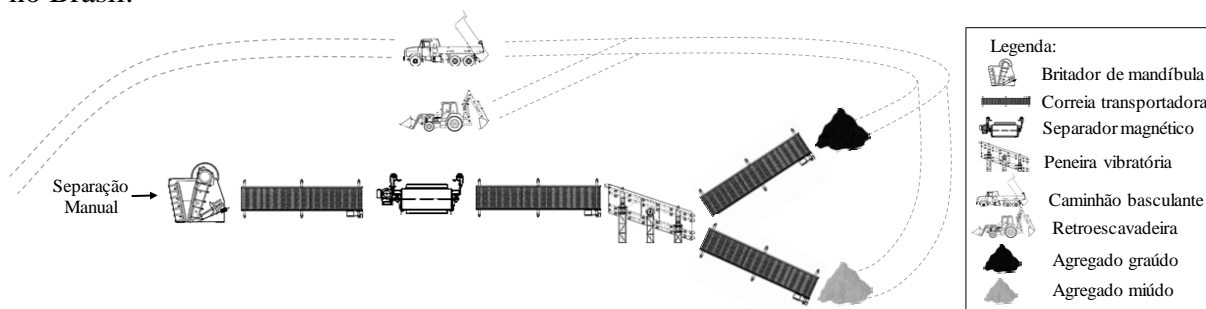


Fonte: adaptado de (a) Abrecon (2015) e (b) SNIS (2017).

Não há fonte de dados atualizadas com relação à tecnologia empregada nas plantas de reciclagem no Brasil, restringindo os autores de diversas publicações a comparação, e confirmação, da equivalência do conjunto de processos avaliados com os identificados por Miranda et al. (2009) em 2009, adotados até hoje, 10 anos depois: separação manual prévia, retroescavadeira, alimentador de vibrador, correia transportadora, britador de mandíbula ou impacto, separador magnético e peneira vibratória (Figura 3).

Ainda que as premissas da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) priorize a não geração, é conhecida a quantidade significativa de RCD gerado atualmente no Brasil (ABRELPE, 2017) e que possivelmente a manutenção destes valores irão se prolongar por mais alguns anos. Desta forma, possíveis avanços no uso do agregado reciclado em substituição ao agregado natural devem ser considerados, supondo que o mercado brasileiro do agregado reciclado tem um significativo potencial de expansão.

Figura 3 – Processo e equipamentos geralmente identificados em plantas de reciclagem de RCD no Brasil.



Fonte: adaptado de Miranda et al. (2009)

Alguns desafios devem ser superados para haver a consolidação do mercado de agregados reciclados. Considerando o número de plantas de reciclagem de RCD no Brasil (SNIS, 2017), a capacidade média instalada (ABRECON, 2015) e a geração de RCD estimada pela Abrelpe (2017), se todas as plantas disponíveis operassem em sua capacidade máxima somente a metade do total de RCD coletado pelas prefeituras brasileiras seria beneficiada.

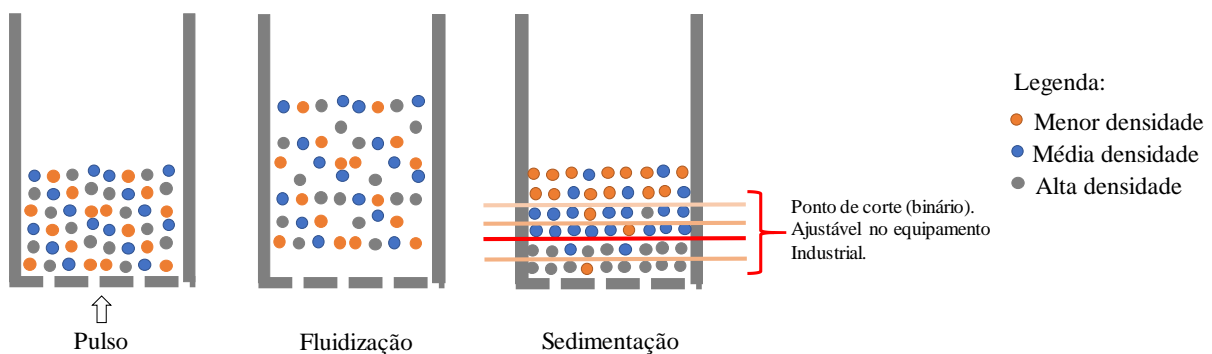
A qualidade dos agregados reciclados, avaliado por menos de 5% das plantas de reciclagem brasileiras (ABRECON, 2015), tem ganhado crescente interesse da comunidade acadêmica. Pacheco-Torgal et al. (2013) descrevem diferentes estudos envolvendo o uso de tratamentos mecânicos, químicos e térmicos na reciclagem do RCD, restringindo-se a países da Europa, Ásia e América do Norte. Iniciativas brasileiras, de avanço tecnológico, se restringem a poucos trabalhos, como os realizados por Cazacliu et al. (2014), Sampaio et al. (2016) e Ambrós et al. (2017). Estes autores avaliam a possibilidade do uso do beneficiamento gravimétrico com o jigue a ar, para remover impurezas e concentrar a fração de agregados de concreto na massa de RCD.

2.2.2. Beneficiamento gravimétrico dos agregados reciclados com o jigue a ar

O jigue a ar é um equipamento de simples operação, e possibilita a separação de agregados sem o uso de produtos químicos ou água, o que torna este método atrativo para o beneficiamento de resíduos. A separação no jigue a ar ocorre devido a repetidos pulsos de ar ascendente que resulta em movimentos ascendentes e descendentes da cama de partículas de agregados. O resultado, ao final do processo, são sucessivas camadas de agregados separados por diferença de densidade, onde os agregados mais densos encontram-se na camada inferior, e os menos densos na camada superior.

A Figura 4 ilustra o processo de estratificação que ocorre em um jigge (seja o fluido ar ou água). O número de pulsos do fluido por determinado período de tempo é definido como Frequência de Expansão. O alcance da fluidização do meio pelo pulso de fluido é definido como Taxa de Expansão. Informações mais detalhadas do processo, dos princípios e modo de operação do equipamento podem ser consultados em Sampaio et al. (2016), Ambrós et al. (2017) e Ambrós (2017).

Figura 4 – Processo de estratificação no jigge a ar. Os agregados mistos alimentam o equipamento. A introdução do pulso de ar expande o leito de agregados, que pela gravidade sedimentam. O processo ocorre ciclicamente até atingir a maior capacidade de concentração do agregado mais denso na camada inferior.



Fonte: adaptado de Sampaio et al. (2016).

A definição dos parâmetros ótimos de operação do jigge a ar (Frequência de expansão, Taxa de expansão e Tempo de operação) para o beneficiamento do RCD é um dos desafios, devido à típica heterogeneidade deste tipo de resíduo, seja pela sua composição ou características físicas. Alguns trabalhos já realizados focaram seus esforços na identificação dos melhores parâmetros de operação do equipamento para a separação de RCD, como Cazacliu et al. (2014) e Sampaio et al. (2016), entretanto não adotando a composição típica do RCD brasileiro, composta basicamente por argamassa, concreto e cerâmica.

Cazacliu et al. (2014), disponibilizam importantes informações sobre a influência da distribuição granulométrica. Para estes autores, os melhores resultados de concentração de agregado reciclado de concreto são alcançados quando do uso de distribuição entre 4 e 20 mm. Adotando distribuição granulométrica semelhante, Sampaio et al. (2016) avaliaram a influência dos parâmetros de expansão na concentração de concreto. Estes autores sugerem que a Taxa de expansão (fluxo de ar ascendente) usada para expandir o leito durante o beneficiamento no jigge a ar deve ser intensa o suficiente para permitir que partículas de diferentes densidades se movam distintamente e assim alcancem diferentes posições no leito de agregados.

Com relação à Frequência de expansão, Sampaio et al. (2016) sugerem que a onda de dispersão deve se propagar por todo o leito, uma vez que o fluxo dos agregados muda rapidamente de direção, o que pode prejudicar a separação se não for bem controlado. Além disso, Frequências baixas podem resultar em fluxo insuficiente para elevar completamente o leito de partículas (AMBRÓS, 2017).

Assim, identificar os melhores parâmetros de operação do jigge a ar é de suma importância para viabilizar sua aplicação, especialmente para materiais de baixo valor agregado, como agregados reciclados. Mais do que isso, no caso do RCD, a otimização deve levar em conta suas características de composição, distribuição granulométrica, forma e tamanho das partículas, densidade, existência de contaminantes, entre outros.

Por causa de suas vantagens inerentes, o jigge a ar surge como uma opção potencial para melhoria da qualidade dos agregados reciclados em plantas de reciclagem brasileiras. No entanto, não há estudos que avaliam seu desempenho ao processar RCD com características de composição do gerado no Brasil, como a definida por Waskow et al. (2018a). Somado a isto, existem outras lacunas na literatura relacionadas ao uso do jigge a ar no beneficiamento do RCD, como a geração de poeira e emissões atmosféricas, composta de partículas finas inaláveis e não inaláveis que podem resultar em danos à saúde.

2.2.3. Propriedades importantes no beneficiamento gravimétrico com jigge a ar

Alguns fatores podem influenciar na capacidade de beneficiamento do material via jigge a ar. Estes fatores devem ser levados em consideração na aferição do equipamento, assim como na interpretação dos resultados. Ambrós (2017) cita alguns dos elementos que podem influenciar a estratificação em jiggs descontínuos, como: a *densidade*, o *tamanho* e a *forma* das partículas, a *taxa* e a *frequência* de expansão do leito, assim como o *tempo* de duração das expansões (tempo de beneficiamento do material no equipamento).

2.2.3.1. Densidade

A densidade, termo genericamente adotado para englobar as análises de massa unitária e massa específica, é uma característica intrínseca de cada material e um dos principais fatores que regem a segregação e conseqüente beneficiamento dos materiais no jigge a ar. O resultado do processo de beneficiamento gravimétrico obtido é reflexo da diferença entre os componentes

de menor e maior densidade. Segundo Ambrós (2017), para pequenas diferenças, ocorre a formação de uma camada inferior rica no componente denso, uma camada superior abundante no componente leve, e uma camada mista entre as duas nas quais ambos os componentes se encontram misturados. Para diferenças significativas de densidade, ocorre a formação de duas camadas distintas, cada qual rica em um dos componentes. Assim, a avaliação da densidade dos agregados que se deseja segregar é um dos parâmetros iniciais de qualquer trabalho de beneficiamento gravimétrico. O *critério de concentração* e o *Índice de Recuperação*, que serão vistos adiante, são índices que indicarão a maior ou menor capacidade de segregação entre agregados e a capacidade de recuperação do material de interesse, respectivamente.

2.2.3.2. Tamanho do agregado

De modo geral, quanto menor o tamanho da partícula menos precisa é a separação (KOWOL e MATUSIAK, 2015; PITA e CASTILHO, 2016). Sampaio e Tavares (2005) e Wills (2006) afirmam que a faixa de tamanho dos agregados é um dos principais critérios de avaliação, seja para a utilização do jigge a ar ou para outros métodos de concentração gravimétrica.

Em geral, uma mistura formada por partículas de mesma composição e diferentes tamanhos submetidas a contínuas expansões em um jigge tende a se segregar classificando os grãos maiores na parte inferior e os menores na superior. Este resultado reflete uma predominância do mecanismo de sedimentação retardada. Desta forma, pode-se dizer que a segregação ocorreu da mesma forma como em um leito de agregados de tamanho equivalentes, mas com diferentes densidades (SAMPAIO e TAVARES, 2005; KIRCHBERG; HENTZSCHEL, 1957^{apud} Ambrós, 2017).

2.2.3.3. Forma do agregado

O tamanho de partícula é influenciado, na reciclagem do RCD, principalmente pelo processo de cominuição em britador. A forma dos agregados irá influenciar no processo de jigagem, como em quaisquer outros sistemas onde haja vibrações, tendendo ao aumento da densidade da camada inferior do leito relacionando a força motriz de segregação a diferenças de empacotamento (massa de sólidos por unidade volumétrica) entre os componentes devido às diferenças na geometria das partículas. A separação satisfatória de materiais com densidades

próximas (como argamassa, concreto e cerâmico) pode ser alcançada devido a diferenças significativas entre o grau de empacotamento dos mesmos (CAZACLIU et al., 2014).

Partículas lamelares sofrem maior influência do arraste diferencial devido a componente normal (perpendicular à superfície da partícula) exercido pelo fluido. Pita e Castilho (2016) demonstraram a influência da lamelaridade dos agregados nos seus resultados. Segundo os autores, ao passo que quando o agregado mais leve possuía formato mais lamelar os resultados de segregação foram mais satisfatórios, quando da utilização de agregados mais densos, com maior quantidade de lamelares, resultaram em maior presença destes na fração superior junto aos agregados leves.

Desta forma, qualquer possibilidade de alteração da forma dos agregados pelo jige a ar, ao longo do processo de beneficiamento, altera a eficiência do equipamento ou prejudica a identificação da capacidade de separação do mesmo. Sendo assim, ensaios de abrasão e alteração da forma dos agregados podem sugerir, de ante mão, a inviabilidade do uso do equipamento para determinado tipo de agregado.

2.2.3.4. Taxa e frequência de expansão do leito

A expansão vertical do leito de agregado, Taxa de expansão, deve ser suficiente para permitir que partículas com diferentes densidades se movimentem e atinjam diferentes posições no leito. Caso seja utilizada uma baixa expansão do leito pode não haver suficiente dispersão de modo a possibilitar a ascensão dos agregados leves. Já expansões altas podem sofrer intervenção excessiva do contra fluxo descendente dos agregados antes do fim do ciclo de expansão (SAMPAIO e TAVARES, 2005).

Com relação à frequência de expansão, pulsações demasiadas não permitem que a onda de dispersão se propague por todo o leito, uma vez que o fluxo muda rapidamente de direção, já frequências baixas podem resultar em fluxo insuficiente para elevar totalmente as partículas do leito (AMBRÓS, 2017).

Desta forma se faz necessário a identificação dos melhores parâmetros de taxa e frequência de expansão do leito no equipamento para cada tipo de material.

2.2.3.5. Outros fatores

Ambrós et al. (2016) comprovaram a presença da influência da parede na presença de fluxo convectivo ao longo do processo de beneficiamento em jigge descontínuo. Estes autores identificaram que uma segregação no plano horizontal ocorreu rapidamente no início do processo de jigagem e permaneceu aproximadamente constante à medida que a segregação vertical evoluiu concluindo que os efeitos da parede podem influenciar significativamente a composição dos produtos do beneficiamento, especialmente se forem utilizados tempos de operação curtos.

Ambrós (2017) utilizou de traçadores para a identificação da velocidade média de convecção e também para a identificação da influência da taxa e frequência de expansão sobre o fluxo convectivo. O autor considerou que seus resultados sugeriram um aumento da intensidade do fluxo convectivo na superfície do leito à medida que a amplitude de pulsação do sistema é elevada. Ele ressalta que, como nada foi revelado a respeito do movimento no interior do leito, seria incerto inferir sobre o efeito global da redução da frequência (ou aumento da taxa de expansão do leito) sobre o fluxo convectivo.

Da mesma forma, vale considerar a possível influência do efeito parede nos resultados a serem obtidos para cada tipo de material analisado.

2.3. CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS RECICLADOS PARA PRODUÇÃO DE NOVOS CONCRETOS

O conhecimento prévio das principais características do agregado é importante para possibilitar a identificação do seu potencial uso e alguns pontos de atenção dentro do processo de beneficiamento. Parâmetros como granulometria, forma, massa unitária e massa específica são algumas das características que podem, inicialmente, sugerir a possibilidade de aplicação do agregado de RCD, ou não.

2.3.1. Granulometria

A NBR 7.211 (ABNT, 2009a) classifica os agregados como graúdo (entre 75mm e 4,75mm), miúdo (entre 4,75mm e 0,15mm) e *filer* (<0,075mm). A NBR 15116 (ABNT, 2004b) especifica que para realização do ensaio de distribuição granulométrica em agregados

reciclados seja utilizada a NBR NM 248 (ABNT, 2003) quando em concreto sem função estrutural, a cada lote utilizado. Entretanto, assim como no caso dos agregados naturais, o tipo de britador e a abertura da mandíbula é o fator que irá condicionar o tamanho das partículas.

2.3.2. Forma

A forma do agregado, por exemplo, deve ser controlada, pois influencia o fator de empacotamento do material, a adesão entre a pasta de cimento, a partícula e a massa específica do concreto fresco, a resistência à tração das partículas e sua energia de ruptura (MEHTA e MONTEIRO, 2014; AFSHAR et al., 2017). Quanto mais ásperos, angulosos e alongados forem os agregados, mais pasta será exigida para concretos de mesma trabalhabilidade. Esta quantidade maior de pasta é necessária para envolver a maior área específica que estes grãos possuem, e compensar dificuldades no rolamento dessas partículas (WEIDMANN, 2008).

Os agregados podem apresentar as seguintes formas: arredondada, irregular, lamelar, angulosa, alongada e lamelar alongada. Leite (2007) afirma que 79,5% dos grãos lamelares de RCD são compostos por materiais cerâmicos, enquanto 55,7% dos grãos cúbicos são de materiais cimentícios. Desta forma, ainda afirma que quanto maior a quantidade de materiais cerâmicos, maior tendência a se obter agregados lamelares e, quanto maior a quantidade de materiais cimentícios, maior a concentração de agregados cúbicos. Essa lamelaridade é resultado da resistência inferior do material cerâmico com relação ao concreto, e sua passagem pelo britador de mandíbulas produz uma quantidade muito maior de material lamelar (LEVY, 2001).

A norma NBR 7211 (ABNT, 2009a), especifica o limite da relação comprimento/espessura $< 3\text{mm}$, aplicando a norma NBR 7809 (ABNT, 2008) para agregados graúdos na produção de concreto. A NBR 15116 (ABNT, 2004b), que trata especificamente dos agregados reciclados, também define como limite $< 3\text{mm}$.

2.3.3. Massa Unitária e Massa Específica

De acordo com Ribeiro et al. (2003), os agregados graúdos podem ser classificados quanto a sua massa específica (relação entre massa e o volume de sólidos incluindo os vazios) em normais, leves ou pesados. A classificação conforme a massa específica do agregado pode ser observada no Quadro 1.

Agregados naturais apresentam valores característicos de massa específica entre 2,62 g/cm³ e 2,80 g/cm³ (NEVILLE, 2016). Já as massas unitárias e específica dos agregados reciclados são menores que as dos agregados naturais, e de acordo com Lovato (2007), a massa específica apresenta valores inferiores, na faixa de 9,5-15,8%, e a massa unitária na faixa de 23-30%.

Quadro 1 - Classificação dos agregados graúdos quanto à massa específica.

CLASSE	MASSA ESPECÍFICA	EXEMPLOS	EXEMPLOS DE UTILIZAÇÃO
Leves	< 1 kg/cm ³	Escória de alto-forno, lodo de esgoto, argila expandida	Pré-moldados
Normais	entre 1 e 2 kg/cm ³	Areia, brita, pedregulho	Obras correntes
Pesados	> 2 kg/cm ³	Barita, limonita, magnetita	Concretos estruturais especiais: blindagem, contra radiações, etc.

Fonte: Ribeiro et al. (2003).

2.4. AVALIAÇÃO AMBIENTAL DA RECICLAGEM DO RCD

Com o atual apelo por soluções ambientalmente mais amigáveis, a constatação da existência de um benefício de um produto, ou nova tecnologia, pode ser a chave para a mudança das práticas atuais de gestão e tecnologia disponíveis para os processos de reciclagem dos RCD no Brasil. O uso da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) mostra-se como o caminho mais apropriado para evidenciar estes benefícios ambientais, dada a existência de padronização dos princípios, estrutura, requisitos e orientações dados pelas normas NBR 14040 (ABNT, 2009a) e NBR 14044 (ABNT, 2009b).

2.4.1. Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é um método estruturado, abrangente e internacionalmente padronizado. Este método quantifica as emissões e recursos consumidos em todas as fases do ciclo de vida de um produto, processo ou serviço, analisa seus impactos sobre o meio ambiente e a saúde e considera questões relacionadas ao esgotamento de recursos associados a qualquer bem ou serviço (IBICT, 2014).

A ACV foca nos aspectos da atividade, produto ou serviço e seus potenciais impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto (da extração da matéria-prima à sua disposição final). Mediante justificativa adequada, a ACV pode ser aplicada em estudos com os seguintes escopos: estudos de berço ao túmulo, berço ao portão; do portão ao portão; e partes

específicas do ciclo de vida (por exemplo, gerenciamento de resíduos, componentes de um produto) (ABNT, 2009b).

2.4.1.1. Estrutura da ACV

Um estudo de ACV é composto por 4 fases: definição do objetivo e escopo; análise de inventário do ciclo de vida (ICV); avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV); e interpretação. A norma NBR 14040 (ABNT, 2009b) descreve cada uma das fases, conforme disponível no Quadro 2.

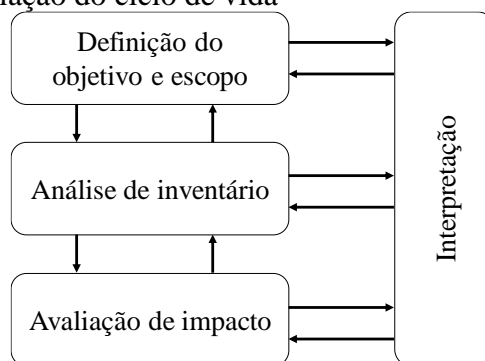
Quadro 2 – Fases da Avaliação do Ciclo de Vida.

FASE	DESCRIÇÃO
Definição do objetivo e escopo	incluindo a fronteira do sistema e o nível de detalhamento, depende do objeto e do uso pretendido para o estudo. A profundidade e a abrangência da ACV podem variar consideravelmente, dependendo do objetivo do estudo em particular.
Análise de inventário	fase da avaliação do ciclo de vida envolvendo a compilação e quantificação das entradas e saídas de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida.
Avaliação de impactos	fase da avaliação do ciclo de vida que visa ao entendimento e à avaliação da magnitude e significância dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do ciclo de vida do produto.
Interpretação	fase da avaliação do ciclo de vida na qual as constatações da análise de inventário ou da avaliação de impacto, ou de ambas, são avaliadas com relação ao objetivo e escopo definidos, a fim de se chegar a conclusões e recomendações.

Fonte: NBR 14040 (ABNT, 2009b); e NBR 14044 (ABNT, 2009c).

A Figura 5 ilustra a interação que existe entre cada fase da ACV. Desta forma, as 4 fases da ACV podem estar em constante atualização, conforme o objetivo do trabalho e o andamento das demais etapas.

Figura 5 - Estrutura da avaliação do ciclo de vida



Fonte: adaptado de NBR 14040 (ABNT, 2009b)

A definição do objetivo e escopo delimita o que será incluído ou não no estudo, auxiliando na determinação do plano de trabalho da ACV. O objetivo de uma ACV, segundo a NBR 14040 (ABNT, 2009b), deve declarar a aplicação pretendida, as razões para a execução do estudo, o público-alvo e se existe intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente.

O escopo deve ser bem definido para assegurar que a abrangência, profundidade e detalhamento do estudo sejam compatíveis e suficientes para atender ao objetivo definido inicialmente. Neste momento deve ser definida a unidade funcional, o sistema de produto, fronteiras do sistema, categorias de impacto, pressupostos e outros, conforme as normas NBR 14040 (ABNT, 2009 b) e NBR 14044 (ABNT, 2009 c).

A análise do inventário envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto. A coleta de dados envolve, ainda, uma avaliação da qualidade dos dados, de modo a minimizar potenciais erros nos resultados obtidos devido à falta de correlação dos dados inventariados e a escala temporal, geográfica, tecnológica ao cenário em estudo.

Os dados podem ser coletados no próprio processo produtivo em estudo, ou ainda serem obtidos de outras fontes. Segundo a NBR 14044 (ABNT, 2009c), na prática, todos os dados podem incluir uma mistura de dados medidos, calculados ou estimados. Os dados dos processos elementares dentro da fronteira do sistema podem ser classificados por sub títulos gerais, conforme descreve a NBR 14040 (ABNT, 2009b):

- a) entradas de energia, matéria-prima, entradas auxiliares, outras entradas físicas;
- b) produtos, coprodutos e resíduos;
- c) emissões atmosféricas, descargas para água e solo; e
- d) outros aspectos ambientais.

Seguinte à coleta, se faz necessário o procedimento de cálculo considerando a validação dos dados coletados, a correlação dos dados aos processos elementares e a correlação dos dados aos fluxos de referência e à unidade funcional.

A fase de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) tem como objetivo estudar a significância dos impactos ambientais potenciais, utilizando os dados do ICV. Nesta etapa os dados do inventário são relacionados a categorias de impacto específicas e seus indicadores avaliam estes potenciais impactos. As categorias de impacto podem ser diversificadas e adotadas em maior ou menor número em cada uma das metodologias disponíveis. O Quadro 3 apresenta algumas das categorias de impacto possíveis de serem avaliadas.

Quadro 3 - Exemplo de categorias de impacto.

CATEGORIA	INDICADOR
Acidificação	SO ₂ eq./kg emissão
Depleção de Ozônio Estratosférico	kg CFC-11 eq./kg emissão
Ecotoxicidade	relação à substância referência (por exemplo, o trietilenoglicol – TEG)
Eutrofização	kg PO ₄ ³⁻ eq./kg emissão
Formação Fotoquímica de Ozônio (Oxidante)	determinada substância, como o etileno (C ₂ H ₄), por exemplo
Mudança Climática (Aquecimento Global)	kg CO ₂ eq./kg emissão
Toxicidade Humana:	anos de vida perdidos (YLL) ou ajustados por incapacidade (DALY)
Radiação Ionizante	kg Bq C-14 eq. ar/kg emissão) ou em anos de vida ajustados por incapacidade (DALY).
Uso do Solo	m ² área arável afetada/ano ou pela fração de espécies potencialmente desaparecidas (PDF) na área por ano.

Fonte: adaptado de ISO/TR 14047 (2012)

Conforme Mendes et al. (2016), os métodos de AICV recomendados para aplicação no Brasil são aqueles que apresentam uma abrangência classificada como global para o escopo de aplicação de suas categorias de impacto, são eles: CML 2002, EDIP 97 e USEtox, do tipo *midpoint*²; e EPS 2000 e IMPACT World+, este último também recomendado pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT, 2019). Por outro lado, Bovea e Powell (2016) identificam, em sua revisão da literatura, que os métodos mais aplicados em estudos de ACV sobre RCD são o CML 2002, para os *midpoint*, e o Ecoindicator 99, entre os *endpoint*³, em parte corroborando com Laurent et al. (2014), que descreve o método CML como o mais aplicado em estudos de ACV de resíduos.

A interpretação da ACV corresponde à fase na qual constatações da análise de inventário ou da avaliação de impacto servem de base, de maneira conjunta, para a definição de conclusões e recomendações. Nesta fase, são identificadas questões significativas, com base nas fases de ICV e AICV. Conforme a NBR 14044 (ABNT, 2009c), são exemplos de questões significativas: dados de inventário (energia, emissões, resíduos e outros), categorias de impacto (uso de recurso natural, mudanças climáticas, entre outros) e contribuições dos estágios do ciclo de vida (processos elementares individuais, transporte, produção de energia e outros).

² a caracterização usa indicadores localizados ao longo do mecanismo ambiental, antes de chegar ao ponto final da categoria.

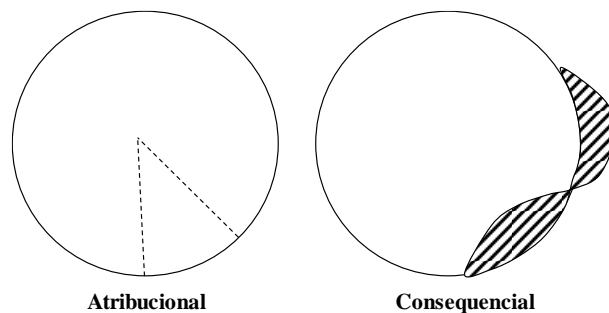
³ a caracterização considera todo o mecanismo ambiental até o seu ponto final, ou seja, se refere a um dano específico relacionado com a área mais ampla de proteção que pode ser saúde humana, ambiente natural ou recursos naturais.

2.4.2. Modelos de sistema na Avaliação do Ciclo de Vida

A versão 3 da base Ecoinvent disponibiliza três modelos de sistema, dois deles de caráter Atribucional, denominados Cut-off (*Allocation and cut-off by classification*) e APOS (*allocation at the point of substitution*), e um terceiro Consequencial. Os dois modelos de sistema que aplicam as regras de alocação⁴ (“*allocation*”), Cut-off e APOS, destinam-se a ser usados como dados Atribucionais, já o modelo Consequencial destina-se à aplicação na ACV Consequencial (EARLES e HALOG 2011; EKVALL e WEIDEMA 2004; WEIDEMA et al. 2009; ZAMAGNI et al. 2012).

Weidema (2003) ilustra de maneira simplificada a diferença entre a dinâmica dos impactos ambientais avaliados para determinada atividade com relação aos impactos globais nas abordagens Atribucional e Consequencial, como pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Diferença das abordagens Atribucional e Consequencial. Círculos representando o total de impactos ambientais global. Na abordagem Atribucional, os impactos ambientais são representados pela fração pontilhada, referindo aos impactos de uma atividade específica. Na abordagem Consequencial, os impactos ambientais alternam como consequência de adições ou subtrações de atividades relacionados por mercados equivalentes de coprodutos e produtos.



Fonte: adaptado de Weidema (2003).

A adoção de premissas que corroboram com a união do método Atribucional com a abordagem de Impacto Líquido Evitado, é encontradas em diversos trabalhos de ACV da reciclagem de RCD, como Rosado et al. (2017), Rosado e Peixoto (2017), Penteado e Rosado (2016) e Vitale et al. (2017), onde geralmente são descontados os impactos da não extração de recursos naturais que são substituídos por coprodutos do processo, como metais, agregados miúdos e outros. O modelo de sistema Atribucional, associado à abordagem de impacto evitado, pode representar os benefícios da produção do produto de referência avaliado, e seus

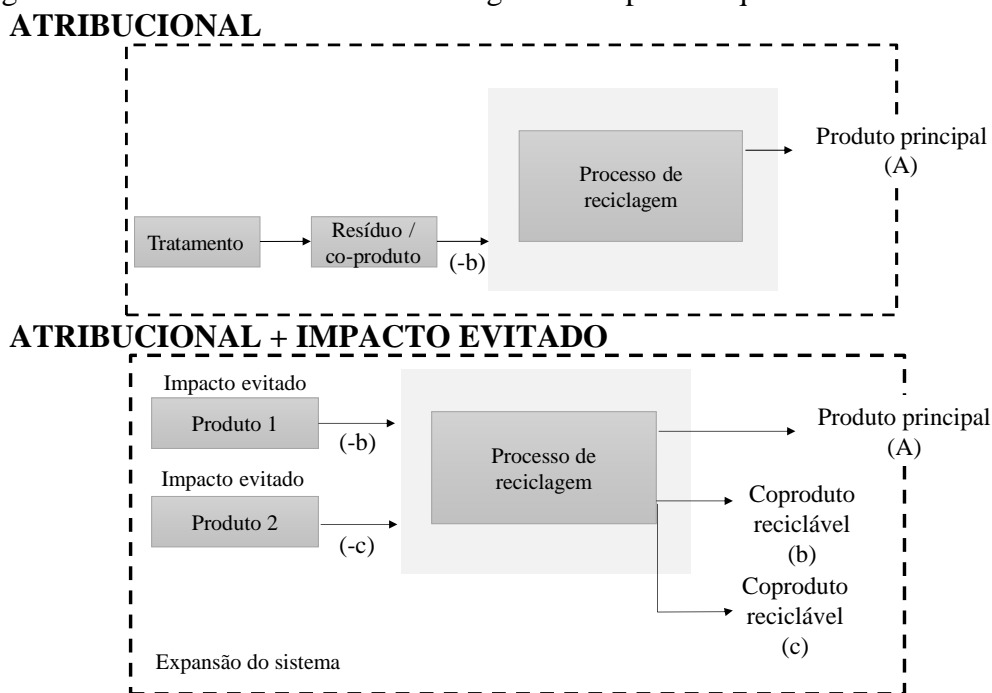
⁴ repartição dos fluxos de entrada ou saída de um processo ou sistema de produto entre o sistema de produto em estudo e outro(s) sistema(s) de produto (ABNT, 2009b).

coprodutos, como por exemplo o uso de um material reciclado ao invés de matéria-prima virgem.

Saade et al. (2016) propõem uma nova abordagem de impacto evitado, que resulta em um incentivo para processos de reciclagem. Esta abordagem proposta consiste na subtração dos impactos ambientais associados ao produto substituído, assim como a abordagem convencional, entretanto considera os impactos relacionados ao processo de beneficiamento do material reciclado. O cenário de Reciclagem Proposta (RP) avaliado neste estudo ilustra um coproduto ainda não explorado na literatura, o agregado graúdo reciclado pobre em concreto (AGRpc). Este coproduto é gerado pelo beneficiamento pelo uso do jigue a ar, que tem como produto principal um agregado reciclado rico em concreto (AGRrc).

Na Figura 7 é possível visualizar a comparação da aplicação das fronteiras de sistema quando da aplicação dos modelos de sistema Atribucional e Atribucional com Impacto Evitado ao processo de reciclagem do RCD. No modelo Atribucional não são considerados benefícios pelo processo de reciclagem, sendo ainda considerado a necessidade de tratamento para os resíduos/coprodutos do processo (rejeitos). Uma associação deste modelo de sistema à abordagem de impacto evitado, entretanto, pode ilustrar benefícios da aplicação do sistema de reciclagem frente ao uso de nova matéria-prima.

Figura 7 – Ilustração da fronteira do sistema de um modelo Atribucional convencional e a abordagem Atribucional acrescida da abordagem do Impacto Líquido Evitado.



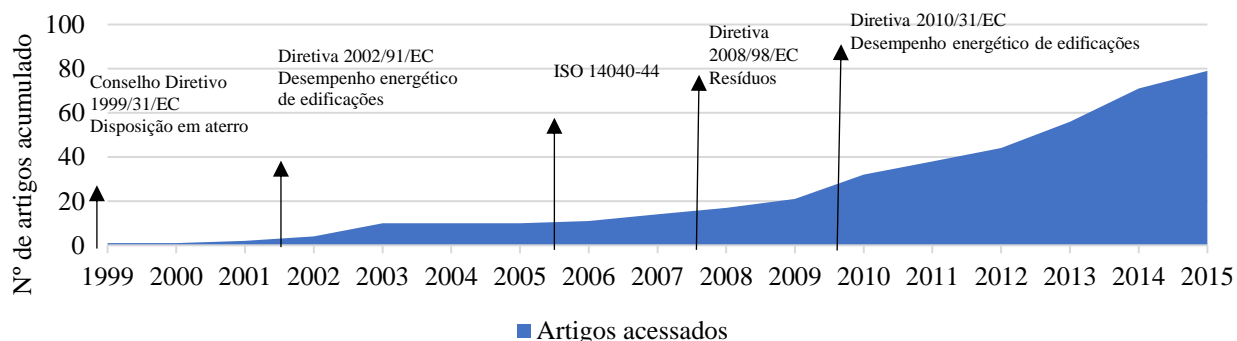
Fonte: baseado em Wernet et al. (2016) e Saade et al. (2016)

2.4.3. Avaliação do Ciclo de Vida na reciclagem de resíduos da construção e demolição

A Construção Civil despertou o interesse inicial na ACV devido aos seus impactos ambientais significativos, resultado principalmente da produção/uso de cimento. Todavia, os impactos associados à extração de agregado natural e o seu transporte, principalmente onde o agregado natural é escasso, passaram a ganhar maior atenção. Como consequência, processos de reciclagem de RCD tem ampliado o número de estudos de ACV no Brasil e no mundo.

Bovea e Powell (2016) evidenciaram crescimento nos trabalhos de ACV referentes aos RCD entre os anos de 1999 e 2015, relacionando os mesmos à definição de diretivas europeias e das normas da série NBR ISO 14040 (ABNT, 2009b) (Figura 8). Poucos estudos fornecem ACV sobre a reciclagem de RCD no Brasil, como identificado nas revisões da literatura de Bovea e Powell (2016) e Waskow et al. (2018b), restringindo-se, conforme critérios das revisões, a Condeixa et al. (2014) e Penteadó e Rosado (2016). Os estudos de caso Europeus, entretanto, são encontrados com maior frequência.

Figura 8 - Evolução temporal da disponibilidade de artigos sobre ACV de RCD

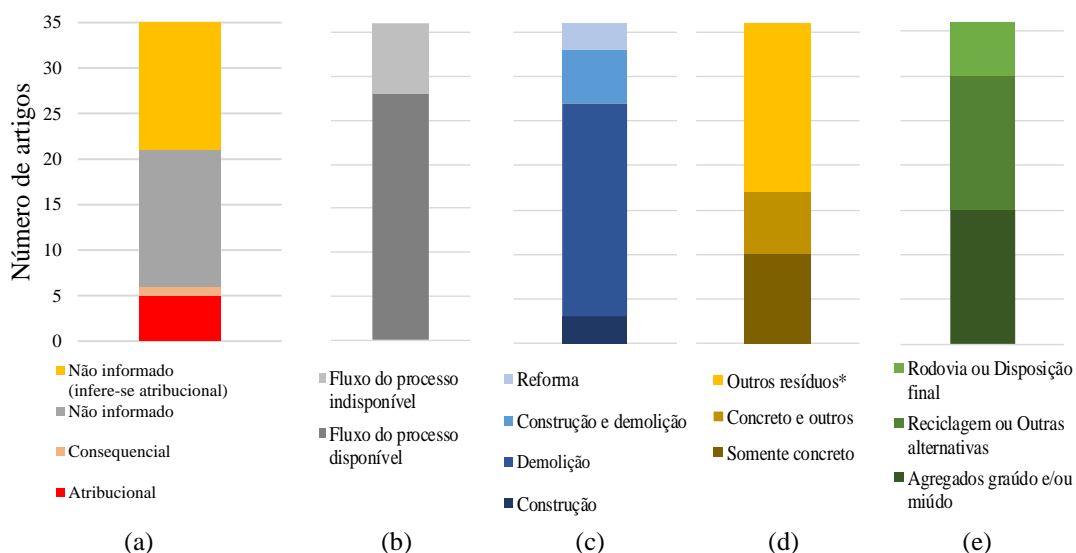


Fonte: adaptado de Bovea e Powell (2016).

A ACV modela o ciclo de vida de um produto de referência por meio de seu sistema de produto, que desempenha uma ou mais funções definidas. Assim, a comparação dos resultados de diferentes estudos de ACV ou ICV só é possível se os pressupostos (objetivo e escopo, unidade funcional, fronteiras do sistema, entre outros) e o contexto (localidade, período...) de cada estudo forem equivalentes (ABNT, 2009b). Dada a dificuldade na identificação de trabalhos com pressupostos e contexto idênticos, a maioria dos estudos de ACV tem na discussão dos seus resultados a comparação com outros estudos semelhantes, guardadas as ressalvas das suas principais divergências como fronteiras do sistema, local, período, etc.

Acessando 36 artigos consultados por Hackenhaar et al. (2018) e Waskow et al. (2018a), é possível identificar algumas das principais divergências que limitam a discussão e replicabilidade dos resultados da ACV da atividade de reciclagem de RCD. Como pode ser visto na Figura 9, estes trabalhos divergem com relação aos (a) tipos de modelos de sistema adotados; (b) disponibilidade dos fluxos do sistema de produto; (c) atividade de origem dos resíduos; (d) tipo de resíduo considerado no estudo; (e) destino/uso do produto principal.

Figura 9 – Dados de composição dos estudos de ACV de RCD acessados. A classificação dos estudos é dada em termos percentuais conforme os subitens a seguir: (a) tipos de modelos de sistema adotados; (b) disponibilidade dos fluxos do sistema de produto; (c) atividade de origem dos resíduos; (d) tipo de resíduo considerado no estudo; (e) destino/uso do produto principal.



*outros resíduos gerados dentro das atividades da construção, como papeis, plástico, metais e outros.
Fonte: o Autor.

Quanto aos modelos de sistemas, é identificado que 83% dos trabalhos não informam sobre o modelo adotado, entretanto na metade destes é possível inferir sobre o uso do sistema Atribucional. O modelo Atribucional é declarado em 5 (13%) destes artigos e em apenas 1 artigo, Butera et. al. (2015), é utilizada a abordagem Consequencial.

Os fluxos do conjunto de dados não são informados em 22% dos trabalhos acessados. Quanto à origem dos RCD, predomina o uso de cenários com resíduos de Demolição, com 67%.

Quanto aos tipos de resíduos avaliados, prevalecem trabalhos que avaliam resíduos que misturam o material de estrutura de uma edificação (concreto, cerâmica e argamassa), com outros recicláveis e não recicláveis que compõem ou são gerados, como papel, madeira, plásticos, metais, material isolante, entre outros. Quanto ao destino/uso do produto principal avaliado, predomina a produção de agregados graúdos ou miúdos e a reciclagem ou outras

alternativas, considerando os outros tipos de resíduos que compõem uma edificação, ambos com 42% cada.

A indisponibilidade de conjuntos de dados (*datasets*) específicos referente ao processo de reciclagem de RCD no Brasil é outra barreira a ser superada na ACV deste tipo de atividade. Embora haja algumas iniciativas para a maior disponibilidade de conjunto de dados, alguns países ainda não possuem *datasets* de processos específicos.

Hackenhaar et al. (2019) destacam a necessidade de adaptação de conjunto de dados de bases reconhecidas para a ACV do processo de reciclagem do RCD brasileiro. O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - UNEP e a Sociedade de Toxicologia Ambiental e Química - Setac (Unep/Setac, 2011) disponibilizam diretrizes para o processo de adaptação. Antes disso, Colodel (2008) já havia proposto uma proposta simplificada de adaptação, que Oliveira (2013) aperfeiçoou para os casos brasileiros.

No Quadro 4 é possível identificar algumas das principais características dos estudos avaliados por Hackenhaar et al. (2018) e Waskow et al. (2018a) que consideram o uso de agregados reciclados de RCD. Estes estudos, ainda que considerando a possibilidade de divergências de pressupostos e contexto, podem servir de base à discussão de resultados deste tipo de atividade.

A maioria dos estudos apresentam especificidades relacionados a problemática da gestão do RCD na região em estudo (composição do resíduo, destinação preferencial para aterro, logística e outros) divergindo, em alguns casos, da realidade do cenário brasileiro. O transporte do RCD é considerado uma das principais fontes de impacto em estudos de ACV deste tipo de atividade, como visto por Bohne et. al. (2008), Coelho e Brito (2012), Ding et al. (2016), Faleschini et al. (2016), Guinot et. al. (2015) e Vossberg et. al. (2014).

Quadro 4 - Principais características definidas para os estudos avaliados por Hackenhaar et al. (2018) e Waskow et al. (2018a) na avaliação do ciclo de vida na reciclagem de resíduos de construção e demolição com produção de agregados reciclados e que podem dar suporte às etapas de análise e discussão de resultados de ACV deste tipo de atividade.

AUTORES	CONTEXTO DO TRABALHO	RESULTADOS/ COMENTÁRIOS
Blengini (2009) Método(s)/Ferramenta AICV: Eco-Indicator 99 Indicador(es): GER, GWP100, ODP, AP; EP, POCP. Dado de entrada relevante: Dados do uso da edificação	Trabalho aplicado a Turin, na Itália, referente à avaliação de edificações, estendendo sua análise das etapas de construção ao processo de demolição	Pelas fronteiras do sistema adotadas, os principais impactos estão relacionados ao uso da edificação. Segundo os autores, o processo de reciclagem de resíduos como metais e outros comumente recicláveis, podem minimizar os demais impactos relacionados à edificação.
Bohne et. al. (2008) Método(s): Eco-Indicator 99 Indicador(es): Impacto total Dado de entrada relevante: Madeira (incineração no fim de vida)	São avaliados diferentes cenários (aterro, reciclagem, geração de energia e reuso) na cidade de Trondheim, Norway.	O autor destaca o resíduo de madeira como o de maior potencial impacto, devido a práticas de incineração como prática adotada no contexto do trabalho. Os autores avaliam a sensibilidade do transporte, destacando as longas distâncias percorridas na região pela localização geográficas das plantas e pelo seu potencial incremento nas emissões de CO ₂ .
Carpenter et. al. (2013) Método(s) /Ferramenta AICV: Calculado via fatores de caracterização específicos. Indicador(es): Emissões de gases do efeito estufa, emissões atmosféricas de chumbo, arsênico, zinco, cádmio, cromo, cobre, mercúrio e selênio na água. Dado de entrada relevante: Madeira (incineração no fim de vida)	Os autores avaliam diferentes cenários de reciclagem do RCD de New Hampshire, Estados Unidos. Os cenários, entretanto, focam na geração de energia pela presença de significativo percentual de resíduos de madeira e/ou a disposição total dos RCD em aterro	Como o foco do trabalho se dá sobre a geração de energia pela queima do RCD, em maior parte composto por madeira, pouco é explorado com relação aos agregados reciclados de argamassa, concreto e/ou cerâmicos. Os principais resultados sugerem que, conforme o contexto local, há melhores resultados pelo uso energético do resíduo em vista da sua disposição final.
Coelho e Brito (2012) Método(s) /Ferramenta AICV: Calculado via fatores de caracterização específicos Indicador(es): Mudanças climáticas, acidificação, Smog fotoquímico, nitrificação e metais pesados. Dado de entrada relevante: Consumo de materiais de construção (e transporte em alguns cenários que contemplam a reciclagem)	Os autores avaliam diferentes cenários de demolição e destinação final dos resíduos. Variam o tipo de demolição (seletiva e não seletiva) e o destino final (aterro, reciclagem parcial e total).	Os autores destacam as categorias mais relevantes dos diferentes cenários de reciclagem, revelando importantes contribuições da categoria mudanças climáticas. Entretanto, estes autores adotam a expansão do sistema com o desconto dos impactos evitados e desta forma categorias com alto impacto ambiental, como Mudanças Climáticas, também são afetadas quando da reciclagem de materiais em cenários de reciclagem parcial ou total. Os autores destacam ainda que mesmo cenários que consideram a reciclagem e por consequência tem impactos evitados, são afetados de maneira negativa pelas longas distâncias de transporte para alguns dos materiais até os locais de reciclagem.
Dahlbo et. al. (2015) Método(s) /Ferramenta AICV: Calculado via fatores de caracterização específicos Indicador(es): Mudanças climáticas Dado de entrada relevante: Resíduo misto	Avalia cenário de reciclagem de RCD considerando o impacto evitado do produto de referência e coprodutos. O processo de beneficiamento é semelhante ao método de Reciclagem atual brasileiro, (basicamente cominuição e peneiramento). Os percentuais de outros resíduos recicláveis diferem do Brasil, devido a métodos de construção.	O principal contribuinte dos impactos ambientais com relação ao único indicador avaliado, Mudanças Climáticas, refere-se ao “resíduo misto” que necessita ser destinado para aterro sanitário. Ainda que outros dados como os metais ferrosos e não ferrosos utilizados, que pelos seus processos de produção, contribuam com o indicador ambiental a abordagem de impacto evitado minimiza suas contribuições devido a reciclagem ao fim de vida.

Fonte: o Autor.

Quadro 4 - Principais características definidas para os estudos avaliados por Hackenhaar et al. (2018) e Waskow et al. (2018a) na avaliação do ciclo de vida na reciclagem de resíduos de construção e demolição com produção de agregados reciclados e que podem dar suporte às etapas de análise e discussão de resultados de ACV deste tipo de atividade.(*continuação...*)

AUTORES	CONTEXTO DO TRABALHO	RESULTADOS/ COMENTÁRIOS
Ding et al. (2016) Método(s) /Ferramenta AICV: Calculado com fatores de caracterização Indicador(es): Demanda de energia e GWP Dado de entrada relevante: Transporte (excluída a participação do cimento)	Os autores avaliam a produção de concreto contendo agregados graúdos reciclados e/ou agregado graúdo naturais, na China.	Autores consideram a produção do concreto. As contribuições do cimento são significativas, entretanto se desconsiderado este dado de entrada, prevalecem as contribuições do transporte em todos os cenários em GWP, Demanda de energia e disposição em aterro para cenários com disposição de parte dos resíduos.
Faleschini et al. (2016) Método(s) /Ferramenta AICV: CML 2002 Indicador(es): Potencial de Aquecimento Global, Potencial de Acidificação, Eutrofização, Oxidação Fotoquímica, Toxicidade Humana, Ecotoxicidade - Toxicity e Depleção da camada de Ozônio. Dado de entrada relevante: Transporte	Os autores avaliam a produção de agregados reciclados e natural que ocorre na mesma planta de reciclagem em uma cidade da Itália. Não é considerado impacto evitado para os agregados reciclados. São gerados cenários de agregados de alta qualidade e baixa qualidade, conforme normas EN 13242 (2008) ⁵ e EN 12620 (2008) ⁶ .	Os autores destacam as contribuições significativas do transporte nos impactos do processo de reciclagem e conforme análise de sensibilidade pode tornar a reciclagem menos atrativa do que a produção de agregado natural quando as distâncias excedem 45 km.
Guinot et. al. (2015) Método(s) /Ferramenta AICV: ReCiPe (MidPoint) Indicador(es): Mudanças climáticas, Depleção de combustíveis fósseis, acidificação terrestres e transformação de uso da terra Dado de entrada relevante: Transporte	Os autores avaliam métodos convencionais (semelhante ao método de Reciclagem Atual brasileiro) com cominuição e peneiramento, cenário utilizando fragmentação de agregados por descarga elétrica e outros.	Os autores identificam significativa participação do transporte sobre os impactos ambientais avaliados. Ainda assim, os resultados atingem valores otimistas devido ao sistema de produto adotado considerar o envio da argamassa para a produção de clínquer, e seu respectivo impacto evitado minimizar os impactos de todos os cenários.
Knoeri et. al. (2013) Método(s) /Ferramenta AICV: Ecoindicator 99 e Ecological scarcity Indicador(es): todos Dado de entrada relevante: Transporte (e cimento)	Os autores avaliam os impactos da produção do concreto convencional em comparação ao contendo agregados reciclados. O artigo enfatiza o efeito do cimento e do transporte, como principais dados de entrada.	Os autores avaliam os efeitos do cimento e do transporte, principalmente, na produção de concreto convencional e contendo agregados reciclados, como principais dados de entrada. Não são disponibilizadas maiores informações com relação aos dados de entrada do processo de reciclagem, ampliando o suporte a discussão de resultados deste tipo de atividade.
Simion et. al. (2013a) Método(s) /Ferramenta AICV: Eco-Indicator 99, EDIP/UMIP e Demanda de Energia Indicador(es): saúde humana, qualidade do ecossistema, EDIP/UMIP e demanda de energia Dado de entrada relevante: Transporte (ext./int.).	Os autores comparam cenários de produção de agregados reciclados e agregado natural. O processo de beneficiamento do RCD difere do brasileiro pelo uso de um schredder ao invés de britador	Os autores concluem que a produção de agregados reciclados representa 40% dos impactos da produção de agregados naturais. Radiação, Acidificação/Eutrofização e Uso da terra (Eco-indicador); Potencial de Aquecimento Global, Depleção da camada de Ozônio e Acidificação/Eutrofização (EDIP/UMIP).

Fonte: o Autor.

⁵ EN 13242:2008. Aggregates for Unbound and Hydraulically Bound Materials for Use in Civil Engineering Work and Road Construction.

⁶ EN 12620: 2002+A1:2008. Aggregates for Concrete.

Quadro 4 - Principais características definidas para os estudos avaliados por Hackenhaar et al. (2018) e Waskow et al. (2018a) na avaliação do ciclo de vida na reciclagem de resíduos de construção e demolição com produção de agregados reciclados e que podem dar suporte às etapas de análise e discussão de resultados de ACV deste tipo de atividade.(*continuação...*)

AUTORES	CONTEXTO DO TRABALHO	RESULTADOS/ COMENTÁRIOS
Simion et. al. (2013b) Método(s)/Ferramenta AICV: Pegada ecológica Indicador(es): CO ₂ , uso da terra e pegada nuclear Dado de entrada relevante: Incineração	Os autores avaliam 4 cenários e tratamento do RCD, dentre eles 2 considerando processos de reciclagem. Os cenários são desenvolvidos na Itália.	As soluções avaliadas não abordam os processos de reciclagem do RCD. As análises são restritas a incineração, aterro e reciclagem. Conclui-se pelo uso de destinações parciais para aterro e planta de reciclagem, em detrimento de cenários restritos ao aterro ou com o uso de incineração parcial.
Vieira e Horvath (2008) Método (s) /Ferramenta AICV: Calculado via fatores de caracterização específicos Indicador(es): Emissão de CO ₂ Dado de entrada relevante: ND	Os autores trazem discussões sobre os impactos de fim de vida das edificações. O uso das abordagens atribucional e consequencial são avaliados.	Os autores concluem pela necessidade de levar em consideração a cadeia de suprimentos e os impactos em toda a economia resultantes da reciclagem, confirmando a abordagem Consequencial como mais adequada aos processos como a reciclagem/reuso de RCD.
Vitale et al. (2017) Método(s) /Ferramenta AICV: Ecological Scarcity Indicador(es): Inorgânicos inaláveis, Aquecimento global e extração mineral Dado de entrada relevante: Reciclagem de metais	Os autores avaliam o fim de vida de uma edificação em uma cidade italiana. Os tratamentos dos RCD, entretanto, são tratados como dados de background.	Os autores concluem pelos importantes impactos evitados pela reciclagem de resíduos, como metais, com relação ao impacto total do sistema de produto avaliado.
Vossberg et. al. (2014) Método(s) /Ferramenta AICV: Fatores de impacto e IPCC2007 Indicador(es): Demanda de energia e Potencial de Aquecimento Global Dado de entrada relevante: Transporte	Os autores avaliam 3 diferentes cenários de reciclagem de RCD na África do Sul. Os cenários diferem considerando a disposição total com produção de agregados naturais, e as produções de agregados reciclados no local de geração e fora deste.	Os autores concluem por cenários mais favoráveis à disposição total dos RCD com produção de agregados naturais ou ainda a produção de agregados reciclados no próprio local de geração em vista da produção de agregados reciclados em planta de reciclagem externa, principalmente devido a longas distâncias de transporte. O transporte representa ainda significativos impactos no cenário com disposição total do RCD com produção de agregados naturais.
Yazdanbakhsh et al. (2017) Método(s) /Ferramenta AICV: TRACI 2.1 Indicador(es): Mudanças climáticas, Potencial de acidificação, Formação de Smog Fotoquímico, Eutrofização, Toxicidade Humana e Depleção da camada de Ozônio Dado de entrada relevante: Transporte (cimento e areia)	Os autores comparam a produção de concretos com mesma resistência à compressão produzidos com agregado natural e com agregados reciclados de maneira individual.	Devido ao foco do trabalho ser o concreto produzido com agregados naturais e reciclados, os resultados tem os percentuais de participação do cimento acentuado em todos os indicadores. Desconsiderando, entretanto, os elementos de produção do concreto (cimento e areia), os resultados revelam a significativa participação do transporte dos agregados reciclados.

GER: Energia bruta requerida (*Gross Energy Requirement*); **GWP:** Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential*); **ODP:** Depleção da Camada de Ozônio (*Ozone Depletion Potential*); **AP:** Potencial de Acidificação (*Acidification Potential*); **EP:** Potencial de Eutrofização (*Eutrophication Potential*); **POCP:** Potencial de Criação de Ozônio Fotoquímico (*Photochemical Ozone Creation Potential*), **ND:** não disponível.

Fonte: o Autor.

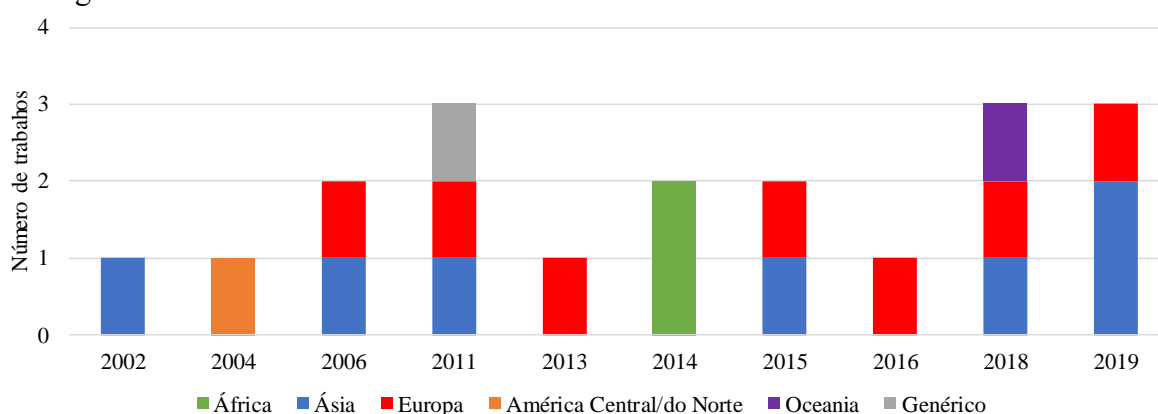
2.5. ANÁLISE ECONÔMICA DA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A implementação de plantas de reciclagem de RCD em muitos países é uma realidade, sendo sustentada, muitas vezes, por políticas públicas ambientais. Contudo, a viabilidade econômica é um fator chave para haver interesse de investimento nesse tipo de projeto.

Martinez-Sanchez et al. (2015) descrevem a falta de metodologias claras e princípios dos cálculos adotados, havendo, desta forma, carência de avaliações detalhadas, transparentes e passíveis de replicar. Uma revisão da literatura referente ao tema, descrita a seguir, permite identificar um número bastante limitado de trabalhos, assim como a ausência de trabalhos científicos brasileiros publicados em periódicos internacionais (Figura 10). Mais informações sobre a revisão da literatura realizada podem ser encontrados em Waskow et al. (2019).

Os indicadores econômicos adotados com maior frequência nos trabalhos realizados no Brasil são VPL, TIR e *Payback*, que em conjunto, são avaliados em 50% dos trabalhos. O VPL, entretanto, é utilizado em todos os trabalhos aplicados em cenários brasileiros. Além dos trabalhos realizados no Brasil, Di Maria et al. (2018) e Miah et al. (2017) também adotam o VPL como indicador nos seus trabalhos.

Figura 10 – Distribuição geográfica anual dos trabalhos identificados em revisão da literatura sobre análise econômica da reciclagem de resíduos da construção e demolição. Análises econômicas passíveis de serem aplicadas a qualquer região no mundo são definidas no gráfico como “genérico”.



Fonte: o Autor.

Alguns autores corroboram com relação a referências destes indicadores econômicos para projetos de plantas de reciclagem de RCD, como o *Payback* que deve estar entre 3 e 11,2 anos (HUANG et al., 2002; NETO et al., 2017; e DI MARIA et al., 2018) e a Taxa Mínima de

Atratividade (TMA), valor que deve ser superada pela TIR, de 12% para este tipo de projeto (PETTER, 2015; DOAN, 2016). O custo unitário de produção dos agregados reciclados também é avaliado por Di Maria et al. (2018) e Miah et al. (2018), estes segundos autores inclusive associando a indicadores ambientais para a composição de uma análise de Intensidade de Impactos.

Além da divergência nas metodologias aplicadas nos custos de reciclagem de RCD, há também diferentes considerações com relação aos pontos mais críticos da avaliação de custos dessa atividade. Huang et al. (2002), Wang et al (2004), Duran et al. (2006), Galán et al. (2013) e Chaves (2015), em suas análises de custos de cenários de reciclagem de RCD, destacam a aquisição dos equipamentos como o dado de entrada com maior participação no resultado final. Mah et al. (2018) destacam os custos relacionados ao transporte como mais significativos em projetos que preveem a produção de agregados reciclados e seu posterior envio para reuso. Autores que desenvolveram trabalhos dentro do cenário brasileiro, entretanto, sugerem a aquisição do terreno e construção da infraestrutura (Construção Civil) como economicamente mais significativos (CORRÊA et al., 2009; FONSECA e RIBEIRO JUNIOR, 2018; e KUHN et al., 2017).

Chaves (2015) encontra a viabilidade de uma planta de reciclagem brasileiro com o aumento dos custos do produto final. Ao buscar soluções alternativas com relação à aquisição de retroescavadeira e caminhão, adotando para tal a locação dos equipamentos, o autor identifica a inviabilidade do negócio, atingindo valores de VPL e TIR negativos.

A participação das prefeituras é citada por alguns autores. Gomes et al. (2015) identificam que a viabilidade de uma planta de reciclagem em Minas Gerais somente atinge resultados economicamente viáveis em cenários onde há a disponibilidade do terreno para implantação da planta de reciclagem, sendo sugerido pelo autor a Parceria Público Privada. Manfrinato et al. (2008), avaliando uma planta de reciclagem de RCD sob gestão da prefeitura, constatam que a viabilidade do cenário de reciclagem se dá pela minimização da aquisição de agregados para obras da Prefeitura.

Paiva et al. (2012) descrevem que a viabilidade do negócio de reciclagem somente atinge valores viáveis com a implantação de regulamentações locais. Corrêa et al. (2009) afirmam que a viabilidade de uma planta de reciclagem de RCD no interior do estado de São Paulo somente foi possível pela grande quantidade de RCD gerado no município objeto do estudo de caso.

Desta forma, a disponibilidade de uma abordagem padrão de análise econômica da reciclagem de RCD pode contribuir para a realização de estudos replicáveis e comparáveis, resultando em uma maior credibilidade da ferramenta para este tipo de atividades.

2.6. INTENSIDADE DE IMPACTO COMO SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO

A Intensidade de Impacto, relação *impacto ambiental/custo*, é muito utilizada na comunidade acadêmica para relacionar desempenho ambiental e econômico. Ainda que tratando a Intensidade de Impacto como “ecoeficiência”, alguns autores sugerem a aplicação da relação (Equação 1), como fizeram Auer et al. (2017), Ferrández-García et al. (2016), Lorenzo-Toja et al. (2016), Kim et al. (2013b), Rudenauer et al. (2005) e Piepenbrink e Kicherer (2004).

$$\text{Intensidade de Impacto} = \frac{\text{Impacto Ambiental}}{\text{Custo}} \quad (1)$$

Miah et al. (2017) fornecem ampla revisão de literatura sobre a integração da ACV com métodos de custo. Os tomadores de decisão podem extrair da ACV um ou mais indicadores do mesmo método de avaliação de impacto (por exemplo, CO₂, MJ, etc), ou aplicar mais de um método, dependendo das partes interessadas (cliente, investidores, comunidade). O indicador econômico, no entanto, deve ser selecionado de acordo com a parte interessada para a qual se deseja comunicar os resultados.

Custo total, Custo unitário, Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno do investimento (TIR) e *Payback* são alguns dos indicadores utilizados na análise econômica da reciclagem do RCD, no entanto, sem justificativa clara para sua adoção. Martinez-Sanchez et al. (2015) descrevem a falta de metodologias claras e princípios de cálculo adotados na análise de custos na reciclagem de RCD.

Em Waskow et al. (2019), referente à análise de custos da reciclagem do RCD, é possível confirmar que os indicadores de VPL, TIR e *Payback* são os mais amplamente utilizados entre os indicadores econômicos. Alguns autores fornecem valores desses indicadores estimados para a reciclagem do RCD, como *Payback*, entre 3 e 11,2 anos (HUANG et al., 2002; NETO et al., 2017; e DI MARIA et al., 2018) e TIR, maior de 12% (PETTER,

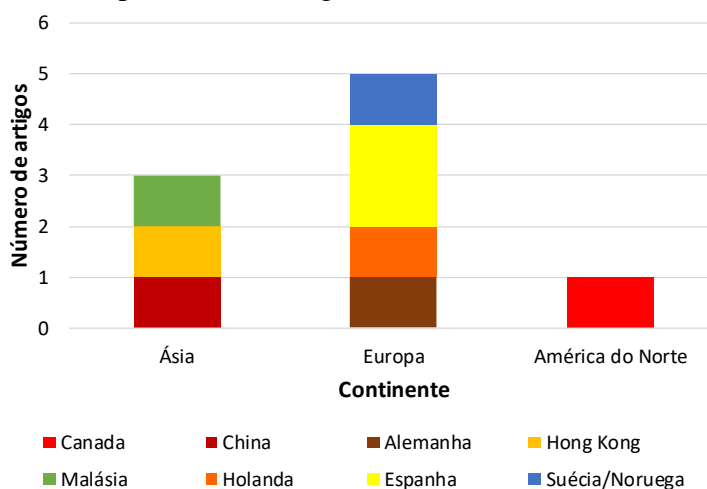
2015; DOAN, 2016). O custo unitário é avaliado por Di Maria et al. (2018) e Miah et al. (2018), no entanto, estes autores não utilizam valores de referência.

Outra lacuna a ser preenchida na análise de Intensidade de Impacto de reciclagem de RCD é a adoção de um valor de referência. Auer et al. (2017) toma como referência para o sistema que propôs, o cenário atual da época em que foi realizado o estudo. Outros autores que adotam a relação impacto ambiental/custo, como Ferrández-García et al. (2016), Lorenzo-Toja et al. (2016), Kim et al. (2013b), Rudenauer et al. (2005) e Piepenbrink e Kicherer (2004) não adotam referência para os seus resultados.

2.6.1. Intensidade de Impacto no gerenciamento do Resíduo de Construção e Demolição

Artigos que adotam a relação da Intensidade de Impacto disponíveis nas plataformas *online Springer* e *Science Direct* evidenciam o predomínio de estudos realizados em países europeus (Figura 11) como Alemanha, Espanha, Suécia, Noruega e Holanda (TISCHER et al., 2013; RODRIGUEZ et al., 2015; FERRANDEZ-GARCÍA et al., 2017; KLANG et al., 2003; ZHANG et al., 2018). Esses trabalhos têm uma preocupação comum com a composição e mistura na fonte de geração do RCD e a influência dessas características nos resultados finais, principalmente no que diz respeito aos critérios econômicos relacionados aos custos de segregação e disposição de resíduos (Quadro 5).

Figura 11 – Distribuição geográfica dos trabalhos identificados em revisão da literatura sobre a análise de Intensidade de Impacto na reciclagem do RCD.



Fonte: o Autor.

A segunda maior fonte de trabalhos que adotam a relação da Intensidade de Impacto na reciclagem de RCD corresponde ao continente asiático, dado por autores como Yuan et al. (2016), Xue (2012) e Mah et al. (2018) que têm como foco Hong Kong, China e Malásia, respectivamente. Embora Xue (2012) não avalie cenários, esse autor fornece um índice específico para uma avaliação de escopo mais amplo, relacionando a mudança nos impactos setoriais à mudança no Produto Interno Bruto (PIB).

Quadro 5 - Comentários relacionados ao desenvolvimento e resultados da análise de Intensidade de Impacto da reciclagem de RCD identificados em artigos científicos disponíveis nas plataformas *Science Direct* e *Springer*.

AUTORES	COMENTÁRIOS
Ferrandez-García et al. (2017)	Os cenários avaliados variam com relação à composição dos materiais que compõem os sistemas de isolamento aplicados. Não há mais avaliações ou detalhes sobre o estágio de final de vida e suas contribuições para os impactos ambientais, econômicos ou de Intensidade de Impacto.
Klang et al. (2003)	O artigo avalia a reciclagem de tijolos, ferro e cerâmica, de acordo com as características locais do RCD. Resultados de Intensidade de Impacto mais satisfatórios são identificados para o cenário de reciclagem de RCD, resultando, entretanto, em menores benefícios sociais.
Mah et al. (2018)	O indicador de Intensidade de Impacto avalia a relação das emissões de CO ₂ e os custos de cada cenário. Os resultados mostram que os maiores impactos ambientais são originados do processo de mineração de agregados naturais e pelo transporte do RCD, este último representando a principal fonte dos custos.
Rodriguez et al. (2015)	Os resultados revelam a diferença de valores por tipo de planta ou modelo de gerenciamento do processo de reciclagem.
Tischer et al. (2013)	Os resultados mostram uma redução dos impactos ambientais devido à implementação de um plano de gerenciamento logístico do RCD, principalmente devido ao aumento dos percentuais de reciclagem. Os autores apontam que custos ainda mais altos da coleta de RCD misturados podem não compensar as taxas de disposição de resíduos.
Trochu et al. (2019)	Artigo focado no desperdício de madeira que compõe o RCD local. Os resultados revelam os benefícios da separação de fontes que aumentam as porcentagens de reciclagem e, portanto, reduzem a porcentagem de descarte final.
Xue (2012)	Os autores concluem que existem lacunas no indicador proposto, como nenhum dado de entrada relacionado a substâncias perigosas. Os autores enfatizam a necessidade de uma análise dissociativa dos resultados para que, por exemplo, cidades com impacto reduzido, mas altas taxas de PIB não sejam tributadas com impactos negativos consideráveis.
Yuan et al. (2016)	O indicador de Intensidade de Impacto é relativo à soma das relações de impacto e custo entre dois métodos diferentes.
Zhang et al. (2018)	O indicador de Intensidade de Impacto é relativizado em termos percentuais, considerando a participação usual e as novas tecnologias em cada cenário. Os impactos ambientais e os custos de transporte são os mais significativos em dois dos quatro cenários avaliados. Os outros cenários têm seus custos e impactos reduzidos quando esses dados são excluídos.

Fonte: o Autor.

Yuan et al. (2016) propõem que a relação impacto ambiental/custo do gerenciamento do RCD pode ser calculado pela relação entre melhoria ambiental ou redução de impacto e

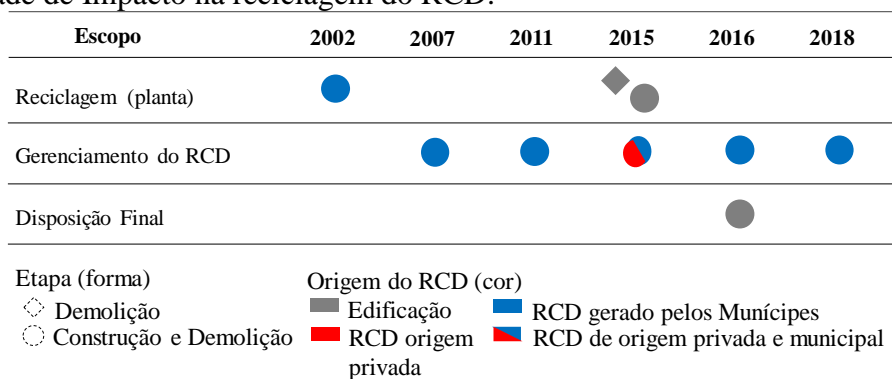
custo de gerenciamento de resíduos do RCD, conforme a Equação 1. Mah et al. (2018) avaliam diferentes cenários, relacionados à emissão final de CO₂, resultados dos fatores de caracterização e custo total (transporte, reciclagem, tratamento, etc.). Apesar da adoção de diferentes índices de correlação impacto ambiental/custo, ambos os estudos consideram a possibilidade de aterro de RCD, permitindo inferir uma percepção sobre a manutenção da adoção desse tipo de destino nos países asiáticos.

Trochu et al. (2019) avaliam cenários de reciclagem com produção de agregados reciclados de baixa, média e alta qualidade em uma região do Canadá. O foco principal deste trabalho é o resíduo de madeira, resultado do método predominante de construção na região estudada. Os autores descrevem melhores resultados do índice de Intensidade de Impacto com a melhoria da segregação na fonte de geração, sugerindo uma preocupação semelhante à destacada pelos trabalhos europeus.

Os trabalhos adotam principalmente resíduos classificados como originados de duas etapas, construção e demolição, e geralmente se referem a resíduos de origem municipal, ou seja, gerado pela população local (Figura 12). Apenas Zhang et al. (2018) realiza a análise de Intensidade de Impacto restringindo à etapa de demolição.

A Figura 12 também ilustra os diferentes escopos da análise do trabalho, que podem ser restritos à planta de reciclagem, um ou mais cenários (por exemplo, cenário atual e/ou descarte final) ou o sistema de gerenciamento do RCD. O sistema de gerenciamento do RCD predomina sobre outros escopos, sendo adotado nas análises de Tischer et al. (2013), Rodriguez et al. (2015), Yuan et al. (2016), Xue (2012) e Trochu et al. (2019).

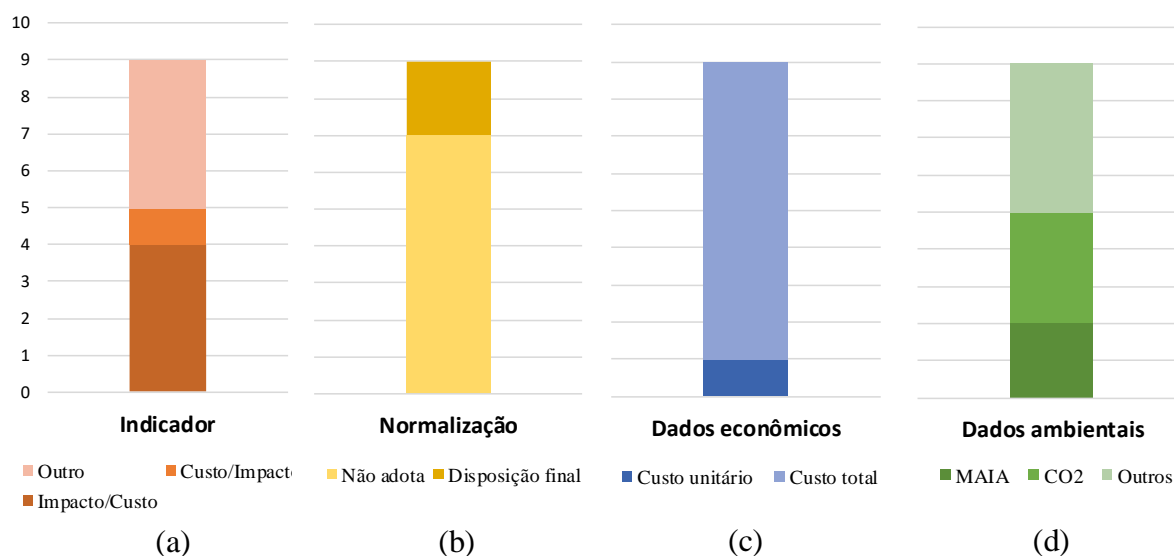
Figura 12 – Características dos trabalhos identificados em revisão da literatura sobre a análise de Intensidade de Impacto na reciclagem do RCD.



Maia: Método de Avaliação de Impacto Ambiental.
 Fonte: O autor.

A Figura 13 ilustra algumas das características dos trabalhos relacionados na Figura 12. Nesta Figura é possível identificar a predominância do uso da razão impacto ambiental/custo. Todos esses trabalhos têm em comum o uso do índice relacionando impacto ambiental e custo como ferramenta para a identificação de soluções/alternativas de melhor desempenho ambiental e econômico.

Figura 13 – Características do índice adotado nos estudos identificados na revisão de literatura. (a) relação definida como o índice avaliado no estudo; (b) uso da normalização (referência) na análise do resultado; (c) dados de entrada econômicos; e (d) dados de entrada ambiental.



Fonte: O autor.

O uso da relação custo/impacto ambiental parece não ter o mesmo caráter da relação impacto ambiental/custo, uma vez que a primeira demonstra mais interesse sobre o dispêndio de recurso financeiro em prol de uma minimização de impacto ambiental. Já a segunda relação permite comparar resultados em termos de eficiência ambiental e econômica.

Zhang et al. (2018) e Yuan et al. (2016) adotam a normalização⁷, ou referência, na análise de seus resultados. Ambos os autores avaliam os sistemas de reciclagem, considerando os resultados do cenário de descarte final como referência.

No entanto, considerando os conceitos de não geração, redução, reutilização e reciclagem no gerenciamento de resíduos, parece coerente que a análise de Intensidade de Impacto de um sistema de produtos de reciclagem de resíduos se refira ao produto de um mercado já estabelecido que o mesmo poderá substituir. No caso de agregados reciclados, eles podem até substituir parcialmente os agregados naturais, graúdos (brita) e miúdo (areia).

⁷ Cálculo da magnitude dos resultados dos indicadores de categoria com relação a informações de referência (NBR, 2009b).

Considerando os estudos identificados nas plataformas *Springer* e *Science Direct*, os dados econômicos da análise de Intensidade de Impacto estão geralmente relacionados aos custos totais, ao avaliar a planta/processo de reciclagem ou o sistema de gerenciamento do RCD. O único trabalho identificado que utiliza o custo unitário como dados de entrada refere-se à avaliação completa de um sistema de isolamento térmico que considera o gerenciamento de resíduos em fim de vida útil deste produto, dado por Ferrandez-García et al. (2017).

Os dados de entrada ambiental são compostos principalmente pelo uso do indicador de emissão de CO₂, utilizando diferentes fatores de caracterização. Alguns autores utilizam métodos de avaliação de impacto ambiental, como ILCD (ZHANG et al., 2018) além de Eco-Indicator99, ReCiPe e EPS (FERRANDEZ-GARCÍA et al., 2017), considerando todos os indicadores. Outros indicadores ambientais referem-se à quantidade de RCD processado (TISCHER et al., 2013; RODRIGUEZ et al., 2015). Ao contrário dos dados econômicos, os dados ambientais não têm restrições de interesse em métodos e/ou indicadores para cada parte interessada.

2.6.2. Principais premissas na análise de Intensidade de Impacto na reciclagem de Resíduos da Construção e Demolição

Os dados da revisão da literatura convergem para informações importantes da análise da Intensidade de Impacto no gerenciamento do RCD. É possível a partir das informações extraídas da literatura, identificar premissas que necessitam ser padronizadas, como a necessidade de definir o objetivo da análise da Intensidade de Impacto: avaliação do custo de minimizar impactos, comparação entre cenários ou viabilidade econômica e ambiental.

A avaliação do custo de minimização de impacto permite identificar o resultado de investimentos em melhoria de produtos ou processos e os resultados finais na variação do indicador ambiental. O uso desse objetivo está alinhado à iniciativa de investidores que buscam, ou necessitam alcançar, resultados mais ecoeficientes.

A simples comparação entre cenários possibilita verificar as alterações quando da mudança de um cenário em andamento e outros hipotéticos. Esse objetivo pode estar relacionado a uma declaração ambiental de produto ou a constatação de desempenho ambiental a ser disponibilizado às partes interessadas, como clientes ou sociedade.

A viabilidade econômica e ambiental permite identificar o desempenho ambiental associado à obtenção de resultados economicamente mais atrativos. Esse objetivo reflete o

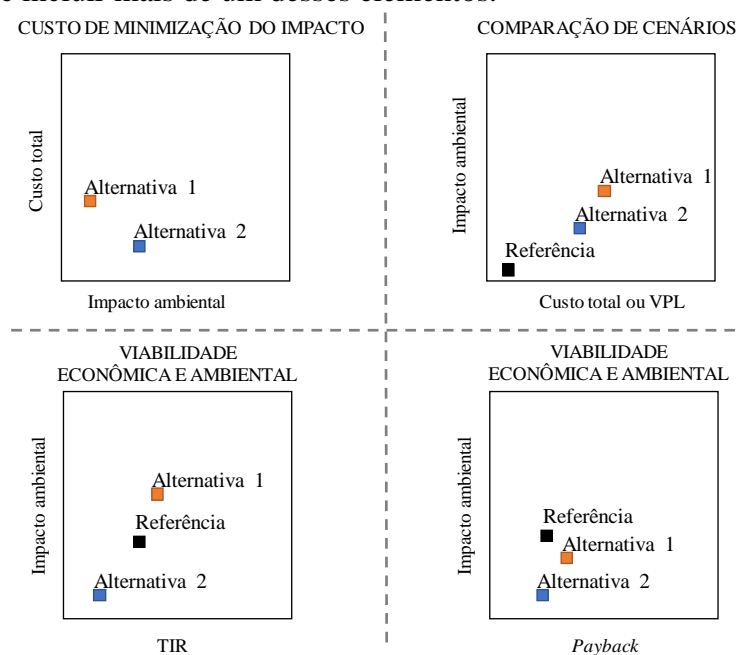
interesse dos investidores na avaliação prévia da viabilidade de um negócio ou mudança tecnológica associada à visibilidade do apelo ambiental que ele terá.

Considerando os trabalhos de Ferrandez-García et al. (2017), Klang et al. (2003), Mah et al. (2018), Rodriguez et al. (2015), Tischer et al. (2013), Trochu et al. (2019), Xue (2012), Yuan et al. (2016) e Zhang et al. (2018), assim como os estudos avaliados por Miah et al. (2016), é possível estabelecer a possibilidade de uso das duas relações (custo/impacto ambiental e impacto/custo ambiental), bem como a adoção de referências, conforme o objetivo do trabalho (Figura 14).

Indicadores econômicos, como Custos totais, VPL, TIR e *Payback*, podem ser aplicados na análise da Intensidade de Impacto em conjunto com indicadores ambientais. A aplicação de cada uma delas, no entanto, ocorre de acordo com o objetivo do trabalho diretamente relacionado à parte interessada a quem se deseja comunicar os resultados.

O uso dos indicadores econômicos Custo total e VPL torna disponível a comparação simples de cenários, sendo aplicada ao consumidor, sociedade, órgãos públicos, etc. A adoção da TIR e do *Payback* dá suporte aos investidores, permitindo avaliar viabilidade econômica do negócio e impactos ambientais.

Figura 14 – Exemplos de relações a serem adotadas de acordo com o objetivo da análise da Intensidade de Impacto. Dados de Alternativas e Referência incluídos aleatoriamente, sendo que a análise pode incluir mais de um desses elementos.



Fonte: O autor.

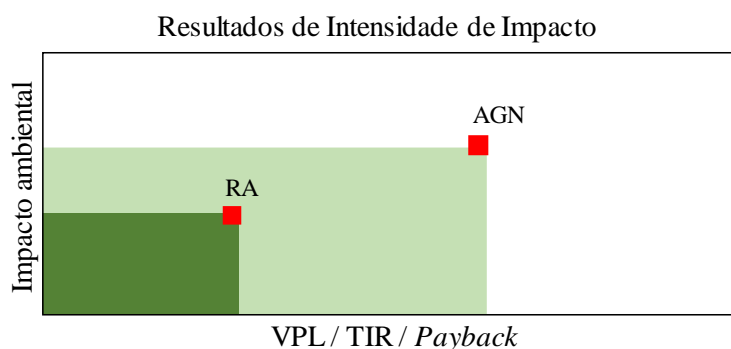
A análise dos resultados, no entanto, não deve se limitar à simples relação de indicadores ambientais e econômicos. Assim, deve-se adotar referências a esses dois eixos (x e y) que delimitarão zonas que sugerem menor Intensidade de Impacto.

Cenários de reciclagem já estabelecidos, embora não sejam os mais atrativos economicamente, merecem ser levados em consideração na análise da Intensidade de Impacto na busca de soluções alternativas, conforme realizado por Auer et al. (2017). Desta forma, a análise da Intensidade de Impacto para soluções alternativas deve considerar como referência dos resultados o cenário atualmente utilizado na região do estudo, conforme o escopo da análise (planta de reciclagem, gerenciamento ou disposição final).

Considerando, também, os conceitos que orientam o gerenciamento de resíduos de qualquer fonte (não geração, reciclagem e reutilização) combinados com os conceitos de impacto evitado, aplicado na análise de ACV, a comparação dos resultados com os materiais estabelecidos no mercado e que podem ser substituídos por (co)produtos resultantes da reciclagem podem se tornar um incentivo para esta prática.

Ao analisar a Intensidade de Impacto de uma solução alternativa para a reciclagem de RCD, a ilustração dos resultados deve ser composta pelo menos pelas seguintes zonas favoráveis: (i) método de Reciclagem Atual e (ii) produção do agregado natural que pode ser substituído pelo agregado reciclado produzido. Um exemplo dos limites dessas zonas é ilustrado na Figura 15. A análise de Intensidade de Impacto tem como referência a própria variação dos resultados expressos graficamente.

Figura 15 – Modelo proposto para ilustrar os resultados da análise de Intensidade de Impacto na reciclagem do RCD. A posição das relações custo/impacto ambiental da Reciclagem Atual (RA) e do agregado graúdo natural (AGN) foi definida aleatoriamente, exigindo ajustes de acordo com cada estudo de caso. Verde claro, menor Intensidade de Impacto que a referência (AGN). Verde escuro, menor Intensidade de Impacto que as duas referências.

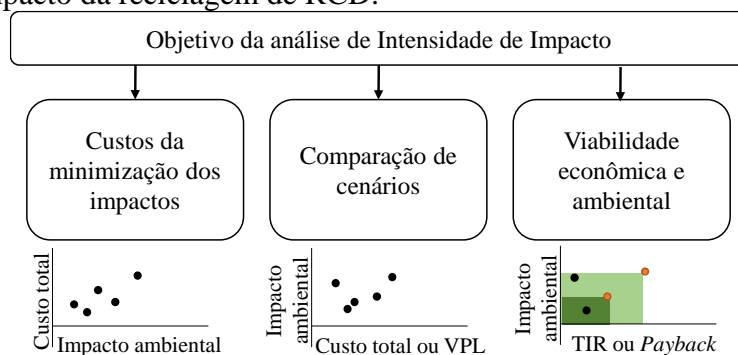


Fonte: O autor.

Embora a disponibilidade das análises de Intensidade de Impacto na reciclagem do RCD seja pequena, o uso dessa ferramenta com base em premissas pode levar à obtenção de resultados padronizados e comparáveis. Outras ferramentas que suportam a análise de Intensidade de Impacto, como ACV e CCV, possuem padrões ou manuais específicos desenvolvidos com o mesmo objetivo de padronização das avaliações/análises, permitindo que eles tenham sua credibilidade e aplicação expandidas.

Considerando as características, resultados e discussões dos trabalhos acessados, é possível definir premissas que contribuem para a realização de análises padronizadas de Intensidade de Impacto da reciclagem de RCD, como ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Fluxograma simplificado de suposições a serem adotadas para a análise de Intensidade de Impacto da reciclagem de RCD.

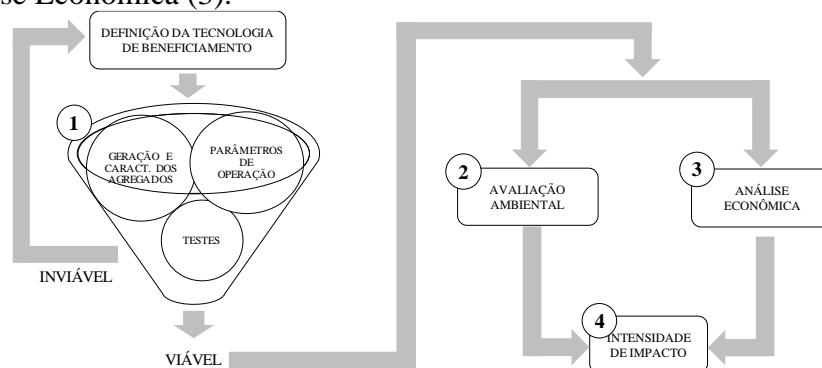


Fonte: O autor.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho é desenvolvido em 4 etapas, como ilustra o fluxograma da Figura 17. A Etapa 1 corresponde à análise da viabilidade técnica do beneficiamento gravimétrico dos agregados de RCD, com característica do gerado no Brasil, com o uso do jigue a ar. Dão suporte a esta Etapa a geração e a caracterização dos agregados de RCD, os testes de beneficiamento com o jigue a ar e a avaliação dos parâmetros de operação do equipamento. Adicionalmente, esta Etapa contribui com a disponibilidade de valores quantitativos de perdas pelo processo de beneficiamento no jigue a ar e emissões atmosféricas, dados ainda indisponíveis em estudos científicos.

Figura 17 – Fluxograma simplificado das etapas a serem desenvolvidas para o atendimento ao objetivo geral deste trabalho. A numeração indica a ordem de execução de cada etapa. A definição dos cenários de reciclagem é realizada na Avaliação Ambiental (2), servindo de base também a Análise Econômica (3).



Fonte: o Autor.

Nos cenários onde se mostra viável o uso do uso do jigue a ar no beneficiamento dos agregados de RCD brasileiro são então desenvolvidas as Etapas 2 e 3. A Etapa 2 consiste na avaliação ambiental, realizada a partir da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) dos processos de reciclagem do RCD brasileiro. Se faz necessário, para tal, a realização das 4 etapas da ACV conforme os sistemas de produto definidos para os processos de Reciclagem Atual e Reciclagem Proposto. Como principais produtos, esta Etapa irá gerar os resultados da avaliação dos impactos ambientais da reciclagem dos RCD no Brasil e de maneira complementar a análise da variação das distâncias de transporte dos agregados (reciclados e natural) até o local de uso.

Na Etapa 3 é desenvolvida a análise econômica da reciclagem do RCD brasileiro. Para tal, é necessário o inventário dos dados de entrada, Custos Fixos e Custos Variáveis, e a definição dos indicadores econômicos que são avaliados, ambos sustentados por uma revisão

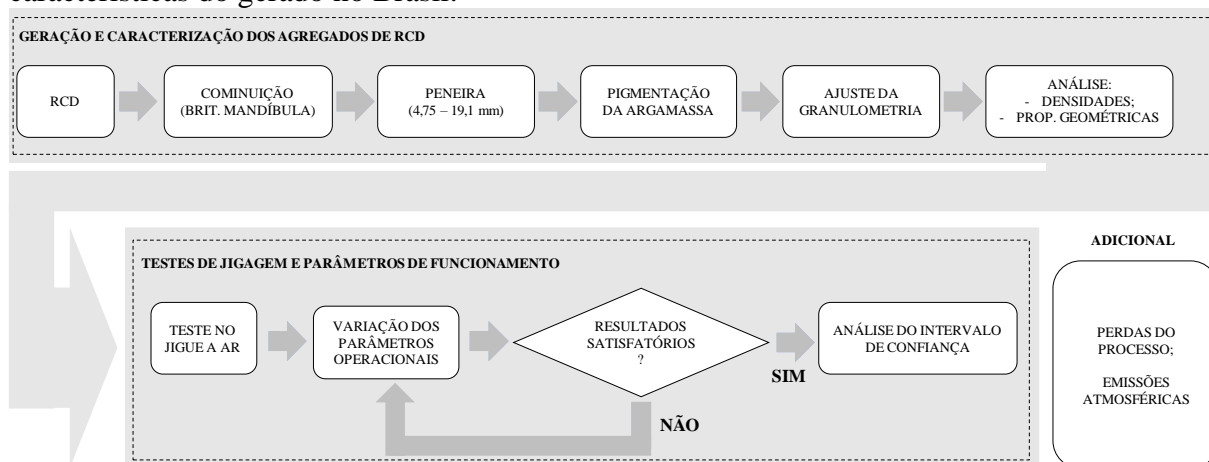
da literatura. De posse dos dados de entrada, são então avaliados os custos relacionados à reciclagem do RCD brasileiro conforme os processos de Reciclagem Atual e Proposto na avaliação ambiental (Etapa 2). Análises e discussões adicionais são realizadas na busca por soluções alternativas para melhores resultados econômicos de ambos os processos.

Os resultados da avaliação ambiental (Etapa 2) e análise econômica (Etapa 3) dão suporte à realização da Etapa 4, a análise de Intensidade de Impacto dos processos de Reciclagem Atual (RA) e Reciclagem Proposta (RP) para o RCD brasileiro. RAs etapas 2, 3 e 4 tem seus resultados comparados a produção de Agregado Graúdo Natural (AGN).

3.1. ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DO BENEFICIAMENTO GRAVIMÉTRICO

A análise de viabilidade técnica do beneficiamento com o jigge a ar dos agregados graúdos de RCD carece de processos prévios de geração e caracterização. De posse destes agregados graúdos reciclados é possível realizar os sucessivos testes necessários à avaliação da viabilidade do beneficiamento com o equipamento. Concomitantemente, é realizada a identificação dos melhores parâmetros de operação do equipamento, conforme as características do agregado reciclado. A Figura 18 mostra um fluxograma esquemático dos estágios aplicados no presente procedimento experimental.

Figura 18 – Fluxograma dos processos executados para análise da viabilidade técnica do uso do jigge a ar no beneficiamento gravimétrico dos agregados reciclados de RCD com características do gerado no Brasil.



Fonte: o Autor.

3.1.1. Geração e Caracterização dos Agregados de RCD

Os resíduos de construção e demolição (RCD) utilizados neste trabalho têm sua origem de geração de fontes diversas. O Quadro 6 apresenta uma breve descrição de características de cada uma das fontes de geração dos agregados reciclados. São obtidos 100kg de resíduos de Argamassa, Concreto e Cerâmica, cada, com a finalidade de obter, no mínimo, 50 kg de agregados graúdos (4,75/19,1mm) pós cominuição. Os agregados graúdos gerados são considerados como representativos do RCD gerado no Brasil, compostos por argamassa, concreto e cerâmicos, como identificado em revisão bibliográfica que tem mais detalhes disponíveis em Waskow et al. (2018a).

Os resíduos de Argamassa utilizados são originados de corpos de prova (CP) elaborados em uma unidade de ensino, assim como parte dos resíduos de Concreto. Os demais resíduos de Concreto são compostos por *Pavers*, originados em uma obra no município de São Leopoldo-RS, com mesmas características dos utilizados no município de Porto Alegre-RS. Os agregados Cerâmicos são obtidos de obras executadas no município de Porto Alegre-RS, e compreendem materiais de um mesmo lote para cada tipo de produto.

Quadro 6 - Composição dos materiais utilizados neste trabalho. Parte das características dos materiais são obtidas das suas respectivas normas de referência para desempenho. Os corpos de prova utilizados têm suas resistências à compressão previstas na elaboração, conforme informado pela instituição de ensino que disponibiliza os materiais, entretanto não são disponibilizados ensaios confirmatórios.

MATERIAL	ORIGEM	ILUSTRAÇÃO	%	CARACTERÍSTICAS
Argamassa	Corpos de prova		100	Razão cimento/areia 1:3; Areia média; Cimento CP IV e CP V; Sem utilização de gesso ou cal.
Concreto	Pavers		10	Resistência à compressão 35 – 50 MPa*.
	Corpos de prova		90	Resistência à compressão 20 – 25 MPa aos 28 dias; traço simples sem aditivo; Cimento CP V e IV; Areia média; Brita basáltica tipo 1.
Cerâmico	Tijolo maciço		5	Resistência à compressão 1,5 – 4 MPa**.
	Telhas		50	Carga de ruptura à flexão superior a 1300N***.
	Tijolos de 6 furos		45	Resistência à compressão 1 – 10 MPa****.

Obs: * conforme NBR 9781 (2013); ** NBR 15270-1 (1983); *** conforme NBR 15310 (2009d); **** conforme NBR 15270-1 (2017a) e NBR 15270-2 (2017b).

Fonte: o Autor.

Cada material é individualmente cominuído em britador de mandíbula (Figura 19a), e

peneirado (Figura 19b) sendo mantidas, para o estudo, as frações entre 4,75 e 19,1 mm (agregados graúdos). A proporção das frações 4,75/9,5 mm, 9,5/12,5 mm e 12,5/19,1 mm são mantidas constantes e iguais a 1:1:1 (ou seja, aproximadamente 33% em volume de cada granulometria). Tal proporção foi adotada em conformidade com os resultados obtidos por Ambrós (2017), que sugere esta proporção para a otimização da separação dos agregados por densidade no jigue a ar. Os agregados de Argamassa são pigmentados (Figura 19c) para permitir diferenciação, após o beneficiamento no jigue a ar, dos agregados de Concreto.

É respeitada a condição de repetição da cominuição de cada material por apenas duas (2) vezes, já que quanto maior o número de repasses, maior será a influência sobre a forma do agregado e conseqüentemente haverá influência nas propriedades do novo Concreto produzido. As peneiras foram agitadas de maneira mecânica por dois (2) minutos. As frações fora do intervalo de interesse (4,75 a 19,1 mm) foram quantificadas para identificação das perdas de materiais e posteriormente descartadas.

Figura 19 – Equipamentos e materiais utilizados para a geração e caracterização dos RCD. (a) britador de mandíbula, (b) peneira, (c) agregados de argamassa gerado e após pigmentação



Fonte: o Autor.

Os resultados obtidos para cada tipo de agregado são comparados à norma NBR 7211 (ABNT, 2009a), mesmo se tratando de norma para agregados naturais, dada a inexistência de norma específica para a distribuição granulométrica de agregados reciclados a serem utilizados na construção civil.

Para a definição da forma dos agregados produzidos na cominuição é realizado quarteamento individual de cada tipo de material, conforme a NBR 10007 (ABNT, 2004a), até a obtenção de dois quartos, que somados atinjam aproximadamente 3 kg. As amostras de cada tipo de agregado foram identificadas como Ar1 e Ar2 (Argamassa); Co1 e Co2 (Concreto); e Ce1 e Ce2 (Cerâmico).

A análise da forma dos agregados é realizada aplicando a norma ABNT NBR 7809 (ABNT, 2008) e NBR NM 248 (ABNT, 2003). Estas normas estabelecem o método para a determinação do índice de forma de agregados graúdos com dimensão característica maior que 9,5mm. Frações com granulometria inferior à 9,5mm e aquelas cujas porcentagens, em massa, retidas individuais sejam iguais ou menores que 5% não são consideradas na análise. Para a realização dos ensaios são utilizados 200 grãos distribuídos entre nas faixas granulométricas 9,5 – 12,7mm e 12,7 – 19,1mm, conforme Equação 2.

$$N_i = \frac{200}{F_1 + F_2 + \dots + F_n} \times F_i \quad (2)$$

Onde,

200, é o número de grãos necessários para a realização do ensaio;

N_i , é o número de grãos a serem medidos na fração i ;

F_i , é a porcentagem de massa retida individual da fração i ;

$F_1 + F_2 + \dots + F_n$ = soma das porcentagens retidas individuais.

Os 200 grãos selecionados têm suas medidas obtidas com paquímetro digital. O cálculo do Índice de Forma é definido pela relação entre o comprimento (c) (maior dimensão possível de ser medida em qualquer direção do grão) e espessura (e) (menor distância possível entre planos paralelos entre si em qualquer direção do grão). O Índice de Forma é calculado conforme a Equação 3.

$$\text{Índice de forma} = \frac{c}{e} \quad (3)$$

Para a definição das densidades (*Massa Unitária*, *Massa específica* e *Massa específica aparente*) são utilizadas as amostras Ar_1 , Ar_2 , Co_1 , Co_2 , Ce_1 e Ce_2 . A *Massa Unitária* é analisada com a totalidade de cada uma das amostras. Para a definição dos outros dois parâmetros, *Massa específica* e *Massa específica aparente*, são necessários novos quarteamentos até atingir a quantidade capaz de ser analisada no Multipicnômetro e proveta, respectivamente.

A Argamassa é pigmentada e devido à introdução de um novo elemento na sua estrutura (pigmento Pó Xadrez cor azul), uma nova análise de Massa específica é realizada. Entende-se

que a *Massa Unitária* e a *Massa específica aparente* não iriam ser influenciadas pela pigmentação.

São segregadas aleatoriamente 3 amostras de agregados de Argamassa. Estas amostras têm seus resultados de *Massa específica* analisados e discutidos conforme os resultados prévios à pigmentação. A definição da *Massa Unitária* é realizada pela divisão da massa de material pelo seu volume, conforme a Equação 4.

$$\text{Massa Unitária} = \frac{\text{Massa do resíduo}}{\text{Volume interno do recipiente}} \quad (4)$$

A *Massa específica* é definida a partir da divisão da massa da amostra pelo volume esquelético da amostra⁸. O equipamento utilizado, Multipicnômetro, mede o volume esquelético da amostra, detectando a alteração na pressão devido ao volume de Hélio. Ao final o equipamento retorna o resultado de *Massa Específica* do material avaliado.

Para a determinação do *Massa específica aparente* inicialmente é obtida a massa de material sólido (massa do sólido). Utilizando volume conhecido de água (vol.água 1), seguido do despejado do sólido neste líquido, anotando-se o novo volume marcado pela água (vol.água 2). O cálculo do *Massa específica aparente* é realizado através da divisão da massa de material sólido (m.sólido) pela diferença de volume (vol.água 2 – vol.água 1), conforme Equação 5.

$$\text{Massa específica aparente} = \frac{\text{Massa do sólido}}{\text{vol. água 2} - \text{vol. água 1}} \quad (5)$$

3.1.2. Critério de Concentração entre os agregados de RCD em estudo

O Critério de Concentração (CC) é utilizado para estimar a facilidade com que os agregados podem ser separados por métodos de gravidade. Nesta análise são aplicados os valores de *Massa específica aparente* dos agregados. O cálculo deve ser realizado comparando: Argamassa x Concreto; Argamassa x Cerâmico; e Concreto x Cerâmico. O CC é definido pela Equação 6:

$$\text{CC} = \frac{\rho_h - \rho_f}{\rho_l - \rho_f} \quad (6)$$

⁸ onde o volume esquelético é o volume ocupado pela amostra sólida (e poros não acessíveis ao gás de análise).

Onde:

ρ_h = densidade da partícula mais pesada (g/cm^3);

ρ_f = densidade do fluido utilizado no equipamento (neste estudo o ar);

ρ_l = densidade da partícula mais leve (g/cm^3);

Também é analisada a Recuperação (Rec) do material de interesse, os agregados reciclados de concreto. Para tal é adotada a equação que relaciona a massa de agregados reciclados de concreto (mAGRC) na camada inferior do equipamento após um ciclo de jigagem, e a mAGRC total adicionada no jigue a ar, conforme a Equação 7.

$$\text{Rec} = \frac{mAGRC \text{ camada inferior.}}{mAGRC \text{ total}} \quad (7)$$

Onde:

Rec = índice de recuperação

mAGRC = massa de agregados reciclados de concreto.

3.1.3. Testes de jigagem e Parâmetros de operação

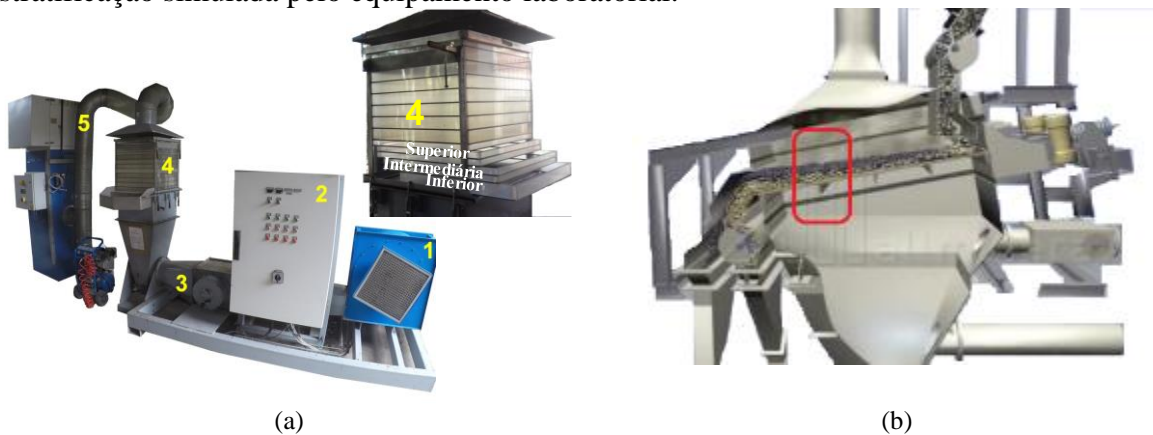
Os testes da avaliação da viabilidade do uso do jigue a ar são realizados em escala laboratorial. A eficiência do beneficiamento gravimétrico dos RCD brasileiros no jigue ar é aferida a partir do percentual de concentração da fração de agregados reciclados de concreto na camada inferior. O equipamento utilizado corresponde ao jigue modelo AllAir S-500 da Allmineral®, como pode ser visto na Figura 20a. Este equipamento atua de maneira não contínua, simulando a fase de estratificação do equipamento industrial, destacado na Figura 20b.

O jigue a ar utilizado tem um recipiente composto por camadas sobrepostas de acrílico montado em uma tela, vazada com aberturas de 1 mm, estática na parte inferior do recipiente. Fatias verticais distintas do leito de partículas podem ser removidas após um determinado período de operação do equipamento a partir da remoção individual de cada camada de acrílico (destacado na Figura 20a, componente 4).

O jigue a ar utilizado nos testes pode produzir um fluxo de ar de até $73 \text{ m}^3/\text{min}$ (expresso no painel elétrico do equipamento em termos de porcentagem da potência do soprador, ou seja, de 0 a 100%), chamado de Taxa de Expansão do leito. A Frequência de pulsação é controlada

pela rotação de uma válvula tipo borboleta e pode variar de 0 a 300 rpm, conforme ajuste no painel de controle (Figura 20, componente 2). Este mesmo equipamento foi utilizado nos testes realizados por Cazacliu et al. (2014), Sampaio et al. (2016) e Ambrós (2017).

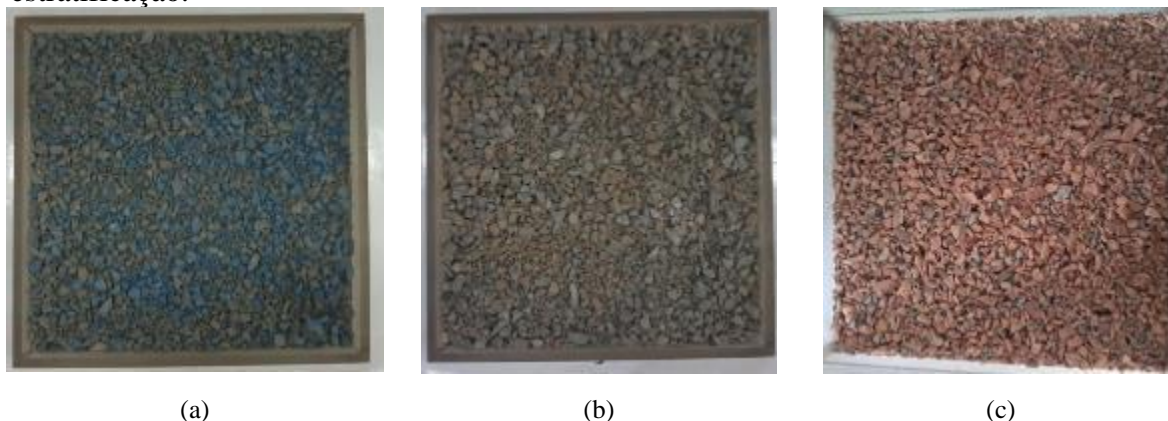
Figura 20 – (a) Jigue a ar usado para testes com indicação de seus principais componentes. (1) ventilador; (2) painel de controle; (3) válvula tipo borboleta; (4) recipiente; (5) sistema de controle de emissões. (b) Jigue em escala industrial com destaque em vermelho para a zona de estratificação simulada pelo equipamento laboratorial.



Fonte: adaptado de Allmineral®.

Aproximadamente 39 kg de agregados mistos (Argamassa, Concreto e Cerâmicos somados) são utilizados nos testes com o jigue a ar. A massa de cada tipo de material é definida como a massa necessária ao completo preenchimento de uma das camadas de acrílico (5cm x 53cm x 53cm) do recipiente do jigue a ar (Figura 21). Sem esta distribuição granulométrica equitativa entre as camadas de acrílico os resultados podem sugerir valores divergentes do real.

Figura 21 – Imagem dos agregados utilizados nos testes de beneficiamento com o jigue a ar. (a) Argamassa, (b) Concreto e (c) Cerâmica. Limite das imagens de cada material dado pelo material acrílico que compõe cada camada do recipiente do jigue a ar que simula a zona de estratificação.



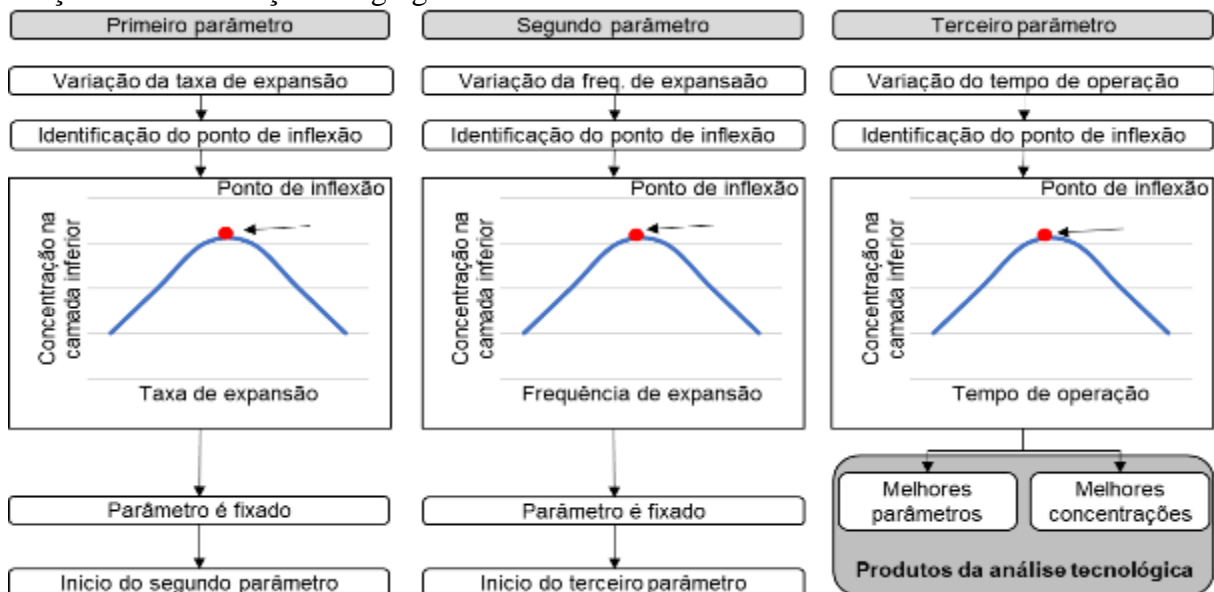
Fonte: o Autor.

Ao final de cada teste, o equipamento é desligado e cada uma das três camadas é removida separadamente. A concentração dos agregados graúdos reciclados de concreto na camada inferior é avaliada por meio da separação manual e quantificação das partículas de cada tipo de material, Concreto, Argamassa e Cerâmica.

Sucessivos testes são realizados variando os parâmetros operacionais do jigue a ar. Inicialmente a Taxa de Expansão é analisada variando os valores, aumentando ou diminuindo conforme os resultados obtidos (orientado pelo aumento da concentração de agregado de concreto na camada inferior). Quando o ponto de inflexão da concentração de agregados de concreto na camada inferior é atingido o valor do parâmetro é fixado e inicia-se a análise do parâmetro seguinte. Mesma metodologia é aplicada para os parâmetros Frequência de Expansão e Tempo de Operação.

Testes são realizados sucessivamente tantas vezes quanto necessário até identificados os parâmetros com melhores resultados de concentração da fração de concreto na camada inferior. A metodologia utilizada na identificação dos melhores parâmetros de operação do jigue a ar no beneficiamento do RCD com características do gerado no Brasil são ilustrados na Figura 22.

Figura 22 - Estrutura para avaliação dos melhores Parâmetros de operação do jigue a ar em função da concentração de agregado de concreto na camada inferior.



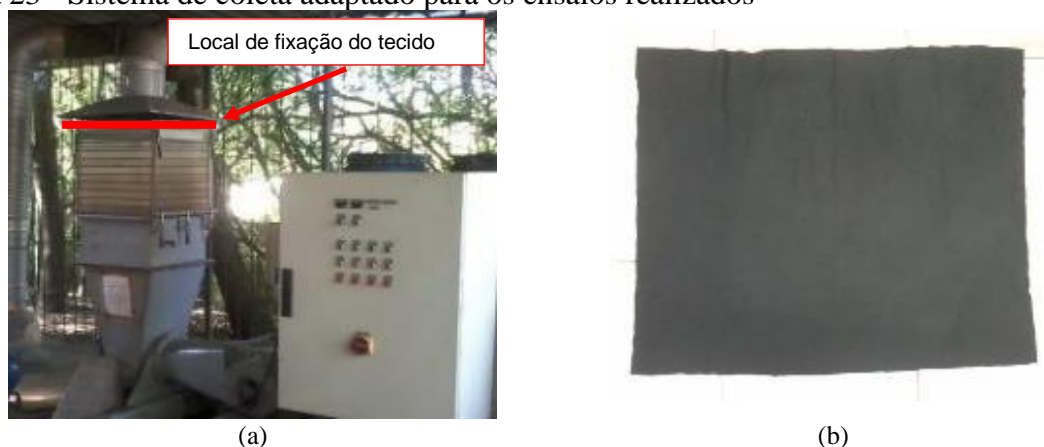
Fonte: o Autor.

Após identificados os melhores parâmetros operacionais, cinco (5) ensaios consecutivos são realizados de modo a verificar o nível de confiança dos resultados. Análise de distribuição

granulométrica dos agregados utilizados nos testes e da fração inferior do melhor resultado de beneficiamento são analisados para identificar a existência de influência do equipamento nas características dos agregados.

Ao longo dos sucessivos testes no jigue a ar a geração de AMR (<4,75mm) e emissões atmosféricas do equipamento são quantificadas. O filtro adotado para a coleta das emissões atmosféricas corresponde a uma malha do tipo P.K. de algodão com densidade de 180 g/m² (Figura 23). O material retido ao longo dos sucessivos testes é homogeneizado e analisado por difração a laser.

Figura 23 - Sistema de coleta adaptado para os ensaios realizados



Fonte: o Autor.

Ao final são realizados testes sobre a influência do processo de beneficiamento utilizando o jigue a ar nas partículas de agregados graúdos reciclados gerados. São analisados distribuição granulométrica, forma das partículas e resistência à compressão esperada para um novo concreto a ser produzido com os agregados graúdos reciclados gerados a partir dos métodos de Reciclagem Atual e Proposto.

3.2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO BRASILEIRO

Este trabalho aplica as 4 etapas da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV): definição do objetivo e escopo, inventário do ciclo de vida (ICV), avaliação dos impactos do ciclo de vida (AICV), e interpretação (ABNT, 2009b, 2009c). É executada, também, análise de sensibilidade do transporte dos agregados até o local de uso (obra), comparando os resultados dos agregados

reciclados (processos de Reciclagem Atual e Proposto) com o Agregado Graúdo Natural (AGN).

3.2.1. Definição do objetivo e escopo

O objetivo da ACV é avaliar os impactos ambientais de dois processos de reciclagem do RCD. O primeiro processo de reciclagem considera os processos unitários utilizados atualmente no Brasil, denominado Reciclagem Atual (RA). O segundo processo considera os processos unitários atuais acrescido do uso do jigote a ar, denominado Reciclagem Proposta (RP). Os resultados da ACV dos cenários de reciclagem são comparados aos impactos da produção de Agregado Graúdo Natural (AGN), avaliado conforme conjunto de dados disponível em Morales et al., 2019.

Para atingir o objetivo da ACV é necessário: (a) gerar um inventário que represente o cenário brasileiro das plantas de reciclagem de RCD, (b) alimentar o inventário com dados quantitativos da região do estudo de caso; (c) desenvolver uma ACV que permita comparar os impactos das plantas de reciclagem do RCD no Brasil, conforme os processos RA e o RP; e (d) comparar os resultados da ACV dos processos de reciclagem a produção do AGN.

Os dados de inventário coletados podem servir de base para futuros estudos sobre o tema em outras regiões do Brasil. Os resultados da avaliação dos impactos do ciclo de vida (AICV) deste trabalho serão suporte aos tomadores de decisão (públicos ou privados) na seleção do material mais ambientalmente amigáveis para a construção civil e também de comparação de estudos com pressupostos e contexto semelhantes.

A ACV é realizada com o uso do *software* OpenLCA⁹ 1.6.3. Os dados de inventário são compostos por dados quantitativos coletados, medidos/estimados e dados de segundo plano disponíveis no *dataset*, da base Ecoinvent (v.3.4), utilizado no processo de adaptação. Parte dos dados quantitativos do inventário são obtidos junto a uma planta de reciclagem do município de Porto Alegre-RS, que possui características como as descritas por Miranda et al. (2009) e Abrecon (2015). Dados medidos e estimados tomam como base a literatura, testes em equipamentos da mineração em escala laboratorial e balanço de massa do processo conforme características do RCD brasileiro apresentado em capítulo específico.

⁹ O openLCA é um software livre e de código aberto para Sustentabilidade e Avaliação do Ciclo de Vida disponível em <http://www.openlca.org/>

Os resultados da ACV dos processos de reciclagem são comparados a produção de agregado graúdo natural, identificado ao longo do trabalho como AGN. A avaliação dos impactos do ciclo de vida (AICV) utiliza a metodologia CML 2001 *baseline*, considerando todos os seus 11 indicadores, como disponível no Quadro 7.

Quadro 7 – Categorias de impacto avaliadas

CATEGORIA DE IMPACTO	UNIDADE
Potencial de Acidificação (AP)	kg SO ₂ eq.
Depleção da Camada de Ozônio (ODP)	kg CFC-11 eq.
Depleção de recursos abióticos - elementos (DAR-e)	kg Sb eq.
Depleção de recursos abióticos – combustíveis fósseis (DAR-f)	MJ
Ecotoxicidade de água doce (FAETP)	kg 1,4-dichlorobenzene eq.
Ecotoxicidade de água salgada (MAETP)	kg 1,4-dichlorobenzene eq.
Ecotoxicidade terrestre (TETP)	kg 1,4-dichlorobenzene eq.
Eutrofização (EP)	kg PO ⁻⁴ eq.
Mudanças Climáticas (GWP100)	kg CO ₂ eq.
Oxidação fotoquímica (PO)	kg ethylene eq.
Toxicidade humana (HTP)	kg 1,4-dichlorobenzene eq.

Fonte: o Autor.

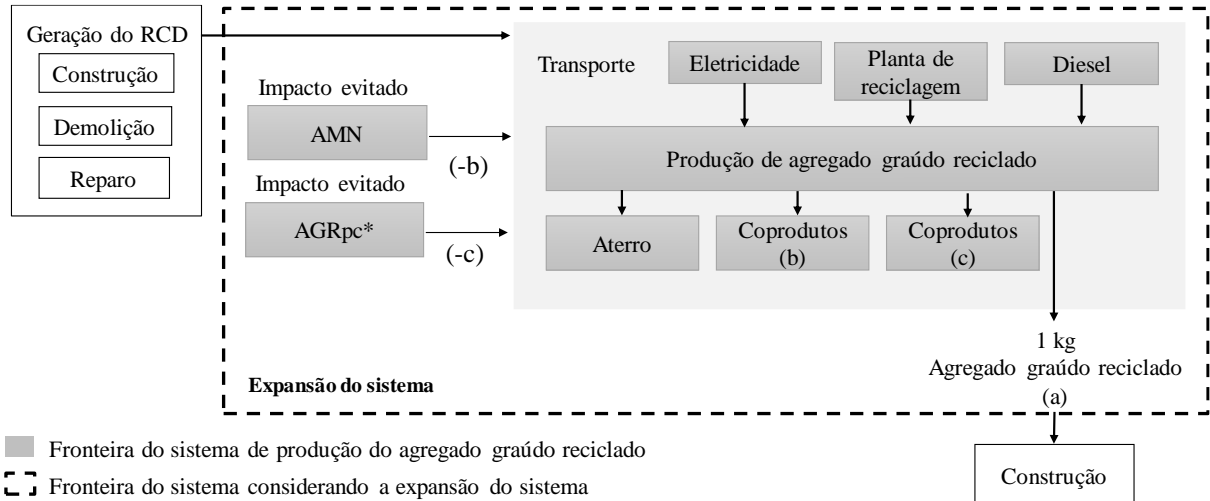
A unidade funcional corresponde à produção de 1 kg de agregado graúdo reciclado para reuso na produção de um novo concreto. O produto de referência é identificado no processo RA como agregado graúdo reciclado (AGR) e no processo RP como agregado graúdo reciclado rico em concreto (AGRrc).

A fronteira do sistema define quais processos são considerados e quais são desconsiderados na ACV. Este trabalho adota como premissa da fronteira de sistema a abordagem do berço ao portão. Considera-se, portanto, a produção brasileira de agregado graúdo reciclado como um sistema de produto independente, subsequente ao fim de vida de uma edificação (ou parte desta), e antecessor à produção de um novo material que utiliza agregado reciclado. A Figura 24 ilustra as fronteiras do sistema adotado para os processos de reciclagem. Na

Figura 25 é possível verificar a fronteira do sistema de produção do Agregado Graúdo Natural (AGN), baseado em Morales et al. (2019), utilizado na comparação dos resultados da ACV.

Assim, as fronteiras do sistema se limitam da fonte de geração ao local de uso do agregado reciclado, considerando o processo de reciclagem e seus processos unitários, como a cominuição, peneiramento, separação magnética, correias transportadoras e retroescavadeira.

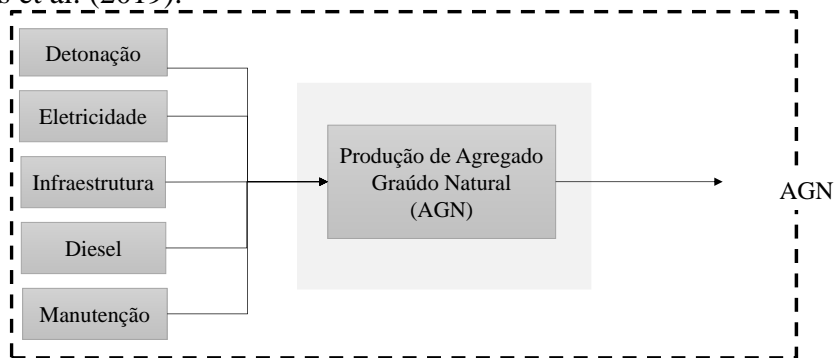
Figura 24 – Fronteira do sistema de produto considerada para ambos métodos de Reciclagem, Atual e Proposto, de reciclagem do RCD brasileiro. Em cinza, as unidades de processo da produção do agregado graúdo reciclado. A caixa tracejada representa a expansão do sistema, com a adoção da abordagem de impacto evitado, considerando os coprodutos da reciclagem. O “agregado graúdo reciclado” corresponde ao AGR no RA e o AGRrc no RP. Os dados quantitativos do impacto evitado são definidos e descritos posteriormente no subcapítulo 4.1.5.



* Somente na avaliação do RP

Obs.: A Planta de Reciclagem corresponde à infraestrutura de uma planta de reciclagem.
 Fonte: o Autor.

Figura 25 – Fronteira do sistema de produção de Agregado Graúdo Natural (AGN), baseado em Morales et al. (2019).



Fonte: baseado em Morales et al. (2019).

É adotado o modelo de sistema Atribucional com a abordagem de impacto líquido evitado, como realizado por Rosado et al. (2017), Rosado e Peixoto (2017), Penteadó e Rosado (2016) e Vitale et al. (2017) em trabalhos de ACV da reciclagem de RCD. É assumido que os coprodutos agregado miúdo - AMR (de RA e RP) e graúdos reciclados pobres em concreto - AGRpc (somente em RP) não possuam desempenho equivalente aos agregados naturais de faixa granulométrica equivalente na produção de um novo concreto, se substituídos em igual proporção (1:1). Assim, é adotada a Equação (8) de Cabral (2007) para previsão dos percentuais

de substituição dos agregados miúdo e graúdo naturais (AMN e AGN, respectivamente) por reciclados, mantendo-se uma resistência a compressão (f_c) desejada.

Em ambos os processos de reciclagem avaliados (RA e RP) é considerada a disponibilidade de agregados graúdos reciclados para a produção de um novo concreto que atinja 40 MPa de resistência à compressão. Quando da avaliação do percentual de substituição possível para o AGRpc, os percentuais de substituição dos AMR são mantidos igual a 0 (zero), e vice versa.

$$F_c = \left(\frac{102,43}{5,38^c} \right) * [1 - (0,338 * cma + 0,152 * fma + 0,275 * cca + 0,067 * fca + 0,371 * ccea - 0,1338 * fcea)] \quad (8)$$

Onde:

cma: percentual de substituição do agregado graúdo de argamassa;

fma: percentual de substituição do agregado miúdo de argamassa;

cca: percentual de substituição de agregado graúdo de concreto;

fca: percentual de substituição de agregado miúdo de concreto;

ccea: percentual de substituição de agregado graúdo cerâmico; e

fcea: percentual de substituição do agregado miúdo cerâmico.

A análise de sensibilidade dos resultados considera a variação das distâncias de transporte do RCD até o local de uso (obra), em comparação à variação da distância da produção de agregado natural até o mesmo local. O transporte do RCD é considerado uma das principais fontes de impacto em estudos de ACV deste tipo de atividade, como visto por Bohne et. al. (2008), Coelho e Brito (2012), Ding et al. (2016), Faleschini et al. (2016), Guinot et. al. (2015) e Vossberg et. al. (2014). Assim, sua análise é crucial para confirmar se existe influência do transporte nos cenários avaliados e identificar dentro de quais os limites de distância há resultados mais ambientalmente favoráveis à reciclagem frente à continuidade do uso maioritário do agregado natural.

3.2.2. Inventário do ciclo de vida

O processo de adaptação do inventário para a ACV da reciclagem do RCD brasileiro foi realizado considerando a prévia identificação de um processo equivalente a esta atividade na base de dados, facilitando o uso de dados de *background* da mesma. A seleção do processo equivalente à reciclagem de RCD é realizada a partir da consulta a base de dados Ecoinvent e

os seus manuais de referência, buscando assim um processo que se refira a este tipo de atividade e contemple, em maior parte, características de processo como as adotadas no Brasil.

É identificado na base Ecoinvent 3.4 um processo com origem na Suíça, denominado “*treatment of waste concrete gravel, sorting plant - CH*”. Esse processo considera os resíduos destinados à reciclagem, à disposição em aterro e energia de demolição, por exemplo. Nenhum bônus ou compensação é dado por se tratar de material de reciclagem (e por consequência minimizar a produção de um novo produto) (DOKA, 2003).

O processo de adaptação do inventário segue as premissas disponíveis pela Unep/Setac (2011), Colodel (2008) e Oliveira (2013): definir o sistema do produto, limite do sistema, unidade funcional, escala temporal, tecnológica e geográfica desejada; selecionar o conjunto de dados equivalente na base de dados; identificar as premissas de elaboração do dado equivalente; caracterizar e elaborar um inventário local para o sistema de produto; adaptá-lo a uma abordagem macro (alterando parâmetros gerais); adaptá-lo a uma abordagem micro (dados coletados e da literatura).

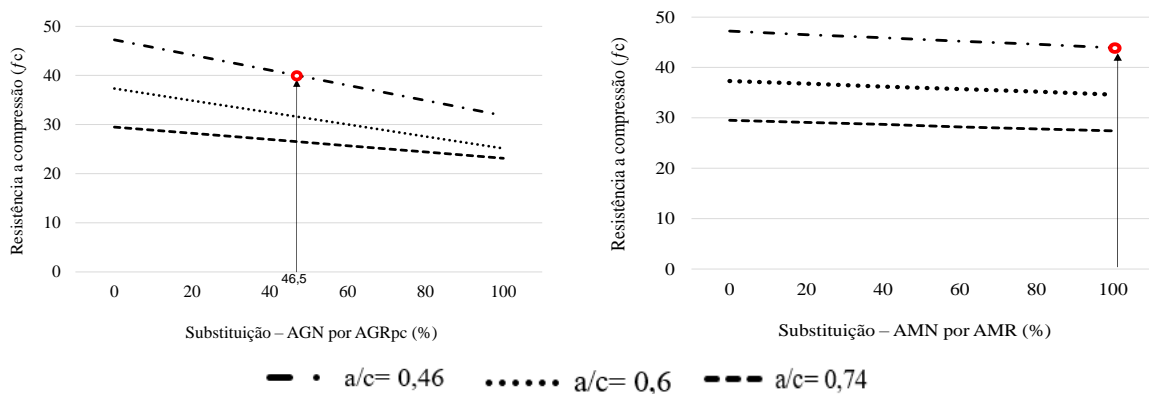
A maior parte dos dados de entrada e de saída que compõem o processo “*treatment of waste concrete gravel, sorting plant - CH*” são mantidos, sendo os dados quantitativos alterados conforme as características dos processos RA e RP deste trabalho. O inventário considera dados quantitativos fornecidos por uma planta de reciclagem de RCD de Porto Alegre, com características tecnológicas equivalentes à média nacional brasileira. Outros dados, indisponíveis ou não fornecidos, são obtidos da literatura e de testes de laboratório em equipamentos em escala laboratorial. Também é realizada a exclusão de dados de entrada que compõem o processo unitário “*treatment of waste concrete gravel, sorting plant - CH*”, como, por exemplo, os relacionados à etapa de demolição, que estão fora da fronteira do sistema deste trabalho.

Para auxiliar na quantificação de parte dos dados de entrada da adaptação, é realizado balanço de massa considerando os resultados dos processos de cominuição, peneiramento e uso do jigge a ar realizados em escala de laboratório para a avaliação da viabilidade técnica do beneficiamento gravimétrico com este equipamento. As cominuições em britador de mandíbula e o uso de peneiras permitem identificar dados quantitativos de geração de agregados reciclados muito graúdos (AmGR), com granulometria $>19,1\text{mm}$, e agregados miúdos reciclados (AMR), com granulometria $<4,75\text{mm}$. Da mesma forma, é possível quantificar as frações produzidas de agregado graúdo reciclado (AGR), fração entre $4,75\text{mm}$ e $19,1\text{mm}$, do processo de Reciclagem

Atual e as frações de agregados graúdos pobres e ricos em concreto (AGR_{pc} e AGR_{rc}, respectivamente), do processo de Reciclagem Proposto.

A quantificação dos dados de entrada dos impactos evitados referentes à redução na demanda de produção de agregado miúdo natural (AMN) e agregado graúdo natural (AGN), este último somente no RP, é dada pelo percentual de substituição destes produtos por agregados reciclados (miúdo e graúdo pobre em concreto) das suas respectivas granulometrias. Para tal, é adotada como referência a produção de concreto com os agregados reciclados com características do gerado no Brasil que atinja 40 MPa de resistência a compressão (f_c). Estes percentuais de substituição são definidos a partir da Equação 8, proposta por Cabral (2007). Não é considerada na ACV o processo de produção do novo concreto. Os percentuais de substituição dos AMN e do AGN pelos coprodutos da reciclagem, AMR e AGR_{pc} respectivamente, são de 100% e 46,5%, como pode ser visto na Figura 26.

Figura 26 – Resistência a compressão prevista conforme a Equação de Cabral (2007) na produção de concretos contendo agregados graúdos reciclados produzidos nos processos de Reciclagem Atual e Proposto para o Brasil.



Fonte: o Autor.

A produção de agregado graúdo natural (AGN) tem seu *dataset* definido a partir do ajuste do processo “*gravel production, crushed | gravel, crushed | cut-off, U – RoW*”, conforme realizado por Morales et al. (2019). O conjunto de dados final é ilustrado na Figura 27.

Figura 27 – *Dataset* adaptado para representação do processo brasileiro de produção de agregado graúdo natural (AGN) utilizado neste trabalho.

Entrada/saída original	Quant.	Unid.
Entradas		
<i>Basalt, in ground</i>	1,00	kg
<i>Blasting blasting cut-off, S - RER</i>	7,73E-5	kg
<i>Conveyor belt production conveyor belt cut-off, S - RoW</i>	9.51E-8	m

Figura 27 - *Dataset* adaptado para representação do processo brasileiro de produção de agregado graúdo natural (AGN) utilizado neste trabalho (*continuação...*)

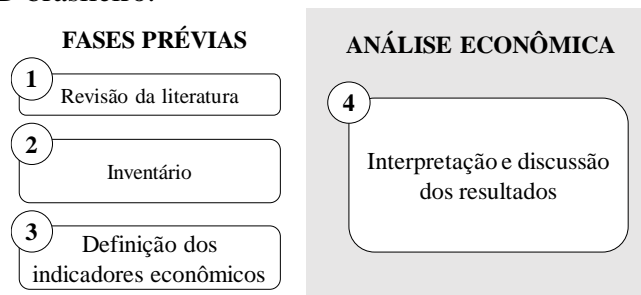
<i>Market for diesel, burned in building machine diesel, burned in building machine cut-off, S - GLO</i>	0,01020	MJ
<i>Market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage cut-off, S - BR</i>	0,00720	kWh
<i>Market for gravel/sand quarry infrastructure gravel/sand quarry infrastructure cut-off, S - GLO</i>	4,75E-11	Item
<i>Market for industrial machine, heavy, unspecified industrial machine, heavy, unspecified cut-off, S - GLO</i>	9,51E-5	kg
<i>Market for lubricating oil lubricating oil cut-off, S - GLO</i>	2,50E-6	kg
<i>Treatment of municipal solid waste, sanitary landfill municipal solid waste cut-off, S - CH</i>	-2,12E-6	kg
<i>Occupation, mineral extraction site</i>	2,90E-4	m2*a
<i>Occupation, water bodies, artificial</i>	6,27E-5	m2*a
<i>Market for steel, low-alloyed, hot rolled steel, low-alloyed, hot rolled cut-off, S - GLO</i>	5,1E-5	kg
<i>Market for synthetic rubber synthetic rubber cut-off, S - GLO</i>	4,00E-6	kg
<i>Market for waste mineral oil waste mineral oil cut-off, S - CH</i>	-2,5E-6	kg
<i>Water, lake</i>	3,17	m3
Saídas		
Bica graduada	0,17	kg
AGN	0,63	kg
Pó de pedra	0,20	kg
<i>Particulates, <2.5 um</i>	0,0016	kg
<i>Particulates, >10 um</i>	0,0080	kg
<i>Particulates, >2.5 um, and <10 um</i>	0,0064	kg

3.3. ANÁLISE ECONÔMICA DA RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO BRASILEIRO

Para a realização da análise econômica da reciclagem de RCD no Brasil, interpretação e discussão dos resultados, é necessária a execução de 3 fases prévias: revisão da literatura sobre dados de entrada na análise de custos da reciclagem de RCD; inventário dos dados de entrada, definição dos indicadores econômicos, como ilustrado na Figura 28.

A seguir são descritas as metodologias adotadas para a realização de cada uma das fases.

Figura 28 – Ordem da execução das fases que dão suporte e complementam a análise econômica da reciclagem de RCD brasileiro.



Fonte: o Autor.

3.3.1. Inventário dos custos da reciclagem de RCD

A escassez de metodologias transparentes e replicáveis resulta na necessidade de identificação dos principais dados de entrada que compõem a análise de custo da reciclagem de RCD no Brasil. Considerando a inexistência de bancos de dados nacionais ou regiões e de modo a tornar menos dispendiosa e mais assertiva a identificação dos principais dados de entrada de uma análise econômica da reciclagem de RCD, são realizadas revisões da literatura considerando os objetivos e critérios apresentados a seguir:

- a) Primeira etapa: realizada a partir da identificação dos estudos em periódicos científicos. Inicialmente é realizada uma busca nas plataformas *Science Direct* e *Springer*. A consulta dos artigos nas plataformas de periódicos é realizada aplicando a busca das seguintes palavras no título, palavras-chave e resumo dos artigos: “*cost*”, “*construction*”, “*demolition*”, “*waste*” e “*management*”. Os artigos identificados nas plataformas são submetidos a uma triagem que considera dois critérios: se a análise de custo é realizada; e se o RCD é o resíduo de referência do estudo. Ao final são identificados os dados de entrada que compõem cada trabalho que atende aos critérios anteriormente descritos;
- b) Segunda etapa: de forma complementar é realizada pesquisa para identificar estudos adicionais. Nesta etapa teses de doutorado e trabalhos que abordam custos da reciclagem de RCD no Brasil são os alvos da consulta. Esta literatura corresponde a estudos científicos disponíveis na rede mundial de pesquisa na internet. Esta segunda etapa adota como palavras de busca as mesmas utilizadas na primeira etapa, porém sendo aplicadas na língua portuguesa, sendo considerada como concluída quando não são mais identificados novos dados de entrada a cada novo trabalho acessado.

Os valores quantitativos que alimentam os dados de entrada identificados na fase anterior são definidos com base nas informações fornecidas pela planta de reciclagem local e, na sua indisponibilidade, dados obtidos das revisões da literatura. Todavia, dados consultados na literatura podem divergir. Desta forma, é definido critério de seleção e priorização dos valores quantitativos a serem aplicados na análise de custo deste trabalho. Os critérios adotados são elencados a seguir:

- a) Dados medidos são preferíveis aos estimados;

- b) Dados médios de plantas de reciclagem são preferíveis a dados de apenas uma planta;
- c) Dados mais recentes são preferíveis aos dados de maior período de tempo;
- d) Dados brasileiros são preferíveis aos dados estrangeiros;
- e) Dados de tecnologia equivalente/análoga são preferíveis a dados de tecnologias diferentes.

A avaliação de custo carece de premissas que dão suporte à definição de alguns dos valores dos dados de entrada. Algumas destas premissas usam como base nas informações disponibilizadas pela planta de reciclagem visitada em Porto Alegre-RS. Outros, entretanto, são arbitrados, caso não identificados na literatura, baseando nas características médias de uma planta de reciclagem brasileira, conforme Miranda et al. (2009) e as informações disponíveis pelo relatório Setorial da Abrecon (2015). As premissas adotadas na análise de custos são ilustradas no Quadro 8.

Quadro 8 – Premissas adotadas na definição de parte dos dados de entrada da análise de custo da produção brasileira de agregado graúdo reciclado

<u>Infraestrutura:</u> 0,5 há de área total; 450 m ² de construção civil; 20 anos de vida útil do projeto.	<u>Planta de reciclagem:</u> 10.085 toneladas/mês; 6 containers; 1 britador de mandíbulas; 1 peneira vibratória; 3 esteiras transportadoras (<i>+1 em RP</i>); 1 separador magnético; 1 Jigue a ar (<i>somente em RP</i>); 20 anos de vida útil.
<u>Empregados:</u> 2 auxiliares administrativos/operacionais; 1 gerente; 1 operador de retroescavadeira; 2 motoristas.	<u>Produção:</u> 58,5% AGR* (<i>somente em RA</i>); 39% AGRpc** (<i>somente em RP</i>); 19,5% AGRrc*** (<i>somente em RP</i>); 41% AMR****;
<u>Transporte:</u> Fonte/geração para planta de reciclagem: 30 km; Planta de reciclagem para local de uso: 15 km; Planta de reciclagem para o aterro (rejeito): 12,5 km.	0,49% outros resíduos recicláveis; 0,01% rejeito.
<u>Veículos:</u> 2 caminhões; 1 retroescavadeira; 10 anos de vida útil.	

* agregado graúdo reciclado; **agregado graúdo pobre em concreto; *** agregado de concreto concentrado; **** agregado miúdo reciclado; RA: Reciclagem Atual; RP: Reciclagem Proposto.

Fonte: o Autor.

3.3.2. Definição dos indicadores econômicos

A análise econômica é, tipicamente, usada para analisar se um projeto é estável, solvente, líquido ou lucrativo o suficiente para garantir a realização de um investimento de capital financeiro. Para isso, é necessário aplicar métodos de identificação dos fluxos de caixa,

como o Valor Presente Líquido (VPL), um dos frequentemente mais utilizados métodos dinâmicos. O VPL é um método que traz todos os fluxos de caixa de um projeto para a data zero e adiciona este ao valor do investimento inicial, usando como taxa de desconto a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) do tipo de atividade. A definição do VPL é realizada de acordo com a Equação 9, descrita a seguir:

$$VPL = \sum_0^n \frac{FCL_t}{(1+i)^t} \quad (9)$$

Onde:

VPL – Valor Presente Líquido,

FCL_t – Fluxo de Caixa líquido no momento *t*,

t- Tempo de fluxo de caixa,

i – Taxa de desconto,

N- Número de períodos estipulados (anos).

Via de regra, para ter um VPL positivo é necessário que a Taxa Interna de Retorno do investimento (TIR) seja maior que a Taxa Mínima de Atratividade (TMA¹⁰) do projeto. A análise da TIR é realizada conforme a Equação 10. A TIR é o principal indicador econômico na tomada de decisão para investimento em determinada atividade. Assim, alcançados valores não atrativos soluções alternativas podem ser propostas.

$$TIR = \sum_{t-1}^t VPL = \frac{FCL_t}{(1+i)^t} - I_i = 0 \quad (10)$$

Onde:

I_i – Investimento inicial total.

Payback é o tempo necessário para recuperar o custo do investimento. O *Payback* é um critério de avaliação de risco, nesse sentido, sua análise de período é particularmente útil em setores onde os investimentos se desvalorizam rapidamente, e onde um retorno total do investimento inicial é uma séria preocupação (NETO et al., 2017). Assim, projetos são mais atrativos com a recuperação de capital investido em menos tempo. A análise do *Payback* é realizada de acordo com a Equação 11.

¹⁰ Taxa estimada com base nas principais taxas de juros praticadas pelo mercado, como: (a) TMF – Taxa Básica Financeira; (b) TR – Taxa Referencial; (c) TJLP – Taxa de Juros de Longo Prazo; e (d) SELIC – Sistema Especial de Liquidação e Custódia.

$$\text{Payback} = (\text{no ano passado com negativo FCL}) + \left(\frac{\text{Valor absoluto do FCL naquele ano}}{\text{Fluxo de caixa total no ano seguinte}} \right) \quad (11)$$

Ambos os cenários de reciclagem de RCD avaliados, Reciclagem Atual e Reciclagem Proposta, tem mensurados o custo unitário de produção dos agregados reciclados, conforme Custos Fixos e Custos Variáveis da análise de custo. A avaliação do custo unitário (US\$/tonelada) de produção é dada pela equação descrita na Equação 12. Os resultados da análise de custo unitário servem de base para a análise de Intensidade de Impacto, dada por relações dos indicadores de impacto ambiental e/ou econômicos em capítulo específico.

$$\text{Custo unitário} = \frac{\text{Custos Fixos} + \text{Custos Unitários}}{(\text{Prod. mensal} \times 12 \times \text{vida útil prevista})} \quad (12)$$

3.4. ANÁLISE DA INTENSIDADE DE IMPACTO DOS CENÁRIOS DE RECICLAGEM DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO BRASILEIRO

Diferentemente das etapas anteriores, a análise de Intensidade de Impacto dos processos de Reciclagem Atual e Proposto para o RCD brasileiro não necessita da realização de fases para a definição dos resultados. Os resultados das etapas 3.2 e 3.3 servem de base a relações de impacto ambiental e indicadores econômicos.

A análise da Intensidade de Impacto dos processos de Reciclagem Atual e Proposto adota o Índice dado pela Equação 1, também utilizada por Auer et al. (2017), Ferrández-García et al. (2016), Lorenzo-Toja et al. (2016), Kim et al. (2013b), Rudenauer et al. (2005) e Piepenbrink e Kicherer (2004) em estudos que mensuram a relação impacto ambiental/custo como forma de indicar o nível da Intensidade de Impacto dos sistemas avaliados.

Os indicadores econômicos avaliados são *Payback*, TIR e Custo Unitário de produção. Para a relação dos resultados da avaliação ambiental e da análise de custos, a partir do índice de Intensidade de Impacto, os valores identificados na ACV para cada indicador são multiplicados por 1000, quando do uso do Custo Unitário. Assim, a análise de Intensidade de Impacto com relação a este indicador econômico representa o impacto ambiental equivalente a uma (1) tonelada de agregado graúdo reciclado produzido, conforme a unidade funcional. Para a análise da Intensidade de Impacto com os indicadores *Payback* e TIR como indicadores econômicos, os indicadores ambientais são mantidos na escala da unidade funcional avaliada

na ACV.

A apresentação dos resultados adota a ilustração gráfica da Figura 15, tomando como referência a produção de agregado graúdo natural (AGN) no Brasil e o processo de Reciclagem Atual (RA). Os dados de AICV do processo de produção do AGN são apresentados no capítulo 3.2, Avaliação Ambiental.

O custo unitário de produção do AGN é definido pela média dos valores sugeridos por De Paula et al. (2017) e Cabral e Araújo (2015), para a produção no Brasil. A conversão dos valores disponíveis pelos autores considera a cotação do dólar (R\$ 3,82) e a densidade de 1700 kg/m³ da brita basáltica, assim o custo unitário de produção do AGN considerado como referência da análise da Intensidade de Impacto é de US\$ 2,20/tonelada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados das etapas inicialmente definidas para atingir o objetivo principal deste trabalho, qual seja: analisar a viabilidade técnica, ambiental e econômica do uso do jigge a ar no beneficiamento gravimétrico dos agregados graúdos de RCD com características do gerado no Brasil.

Desta forma, inicialmente são apresentados os resultados da avaliação técnica do uso do jigge a ar no beneficiamento gravimétrico dos agregados graúdos reciclados com características do gerado no Brasil. Em seguida, são avaliados os impactos ambientais dos processos de Reciclagem Atual e Proposto para o RCD brasileiro.

A análise econômica da reciclagem do RCD brasileiro é apresentada como terceira etapa ao atendimento do objetivo principal deste trabalho. Ao final, utilizando dos resultados da avaliação ambiental e análise econômica, é avaliada a Intensidade de Impacto de ambos os processos de reciclagem de RCD brasileiro em estudo em comparação à produção do agregado graúdo natural.

4.1. RESULTADOS DA ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DO JIGUE A AR NO BENEFICIAMENTO GRAVIMÉTRICO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO BRASILEIRO

4.1.1. Caracterização das amostras

Este capítulo apresenta os resultados da análise da viabilidade do uso do jigge a ar no beneficiamento gravimétrico de agregados graúdos reciclados produzidos para reproduzir os agregados de RCD gerados no Brasil, sendo o estudo de caso aplicado ao município de Porto Alegre-RS. Neste capítulo são apresentados resultados das análises de distribuição gravimétrica e forma dos agregados, ambos antes e após o uso do equipamento, além de resultados das análises de densidade e critério de concentração.

4.1.1.1. Distribuição granulométrica dos agregados reciclados de argamassa, concreto e cerâmicos

A distribuição granulométrica dos agregados reciclados são descritas na Tabela 1 e Figura 29. Os resultados apresentam os quantitativos entre 4,75mm e 19,1mm (agregado graúdo).

As frações de agregados de Argamassa <4,75mm e >19,1mm atingem 49% e 3%, respectivamente, dos resultados iniciais. Na fração de interesse (entre 4,75 e 19,1mm) dos agregados de Argamassa, predomina a fração entre 9,5/12,7mm (41%), seguido dos intervalos 6,35/9,5 e 12,7/19,1 com 26 e 23%, respectivamente. Agregados com granulometria entre 4,75 e 6,35mm tem o menor percentual (9%).

Os agregados de concreto, pós cominuição, têm predomínio do intervalo 12,7/19,1mm (32%), seguido da fração inferior a 4,75mm (23%). Mesmo após duas cominuições a fração de agregados com granulometria superior à 19,1mm resultou em 14%. Mantida a fração de interesse (4,75/19,1mm), o intervalo 12,7 19,1mm tem o maior percentual (49%), seguido de 6,35/9,5 e 12,7/19,1 ambas com 22%. A fração 4,75/6,35mm apresentou a menor proporção (7%).

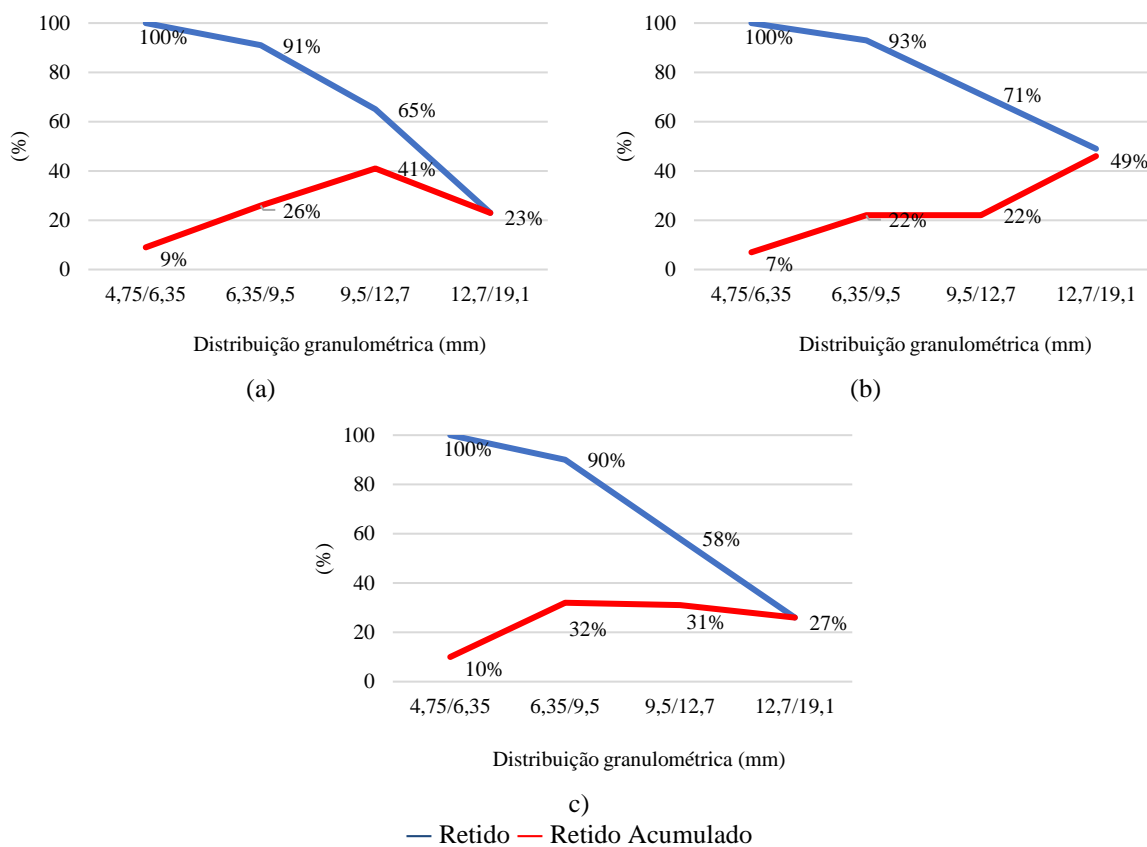
Os Cerâmicos, após passagem no britador de mandíbula, resultam em uma fração maior de agregados com granulometria igual a 4,75mm (26%), seguido de 6,35/9,5 e 9,5/12,7 (21% cada). A fração de agregados com granulometria superior à 19,1mm resulta em 6% da massa de resíduos. No intervalo de interesse (4,75/19,1mm) predomina granulometrias intermediárias (6,35/9,5 e 9,5/12,7mm), com 30% cada. A fração 4,75/6,35mm apresenta a menor proporção (10%).

Tabela 1 Distribuição granulométrica do resíduo de Argamassa, Concreto e Cerâmica pós cominuição.

FRAÇÕES (mm)	ARGAMASSA		CONCRETO		CERÂMICA	
	MASSA (kg)	PERCENTUAL (%)	MASSA (kg)	PERCENTUAL (%)	MASSA (kg)	PERCENTUAL (%)
4,75 / 6,35	4,95	9	3,81	7	5,3	10
6,35 / 9,5	14,45	26	11,52	22	16,3	32
9,5 / 12,7	22,6	41	11,97	22	16,05	31
12,7 / 19,1	12,8	23	26,69	49	13,55	27
TOTAL	54,8	100	53,99	100	51,2	100

Fonte: o Autor.

Figura 29 - Distribuição granulométrica das frações de agregados reciclados produzidos: (a) argamassa, (b) concreto e (c) cerâmica.



Fonte: o Autor.

A distribuição granulométrica dos 3 tipos de materiais tem pouca homogeneidade, geralmente com predominância das suas faixas intermediárias. Os agregados de Argamassa, Concreto e Cerâmica divergem, em parte, da norma brasileira NBR 7211 (ABNT, 2009a) quanto aos limites da composição gravimétrica para agregado graúdo. Somente a fração retida na peneira 4,75mm, dos 3 tipos de materiais, estaria de acordo com esta Norma, que define a porcentagem acumulada de 80-100% de retenção. Entretanto, vale ressaltar que esta norma se refere aos agregados naturais, sendo comparada aos resultados obtidos apenas devido à inexistência de norma semelhante para agregados reciclados. Ainda assim, para uso na produção de um novo concreto, considera-se necessária a adequação da distribuição granulométrica destes 2 tipos de materiais.

4.1.1.2. Forma dos agregados reciclados de argamassa, concreto e cerâmicos

Este subitem apresenta os resultados da avaliação do índice de forma de acordo com a NBR 7809 (ABNT, 2008). Foram avaliadas duas amostras de cada tipo de agregados graúdos reciclados gerados (Argamassa, Concreto e Cerâmico), com distribuição granulométrica conforme Tabela 2. Os resultados obtidos são analisados e discutidos com relação às normas vigentes sobre o tema, assim como literaturas referente às propriedades dos agregados e sua relação com a capacidade de beneficiamento no jigue a ar e produção de novos concretos contendo agregados de RCD.

Tabela 2 - Distribuição granulométrica das amostras de Argamassa, Concreto e Cerâmica utilizados na avaliação da forma dos agregados

FRAÇÕES (mm)	Ar1 (kg)	Ar2 (kg)	Co1 (kg)	Co2 (kg)	Ce1 (kg)	Ce2 (kg)
4,75 / 6,35	0,783	0,286	0,422	0,848	0,448	0,864
6,35 / 9,5	1,420	0,993	1,168	1,896	0,999	1,104
9,5 / 12,7	1,080	1,300	1,209	1,616	0,912	1,063
12,7 / 19,1	0,472	1,028	3,446	2,928	0,753	0,837
TOTAL	3,755	3,607	6,245	7,288	3,112	3,868

Fonte: o Autor.

É possível verificar semelhantes distribuições granulométricas dos agregados reciclados de Concreto e Cerâmica. Os agregados reciclados de Argamassa, entretanto, variam na distribuição granulométrica entre Ar1 e Ar2, resultado esperado devido a grande geração de finos deste tipo de agregado.

A quantidade de grãos analisados é resultado do cálculo descrito na NBR 7809 (ABNT, 2008) (Equação 2), determinando o número de grãos por faixa granulométrica. As medições foram realizadas após as amostras atingirem massa constante através do aquecimento em estufa (105°C). Os resultados do Índice de Forma (ABNT, 2008) obtidos para todas as amostras são apresentados na Tabela 3. Nesta mesma tabela são apresentados os valores de massa constante, número de grãos, além do índice de forma por tipo de agregado graúdo reciclado produzido.

Os resultados obtidos evidenciam o atendimento dos agregados graúdos reciclados de Argamassa e Concreto produzidos quanto às exigências da NBR 7211 (ABNT, 2009a, agregados para concreto), que determina que o índice de forma dos grãos de agregado não deve ser superior a 3, ainda que esta norma se aplique ao AGN. Da mesma forma, se comparados os resultados a NBR 15116 (ABNT, 2004b, agregados a serem aplicados em pavimentação) os agregados de Argamassa e Concreto atendem às especificações.

Tabela 3 - Resultados da análise do índice de forma dos agregados de Argamassa, Concreto e Cerâmica.

AMOSTRA	PENEIRAS (mm)	MASSA CONSTANTE (g)	Nº GRÃOS	ÍNDICE DE FORMA
Ar1	9,5 / 12,7	239,9	141	2,300
	12,7 / 19,1	219,4	59	2,342
Ar2	9,5 / 12,7	193,1	113	2,737
	12,7 / 19,1	325,6	87	2,569
MÉDIA				2,487
Co1	9,5 / 12,7	527,2	51	1,345
	12,7 / 19,1	1140,6	149	1,539
Co2	9,5 / 12,7	524,3	71	1,467
	12,7 / 19,1	1010,5	129	1,994
MÉDIA				1,586
Ce1	9,5 / 12,7	150,7	109	3,208
	12,7 / 19,1	266,2	91	3,248
Ce2	9,5 / 12,7	147,7	110	3,446
	12,7 / 19,1	272,6	90	3,565
MÉDIA				3,367

Fonte: o Autor.

Os agregados reciclados Cerâmicos, entretanto, têm índice de forma que supera os limites estabelecidos pelas normas NBR 7211 (ABNT, 2009a) e NBR 15116 (ABNT, 2004b). Supõe-se que o formato inicial dos resíduos, como telhas e tijolos furados (ambos já lamelares), tenha corroborado com a obtenção deste resultado

Considerando, principalmente, a norma brasileira NBR 7209 (ABNT, 2008) o resíduo cerâmico pode ser considerado inadequado para aplicações na produção de um novo concreto. Entretanto, considerando que a existência da alta lamelaridade do agregado cerâmico será fator auxiliador na remoção deste tipo de material no beneficiamento utilizando jigue a ar.

Os agregados cerâmicos, quando comparados à norma NBR 7809 (ABNT, 2008), também é o único tipo de material que compõe o RCD brasileiro a superar a relação comprimento/espessura ≤ 3 . Desta forma, é possível afirmar a necessidade de remoção da maior fração possível deste tipo de material da massa de agregados, para permitir melhores resultados de performance do novo concreto a ser produzido. Os agregados de argamassa e concreto atingem valores dentro do limite sugerido pela NBR 7809 (ABNT, 2008), o que confere aceitabilidade do seu uso na produção de novo concreto.

4.1.1.3. Densidade dos agregados reciclados de argamassa, concreto e cerâmica

As mesmas amostras utilizadas na avaliação da forma dos agregados foram utilizadas para a definição da *Massa Unitária*, *Massa específica* e *Massa específica aparente* dos agregados graúdos reciclados de Argamassa, Concreto e Cerâmica. Foram realizadas 3 análises de cada amostra com a finalidade de utilizar a sua média na definição dos valores de densidade. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4 - Composição dos resultados de densidade dos agregados de RCD estudados

DENSIDADE	ARGAMASSA	CONCRETO	CERÂMICO
Massa unitária (g/cm ³)	1,14 (±0,200)	1,21 (±0,200)	0,90 (±0,100)
Massa específica (g/cm ³)	2,44 (±0,001)	2,64 (±0,0283)	2,36 (±0,007)
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,17 (±0,100)	2,49 (±0,100)	1,86 (±0,500)

Fonte: o Autor.

Como descrito na metodologia (3.1), os agregados de argamassa tiveram que ser pigmentados para diferenciação dos agregados de concreto. Novas análises de *Massa específica* são realizadas e apresentaram os mesmos valores (2,44 g/cm³) permitindo concluir que a pigmentação realizada não influencia na alteração deste parâmetro. Os resultados da análise das densidades servem de base para a avaliação da maior, ou menor, facilidade de separação dos agregados reciclados por métodos de beneficiamento gravimétrico, com o uso do jigge a ar por exemplo. O índice utilizado para mensurar o grau de dificuldade é dado pelo Critério de Concentração, descrito no próximo subcapítulo.

Os agregados de argamassa e concreto tem valores próximos, se comparados os seus resultados de Massa Unitária (1,14 e 1,21, respectivamente) e Massa Específica Aparente (2,44 e 2,64, respectivamente). Por outro lado, a Massa Específica apresenta resultados mais divergentes entre os três tipos de agregados. Considerando que este parâmetro desconsidera os vazios dos agregados, os resultados sugerem significativo aumento da porosidade dos agregados de argamassa e cerâmica, se comparados ao concreto. É esperado, desta forma, que os agregados mais porosos (Argamassa e Cerâmica) tendam a ser mais fragmentados pelo beneficiamento no jigge a ar, uma vez que o processo de expansão e retração do leito resulta em choques entre partículas.

4.1.1.4. Critério de Concentração

Os resultados da avaliação do Critério de Concentração (CC) entre os três tipos de agregados graúdos reciclados gerados são descritos na Tabela 5. Os resultados evidenciam um maior CC entre os agregados de Concreto e Cerâmica, com relação aos demais. O CC próximo de 1 sugere a maior dificuldade de separação entre os agregados graúdos reciclados de Argamassa e Concreto.

Tabela 5 - Critério de concentração dos agregados de RCD avaliados no estudo.

MATERIAIS	CC
Argamassa/Concreto	1,15
Argamassa/Cerâmico	1,17
Concreto/Cerâmico	1,34

Fonte: o Autor.

Desta forma, devido à baixa diferença entre a densidade dos 3 tipos de materiais que compõem os agregados graúdos reciclados gerados, é possível inferir que predominarão no processo de beneficiamento os comportamentos citados por Ambrós (2017), onde há a formação de uma camada inferior rica no componente mais denso (Concreto), uma camada superior abundante em agregados de densidade menos densos (Cerâmica), e uma camada intermediária composta da mistura dos 3 tipos de agregados graúdos reciclados gerados predominando, entretanto, os agregados de densidade intermediária (Argamassa).

Cazacliu et al. (2014) e Sampaio et al. (2016) que avaliaram a separação de concreto, gesso e cerâmica identificaram critério de concentração igual a 1,29, quando comparados os agregados de concreto/gesso. Estes autores atingiram concentrações de concreto na camada inferior superiores a 90%. Outras propriedades, entretanto, como a lamelaridade dos agregados de gesso e cerâmica, podem ter contribuídos para os resultados atingidos, e dificultam a comparação com os resultados deste trabalho pelo formato mais arredondado de dois dos três agregados que compõem este trabalho (argamassa e concreto).

4.1.2. Preparação dos agregados graúdos reciclados gerados para os testes no jigue a ar

A distribuição granulométrica dos agregados graúdos reciclados gerados é ajustada aos valores que atingem melhores resultados de segregação no jigue a ar, conforme sugerido por Ambrós (2017). Desta forma, os agregados são distribuídos em iguais percentuais (1:1:1) nas

faixas granulométricas 4,75/9,5 mm, 9,5/12,5 mm; e 12,5/19,1mm. A distribuição mássica dos agregados por tipo de material é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Distribuição granulométrica dos agregados graúdos reciclados gerados utilizados na avaliação da viabilidade técnica de beneficiamento via jigue a ar.

PENEIRAS	ARGAMASSA	CONCRETO	CERÂMICO	TOTAL	%
19,1 - 12,5	4,999	4,120	3,820	12,939	33
12,5 - 9,5	4,999	4,120	3,820	12,939	33
9,5 - 4,75	5,153	4,245	3,935	13,333	34
TOTAL	15,151	12,485	11,575	39,211	100

Fonte: o Autor.

4.1.3. Testes no jigue a ar

Um total de 9 testes são realizados até atingir os melhores resultados de concentração dos agregados graúdos reciclados de concreto na camada inferior (a camada de interesse). O Teste 6 apresenta o melhor resultado da concentração de agregados graúdos de concreto na camada inferior (63% em massa).

Os Teste 7, 8 e 9 são realizados com o propósito de concluir o processo de aferição dos parâmetros de operação do jigue a ar, permitindo confirmar sobre quais valores de Frequência e Tempo de Operação o equipamento atinge o ponto de inflexão da correlação *parâmetro x concentração* de agregados graúdos reciclados de concreto na camada inferior.

Considerando o mesmo critério, descrito no parágrafo anterior, o Teste 4 representa o ponto de inflexão para o parâmetro Taxa de Expansão. Este resultado evidencia a necessidade de implantação de uma Taxa de Expansão de 100%, conforme as características dos agregados graúdos reciclados gerados e do jigue a ar. O Teste 6 representa o ponto de inflexão da Frequência, atuando com 100 rpm, e do Tempo de Operação, de 120 segundos. Na Tabela 7 é possível visualizar os resultados dos sucessivos testes realizados e a concentração dos 3 tipos de agregados graúdos reciclados em cada camada.

A Taxa de expansão relativamente alta necessária para obter o melhor resultado está diretamente relacionada à propriedade geométrica dos agregados graúdos reciclados. Como pode ser visto na Tabela 7, concomitantemente ao aumento da concentração dos agregados graúdos de Concreto na camada inferior durante os primeiros 6 testes, houve um aumento na concentração do agregado cerâmico na camada superior. Com base nisso, e na observação do comportamento dos agregados no leito dentro do equipamento durante os testes, é possível afirmar que a lamelaridade mais significativa alta dos agregados Cerâmicos, conforme

resultados do índice de forma (4.1.1.2), exige uma taxa de expansão mais alta para ser deslocada para as camadas superiores do jigue ar. Assim, o uso do jigue a ar, além de possibilitar a concentração dos agregados graúdos de Concreto na camada inferior, também resulta na minimização da fração de agregado graúdo Cerâmico que, devido a sua característica geométrica lamelar, é indesejado na reutilização como AGR na produção de novos concretos.

Tabela 7 – Resultados dos testes do beneficiado gravimétrico dos agregados graúdos reciclados gerados com o uso do jigue a ar. Os resultados são descritos seguindo a ordem de execução dos testes, inicialmente variando a Taxa de expansão (T), seguido da Frequência de expansão (f) e por fim o Tempo de operação (t). Os resultados são expressos em percentual mássico dos agregados reciclados gerados de Argamassa (Ar), Concreto (Co) e Cerâmica (Ce) em cada camada do equipamento.

TESTE	PARÂMETROS	CAMADA INFERIOR (%)			CAMADA INTERMEDIÁRIA (%)			CAMADA SUPERIOR (%)		
		Ar	Co	Ce	Ar	Co	Ce	Ar	Co	Ce
1	f= 160cpm T= 70% t= 120s	39	30	31	38	32	30	29	46	25
2	f= 160cpm T= 80% t= 120s	30	46	24	38	36	26	34	21	45
3	f= 160cpm T= 90% t= 120s	33	55	12	40	28	32	21	10	69
4	f=160cpm T=100% t=120s	31	57	11	44	22	34	25	14	62
5	f= 120cpm T= 100% t= 120s	33	61	6	41	22	37	21	10	69
6	f= 100cpm T= 100% t= 120s	31	63	6	44	22	34	18	11	71
7	f= 80cpm T= 100% t= 120s	30	52	18	39	33	28	32	23	45
8	f= 100cpm T= 100% t= 90s	32	59	9	41	24	35	22	10	68
9	f= 100cpm T= 100% t= 150s	33	60	7	43	20	37	17	10	73

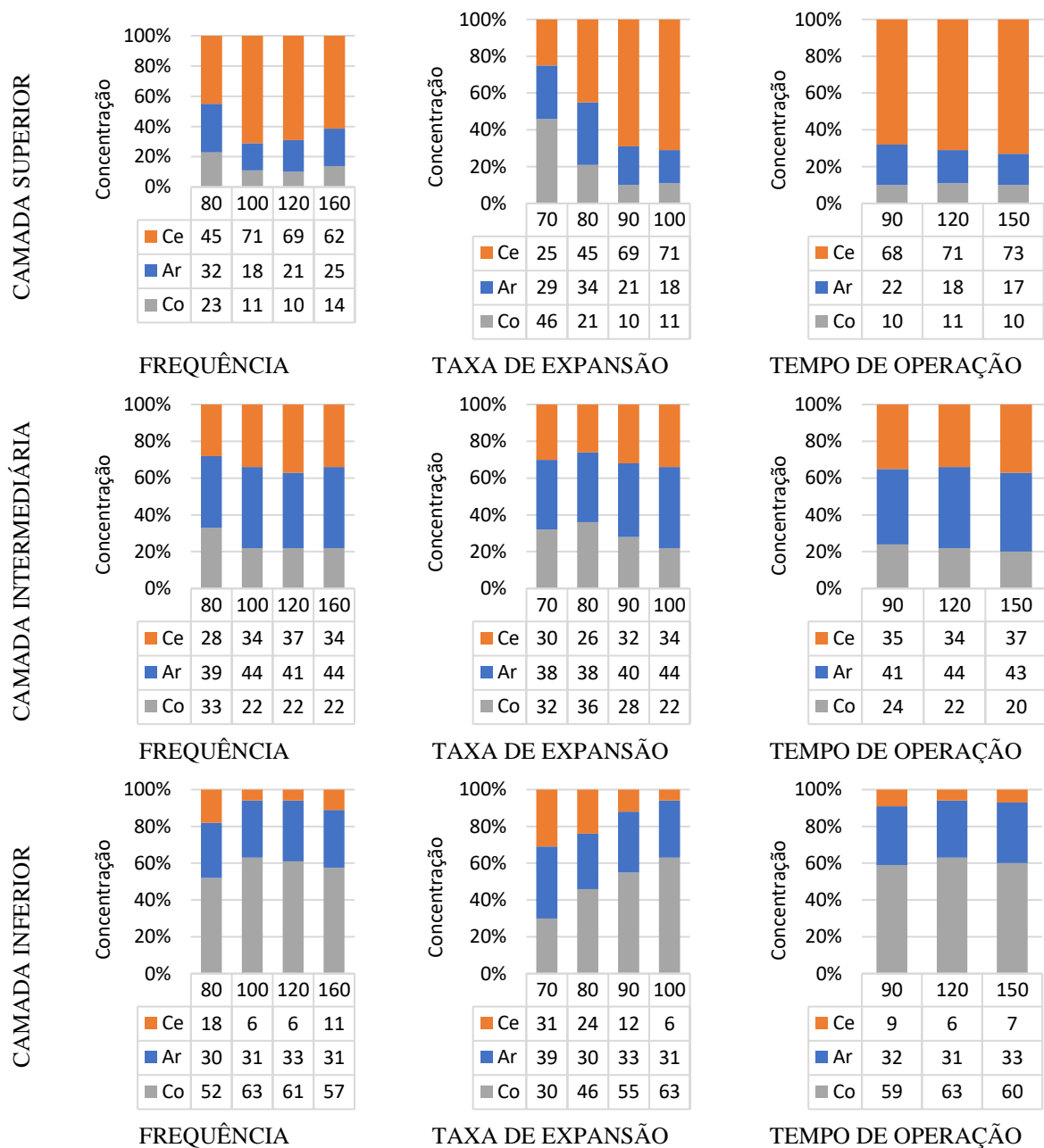
Fonte: o Autor.

A Figura 30 mostra a concentração dos agregados graúdos reciclados de Argamassa, Concreto e Cerâmica nas diferentes camadas de estratificação do jigue a ar utilizado nos testes. São apresentados nesta mesma Figura a variação das concentrações dos diferentes tipos de materiais conforme a busca pelos melhores parâmetros operacionais, Frequência de pulsação, Taxa de expansão e Tempo de operação do equipamento.

A variação da Frequência de expansão do leito de agregados, ou seja, o número de vezes que a válvula tipo borboleta que libera os fluxos de ar a períodos cíclicos é acionada, exige a aplicação de 100 rpm para atingir o seu melhor resultado de concentração da fração de concreto na camada inferior. Este parâmetro operacional tem os piores resultados da concentração dos agregados de concreto na camada inferior com o uso de frequência muito baixa (80 rpm) ou muito alta (160 rpm). Assim, os melhores resultados de separação foram observados para frequências intermediárias (entre 100 e 120 rpm). Esse comportamento corrobora com as condições básicas do processo de beneficiamento gravimétrico, uma vez que o uso de frequências muito baixas representa menor movimento do leito. Por outro lado, o uso de

frequências muito altas podem prejudicar a separação devido à rápida inversão no movimento das partículas (para cima ou para baixo) durante o ciclo de operação do equipamento (AMBRÓS, 2017) e assim intervenções excessivas de contrafluxos de agregados podem ocorrer (SAMPAIO e TAVARES, 2005).

Figura 30 – Relação dos parâmetros Frequência, Taxa de expansão e Tempo de operação com os resultados de concentrações dos agregados graúdos reciclados de Argamassa (Ar), Concreto (Co) e Cerâmica (Ce) nas camadas Superior, Intermediária e Inferior do jigue a ar.



Fonte: o Autor.

A Taxa de expansão do leito de agregados atinge os melhores resultados de

concentração da fração de agregados de concreto na camada inferior quando aplicado 100% do fluxo de ar, ou seja, 73 m³/min. conforme capacidade do equipamento utilizado nos testes. O resultado corrobora com Sampaio e Tavares (2005), uma vez que se for usado uma baixa Taxa de expansão do leito não haverá dispersão suficiente para permitir que os agregados se movam para o topo.

Os resultados obtidos confirmam uma maior influência da Taxa de expansão nos resultados da concentração dos agregados graúdos reciclados de Concreto na camada inferior do jigge a ar, se comparado aos demais parâmetros de operação do equipamento. Como pode ser confirmado na Figura 30, há um aumento significativo no conteúdo de agregados graúdos reciclados de Concreto na camada inferior (de 30 a 63% em massa) resultante do aumento na Taxa de expansão. Essa tendência também é resultado da influência da Taxa de expansão no aumento do conteúdo de agregados graúdos reciclados Cerâmicos na camada superior (de 25 a 71% em massa). Observa-se nos sucessivos ensaios que a lamelaridade dos agregados Cerâmicos exige maiores Taxas de expansão para que as mesmas ascendam no leito de agregado. Por outro lado, a variação da Taxa de expansão, bem como de outros parâmetros operacionais, tem pouco efeito na distribuição da argamassa nas 3 camadas utilizadas nos testes.

O Tempo de operação do jigge a ar utilizado nos testes tem o melhor resultado de concentração da fração de agregados graúdos reciclados de Concreto na camada inferior aos 120 segundos. Como pode ser visto na Figura 30 este parâmetro tem pouco efeito na alteração das frações dos três tipos de materiais que compõem a massa de agregados entre as camadas do leito de agregados avaliado. O Tempo de operação com o melhor resultado, entretanto, é igual aos resultados encontrados por Sampaio et al. (2016) e Ambrós et al. (2017). Assim, infere-se duas possibilidades: os 120 segundos de operação é, de fato, o tempo necessário aos melhores resultados de separação dos agregados reciclados com características do gerado no Brasil; ou este tempo representa o fim/reinício do fluxo convectivo do equipamento laboratorial.

São realizados 5 testes consecutivos, de maneira adicional, para medir o nível de confiança dos resultados do teste 6, o qual obteve o melhor resultado. Estes ensaios adicionais evidenciam um intervalo de confiança de 3%. Ou seja, os resultados da separação de agregados graúdos reciclados com características semelhantes ao gerado, sob as condições operacionais identificadas em um jigge a ar tem capacidade de concentração dos agregados graúdos reciclados de Concreto na camada inferior igual a 63% (± 2). Os resultados dos 5 testes de aferição são ilustrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados dos testes de aferição dos resultados de beneficiamento gravimétrico no jigue a ar dos agregados graúdos reciclados gerados. (T) Taxa de expansão; (f) Frequência de expansão; e (t) Tempo de operação. Resultados expressos em percentual mássico de Argamassa (Ar), Concreto (Co) e Cerâmica (Ce) nas camadas do equipamento

TESTE	PARÂMETROS	CAMADA INFERIOR (%)			CAMADA INTERMEDIÁRIA (%)			CAMADA SUPERIOR (%)		
		Ar	Co	Ce	Ar	Co	Ce	Ar	Co	Ce
10	f= 100cpm A=100% t= 120s	29	61	9	40	25	35	23	13	64
11	f= 100cpm T= 100% t= 120s	30	61	9	42	27	31	15	15	70
12	f= 100cpm T= 100% t= 120s	30	61	9	41	23	36	20	11	69
13	f= 100cpm T= 100% t= 120s	30	61	9	41	26	33	20	11	69
14	f= 100cpm T= 100% t= 120s	30	62	8	42	22	36	20	9	71

Fonte: o Autor.

O desenvolvimento das demais etapas, Avaliação Ambiental e Análise Econômica, tomam como referência a concentração de agregados reciclados de concreto na camada inferior do equipamento de 63%, melhor resultado obtido (Teste 6).

A análise da recuperação (Rec) dos agregados reciclados de concreto confirma o aumento da concentração dos agregados de concreto na camada inferior, atingindo o melhor resultado no teste 6. Os resultados da Recuperação se mostram mais sensíveis ao aumento da Taxa de expansão, sendo que a partir do teste 4, onde é dado início a variação da Frequência de expansão e do Tempo de operação, a Recuperação mostra-se menos sensível se comparado aos resultados dos primeiros testes.

Tabela 9 – Resultados da análise da Recuperação (Rec) dos testes do uso do jigue a ar no beneficiamento gravimétrico dos agregados reciclados de RCD.

TESTE	TESTE													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Rec (%)	10,0	15,3	18,3	19,0	20,3	21,0	17,3	19,6	20,0	20,3	20,3	20,3	20,3	20,6

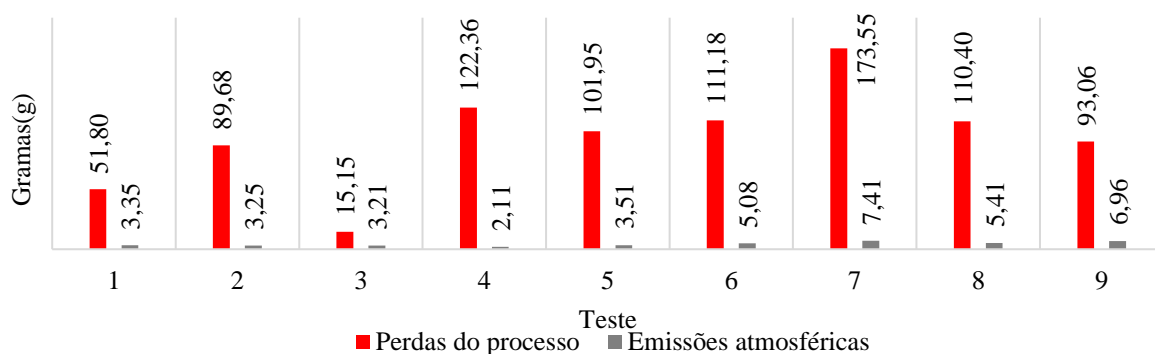
4.1.4. Perdas do processo e emissões atmosféricas

De maneira adicional aos ensaios que avaliam a viabilidade do uso do jigue a ar no beneficiamento gravimétrico dos agregados graúdos reciclados com características do gerado no Brasil, são mensuradas as perdas e emissões atmosféricas do uso do jigue a ar (Figura 31). Estes dados não são encontrados na literatura atual, e desta forma os resultados obtidos são pioneiros e podem auxiliar trabalhos futuros relacionados ao uso do equipamento com relação às questões tecnológicas, ambientais e/ou de saúde do trabalho.

As perdas totalizam pouco mais de 860 gramas, variam de 52 gramas a 173 gramas a

cada teste. Desta forma, considerando-se uma perda média de 97 gramas por teste. As perdas do processo são originadas principalmente nas etapas de homogeneização do material pré introduzido no jigue a ar, não sendo tão significativas no beneficiamento. Comparado à quantidade de material utilizado a cada amostragem, aproximadamente 39 kg, a perda média de material é pouco significativa ($\approx 0,25\%$).

Figura 31 – Gráfico ilustrando os valores de perdas e emissões atmosféricas do processo de beneficiamento com o jigue a ar dos agregados graúdos reciclados com características do gerado no Brasil.



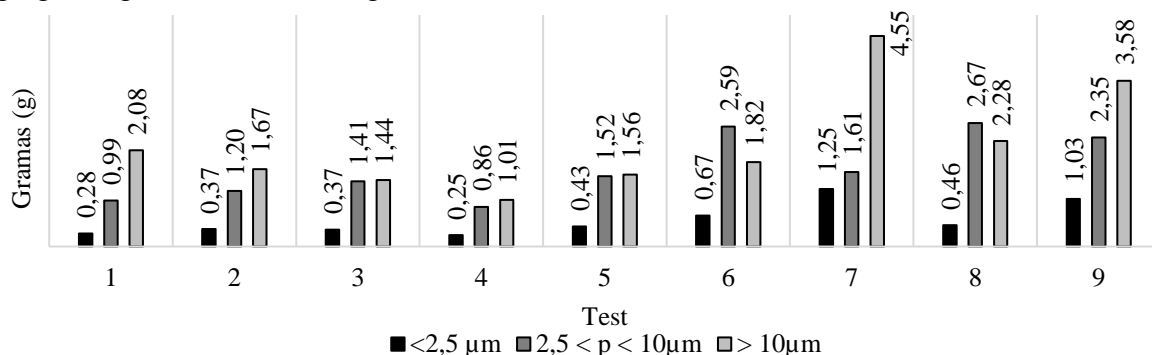
Fonte: o Autor.

As emissões atmosféricas são ainda menos expressivas. O valor total de material particulado coletado totaliza pouco mais de 40 gramas. Em média são coletadas 4,5 gramas por teste. O intervalo $<10\mu\text{m}$ corresponde ao diâmetro capaz de atingir o pulmão humano, e o intervalo $<2,5\mu\text{m}$ corresponde ao tamanho capaz de ser assimilado pelo organismo.

Como pode ser visto na Figura 32, predomina dentre os testes, a granulometria $>10\mu\text{m}$, que por vezes (testes 6 e 8) é superada pela fração $>2,5\mu\text{m}$ e $<10\mu\text{m}$. A granulometria $<2,5\mu\text{m}$ tem os menores valores encontrados. Esta fração, entretanto, é identificada em todos os testes e desta forma, se somada ao outro intervalo com partículas $<10\mu\text{m}$, evidencia a presença representativa de material particulado inalável emitido pelo processo de reciclagem dos agregados graúdos reciclados com características do gerado no Brasil.

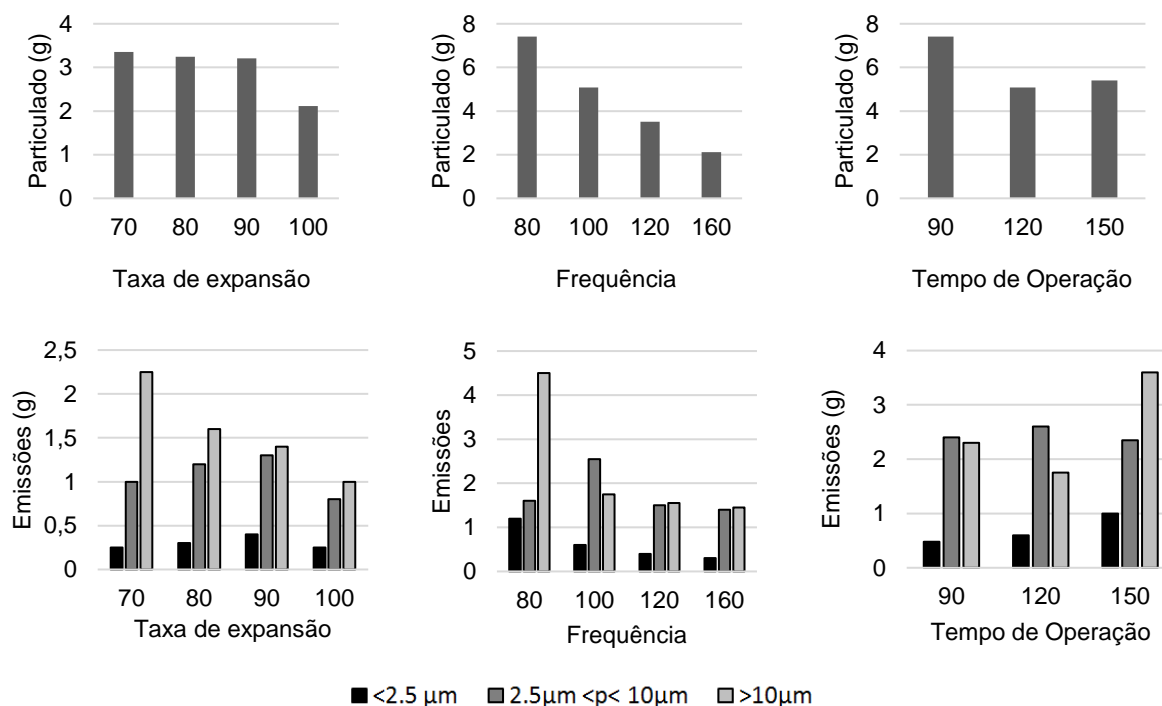
Além das características dos agregados graúdos reciclados gerados para representarem o RCD brasileiro, os parâmetros operacionais também tem relação com a quantidade de material particulado emitido a cada teste de beneficiamento gravimétrico no jigue a ar. A Figura 33 ilustra a relação entre os parâmetros operacionais do jigue a ar e os materiais particulados coletados.

Figura 32 – Distribuição granulométrica dos diferentes diâmetros de partículas das emissões atmosféricas coletadas em cada teste de beneficiamento gravimétrico com jigue a ar dos agregados graúdos reciclados gerados.



Fonte: o Autor.

Figura 33 - Relação de emissões atmosféricas por parâmetro operacional do gabarito de ar.



Fonte: o Autor.

É possível identificar que a quantidade de materiais particulados tem relação direta com alguns parâmetros operacionais, como Frequência e Taxa de expansão. A quantidade de materiais particulados diminui com o aumento da Taxa e Frequência de expansão. Essa diminuição deve-se principalmente à minimização da emissão de partículas com diâmetro superior a 10μm. Além de partículas com diâmetro > 10μm, aquelas com diâmetro <2,5μm também apresentam um padrão de redução associado ao aumento da frequência de expansão. A fração entre 2,5 e 10μm não exibiu um comportamento padrão em relação à frequência de

expansão do leito de agregados.

Se comparados os valores apresentados na Figura 31 com os testes em que houve aumento da Taxa de expansão (1,2,3, e 4) e a redução da Frequência (testes 4,5,6 e 7), é possível inferir que estes parâmetros tem maior influência no aumento da geração de agregados miúdos do que na produção de material particulado.

Como pode ser visto na Figura 9, como o diâmetro $<2,5 \mu\text{m}$, as partículas entre 2,5 e 10 μm têm uma relação com a variação do tempo. No entanto, enquanto o aumento de partículas $<2,5 \mu\text{m}$ acompanha o aumento no tempo, as partículas entre 2,5 e 10 μm diminuem. Assim, é possível inferir sobre uma possível razão inversa da taxa de expansão e da frequência com as partículas $>10\mu\text{m}$ e proporcional ao tempo de processamento com a emissão de partículas $<2,5\mu\text{m}$. Para o tempo de operação, nenhuma evidência de relação proporcional às emissões foi observada.

4.1.5. Análise da influência do beneficiamento gravimétrico dos agregados graúdos reciclados gerados

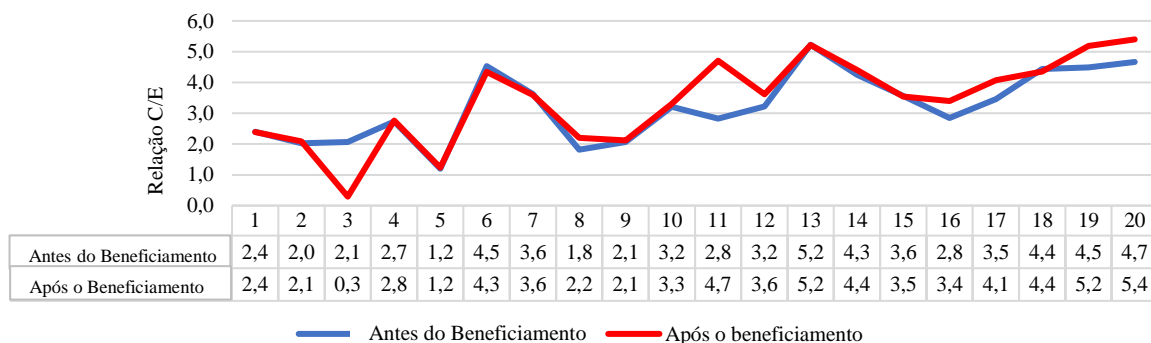
Ensaio são realizados para identificar a existência ou não de influência do jigue a ar nas propriedades dos agregados graúdos reciclados. Inicialmente é realizada análise da distribuição granulométrica dos agregados graúdos reciclados gerados. São avaliados a massa total dos agregados, por amostragem, após beneficiamento no jigue a ar, assim como, de maneira individual, as frações que compõem a camada inferior do equipamento ao final de cada teste. Esta fração corresponde ao AGRrc do processo de Reciclagem Proposto. Todas estas avaliações são comparadas aos resultados da distribuição granulométrica dos agregados previamente ao uso do jigue a ar. Desta forma, é possível avaliar a possibilidade de influência do processo nas propriedades dos agregados gerados. Os métodos de análise da distribuição granulométrica e forma dos agregados seguem as mesmas metodologias apresentadas no capítulo 3.1.1.

Pré-testes realizados, variando a composição dos agregados que compõem o RCD (Argamassa, Concreto e Cerâmica), sugerem uma maior perda de material quando utilizada maior fração de agregados cerâmico. Desta forma, o agregado graúdo reciclado Cerâmico é utilizado como indicador na análise de alteração da forma dos agregados reciclados pelo processo de beneficiamento gravimétrico no jigue a ar.

Vinte (20) partículas de agregados cerâmicos são identificadas. Após sucessivos ciclos

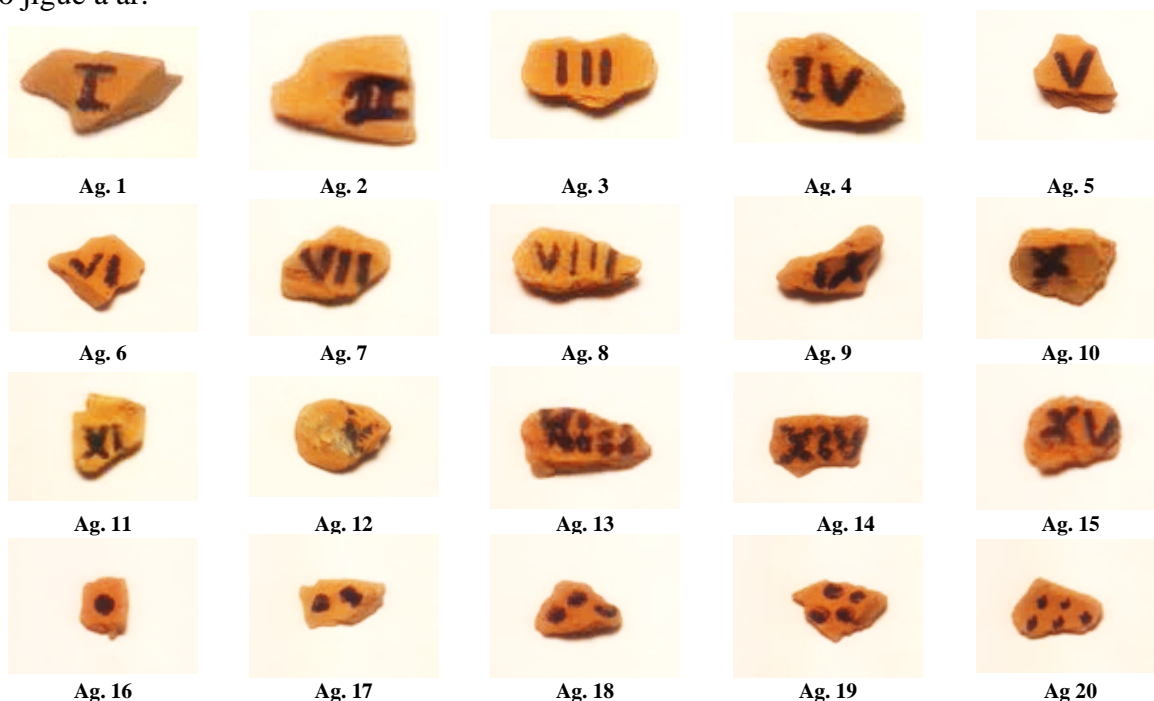
de jigagem suas medidas de comprimento e espessura são avaliadas e comparadas as obtidas previamente ao uso do equipamento. Os resultados revelam pouca variação na forma dos agregados (Figura 34, Figura 35 e Figura 36), permitindo concluir sobre a inexistência de influência do equipamento sobre esta propriedade dos agregados.

Figura 34 – Fator de forma dos agregados de referência na avaliação da alteração da forma pelo uso do jigge a ar no beneficiamento gravimétrico dos RCD.



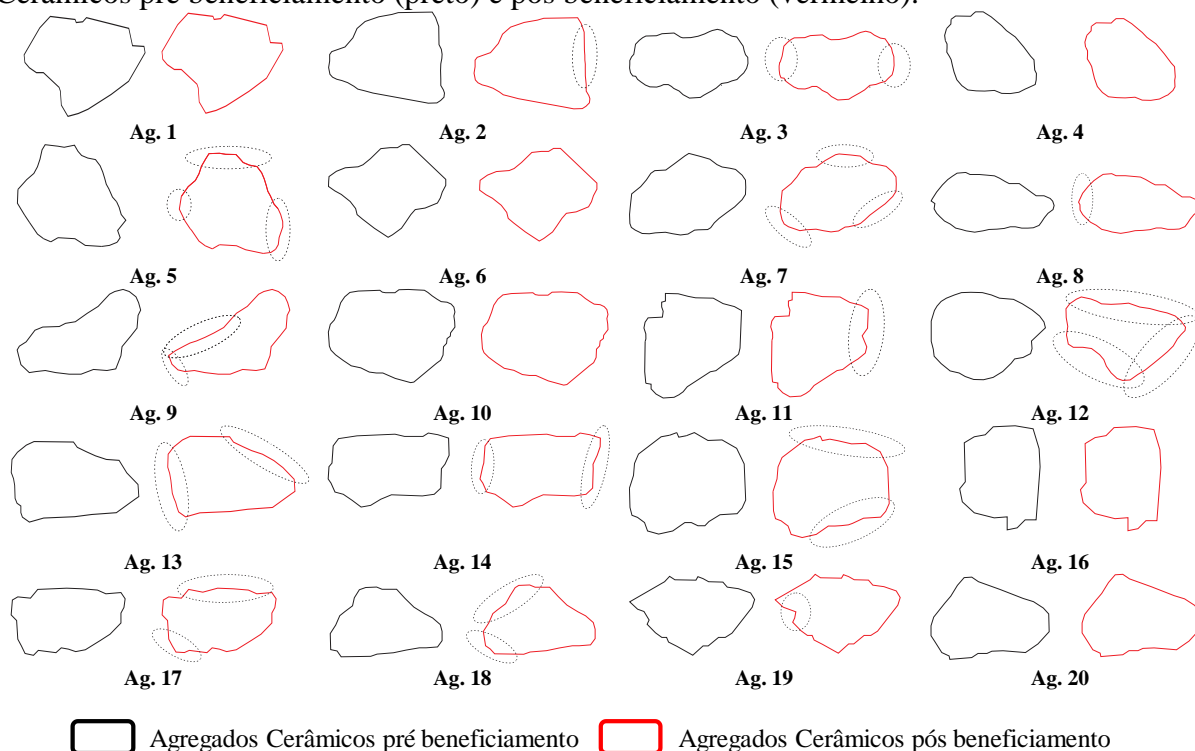
Fonte: o Autor.

Figura 35 – Agregados graúdos reciclados Cerâmicos utilizados como indicadores da possibilidade de alteração da forma dos agregados reciclados pelo beneficiamento gravimétrico no jigge a ar.



Fonte: o Autor.

Figura 36 – Análise qualitativa dos agregados reciclados Cerâmicos indicadores da alteração da forma pelo processo de beneficiamento gravimétrico. Ilustração dos agregados reciclados Cerâmicos pré beneficiamento (preto) e pós beneficiamento (vermelho).



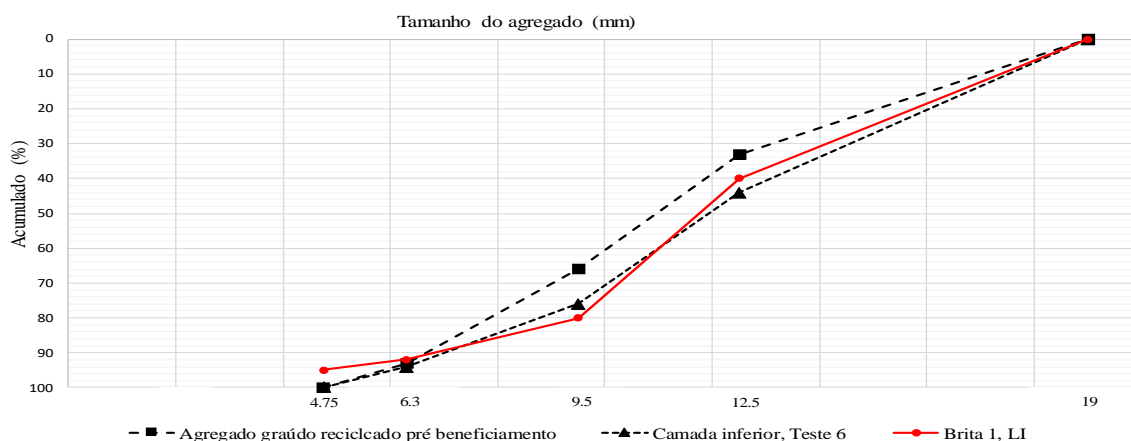
Fonte: o Autor.

A distribuição granulométrica dos agregados graúdos reciclados gerados apresenta resultados próximos ao do agregado natural (Brita 1). Da mesma forma, os agregados da camada inferior do teste 6, com melhor resultado de concentração dos agregados reciclados de Concreto, não apresentam alteração significativa na distribuição granulométrica. Considerando os resultados da análise da variação da distribuição granulométrica e da forma dos agregados graúdos reciclados gerados, é possível afirmar sobre a pouca, ou inexistente, influência do jigue a ar nestas propriedades dos agregados reciclados ainda que a dinâmica do seu processo resulte em sucessivos colisões entre partículas. A comparação das distribuições granulométricas é ilustrada na Figura 37.

Os agregados graúdos reciclados da Reciclagem Atual e Proposta possuem características distintas do seu produto principal em termos de composição. Além da necessidade da avaliação prévia da possibilidade do uso dos agregados reciclados em substituição ao AGN, as etapas de avaliação ambiental e análise econômica carecem de informações complementares para alimentação dos seus dados de entrada. Desta forma, são definidos os balanços de massa de ambos os métodos de Reciclagem (RA e RP), conforme os seus respectivos agregados graúdos reciclados produzidos. Os dados da etapa de Análise da

Viabilidade Técnica do Beneficiamento Gravimétrico (3.1) são imprescindíveis ao desenvolvimento do balanço de massa (Figura 38).

Figura 37 - Comparação da distribuição granulométrica dos agregados antes do beneficiamento no jigue a ar e na camada inferior do teste 6.



Fonte: o Autor.

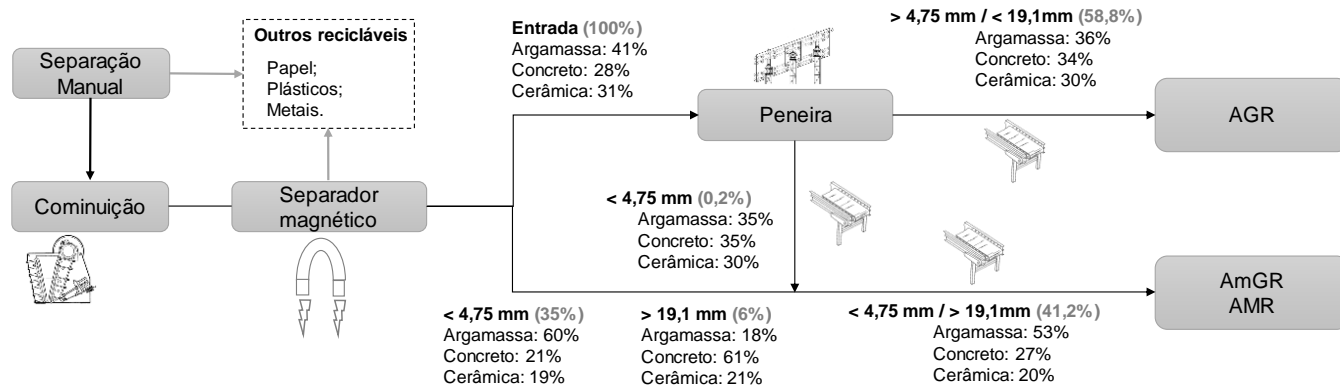
Os balanços de massa tomam como base resultados de entrada/saída/perdas do processo de geração e caracterização dos agregados graúdos reciclados gerados, assim como dos testes de uso do jigue a ar. O balanço de massa do método de Reciclagem Atual do RCD brasileiro evidencia a produção de agregados graúdos reciclados (produto principal, AGR) compostos em sua maioria por agregados de Argamassa (36%), seguido de agregados de Concreto (34%) e agregados Cerâmicos (30%).

Se comparadas as concentrações de cada tipo de material ao final do balanço de massa à composição do agregado gráúdo de entrada (Argamassa: 41%; Concreto: 30%; e Cerâmica: 31%) é possível confirmar a contribuição do processo de peneiramento na concentração de parte dos agregados graúdos reciclados de concreto ($\approx 6\%$ maior) e a redução de parte dos agregados reciclados Cerâmicos ($\approx 1\%$ menor), ainda que o peneiramento tenha como única finalidade a seleção da distribuição granulométrica. O processo de peneiramento também é pouco destacado pela geração de agregados miúdos reciclados – AMR ($< 4,75\text{mm}$), resultando em apenas $\approx 0,2\%$ desta granulometria, com relação à massa inicial.

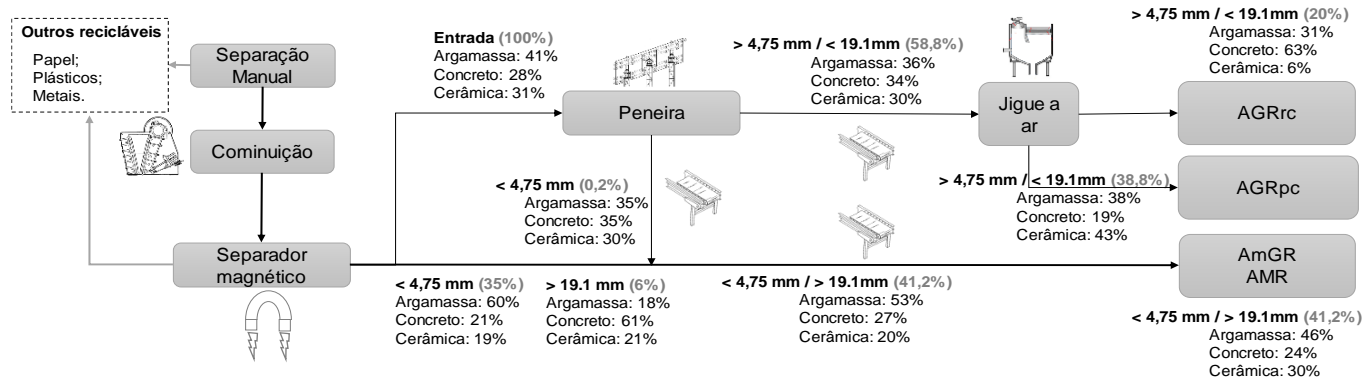
O processo de Reciclagem Proposto para o RCD brasileiro, que prevê o uso do jigue a ar, além da produção de Agregados muito Graúdos Reciclados (AmGR, $> 19,1\text{ mm}$) e AMR, como no processo de Reciclagem Atual, resulta em um produto principal, o agregado gráúdo reciclado rico em concreto (AGRrc), e um coproduto, o agregado gráúdo reciclado pobre em concreto (AGRpc).

Figura 38 - Balanço de massa realizado em escala laboratorial para o agregado reciclado brasileiro: granulometria (em negrito); cada tipo de taxa de material (em preto); e porcentagem do RCD recebido (em cinza). Composição do RCD baseado em Scoot Hood (2006). A perda ou alteração da composição dos resíduos nas correias transportadoras não é considerada.

RECICLAGEM ATUAL



RECICLAGEM PROPOSTA



Esteira transportadora
Perdas ≈ 0,05%

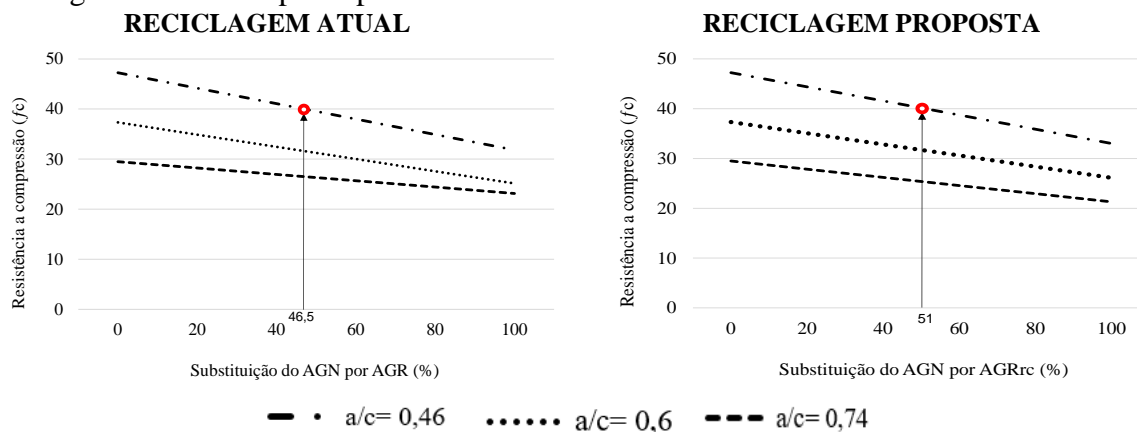
Fonte: o Autor.

A composição do AGRrc e AGRpc diferem principalmente nas concentrações de Concreto e Cerâmicos. Ao passo que o AGRrc é composto predominantemente por agregados graúdos reciclados de Concreto (63%), nos AGRpc os agregados graúdos reciclados Cerâmicos representam a maior fração (43%). Desta forma é confirmado dois benefícios previamente identificados nos testes de uso do jigge a ar, a concentração dos agregados graúdos reciclados de Concreto e a remoção dos agregados graúdos reciclados Cerâmicos, que está desconforme com a norma NBR 7.211 (ABNT, 2009c), especifica o limite da relação comprimento/espessura < 3mm.

Assim, considerando a composição dos agregados graúdos reciclados de Argamassa, Cerâmica e Concreto do AGR, na Reciclagem Atual, e do AGRrc, na Reciclagem Proposta, são avaliados os percentuais de substituição do agregado natural pelos produtos da reciclagem Atual e Proposta, utilizando da Equação 8, proposta por Cabral (2007) sendo mantido resistências a compressão de um novo hipotético concreto em 40 MPa. Os resultados sugerem melhores valores de resistência à compressão na produção de um novo concreto adotando a relação água/cimento (a/c) 0,46, se comparados as demais relações (0,6 e 0,74), como pode ser visto na Figura 39.

Os percentuais de substituição do AGN por agregados graúdos reciclados divergem entre os processos de reciclagem Atual e Proposto, na produção de concretos com resistência à compressão (f_c) de 40 MPa. Ao passo que os AGR, produzido no processo de Reciclagem Atual, pode substituir 46,5% dos AGN, é previsto que o processo de Reciclagem Proposto, com a substituição do AGN por AGRrc, atinge o mesmo valor de resistência à compressão com uma substituição de 51%.

Figura 39 – Resistência a compressão prevista conforme a Equação de Cabral (2007) na produção de concretos contendo agregados graúdos reciclados produzidos nos processos de Reciclagem Atual e Proposto para o Brasil.



Fonte: o Autor.

Outros coprodutos dos Cenários de reciclagem do RCD brasileiro também possuem mercado, como os AMR, AmGR, ambos com composições equivalentes nos métodos de Reciclagem Atual e Proposta. O AGRpc (Argamassa 38%; Concreto 19%; Cerâmica 43%) tem sua composição aplicada na Equação 8, considerando diferentes percentuais de substituição do AGN. Os resultados evidenciam a possibilidade de uso dos AGRpc atingindo resistência à compressão de 40 MPa quando da substituição de 46,5% do AGN com relação água/cimento igual a 0,46.

A substituição dos AMN por AMR também é avaliada aplicando a Equação 8 proposta por Cabral (2007). Nestas simulações são avaliadas somente a substituição da fração miúdo, sendo considerada a produção de concretos com 40 MPa com a relação água/cimento 0,46. Os resultados revelam a possibilidade de utilização equivalente em ambos os processos avaliados (RA e RP), uma vez que, conforme o balanço de massa realizado, as composições do AMR são iguais (Argamassa 60%; Concreto 21%; Cerâmica 19%). Conforme os critérios adotados, é possível substituir 100% do AMN por AMR na produção de concreto com o desempenho desejado (40 MPa).

Assim, os produtos de referência e os AMR de ambos os Cenários de reciclagem de RCD são passíveis de aplicação na substituição aos agregados naturais das suas respectivas granulometrias, de maneira individual, produzir um novo concreto com resistência à compressão a valores comerciais. O outro coproduto de ambos os processos, o AmGR que representa 6% da massa inicial do balanço de massa, apesar de não ser passível de uso na produção de um novo concreto, possui mercado marginal em usos menos nobres, como nivelamento de terrenos, manutenção de estradas, entre outros.

4.2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE AGREGADO GRAÚDO RECICLADO BRASILEIRO

4.2.1. Inventário do Ciclo de Vida

Considerando o sistema de produto dos processos de Reciclagem Atual e Proposta, ilustrados na Figura 24, são realizadas as adaptações do *dataset* “*treatment of waste concrete gravel, sorting plant-CH*”. Assim, são gerados *datasets* dos processos denominados Reciclagem Atual (RA) e Reciclagem Proposta (RP) considerando a abordagem de impacto evitado.

Inicialmente, um fluxo sem impactos ambientais associados (*undefined*), é incluído para representar a quantidade necessária de RCD para a produção de 1 kg de agregado, chamada “*Construction/Demolition waste*”, que representa os resíduos de processos como construção, reforma e demolição. O quantitativo desta entrada é definido conforme o balanço de massa de cada processo de reciclagem.

A entrada "*market for diesel, burned in building machine*" tem seu valor alterado, uma vez que, assim como "*market for excavation, hydraulic digger*", que é excluído, se refere à etapa de demolição. Assim, "*market for diesel, burned in building machine*" é mantido, representando, entretanto, o consumo médio de diesel pelo retroescavadeira que opera na planta de reciclagem. O valor médio de consumo de diesel é disponibilizado pela planta de reciclagem do RCD visitada no município de Porto Alegre-RS.

O fluxo de entrada que representa o consumo de energia elétrica é alterado, para representar a matriz energética brasileira. É adotado fluxo de entrada chamado "*electricity, low voltage*" (BR), disponível na base Ecoinvent 3.4. O consumo de energia dos equipamentos é definido de acordo como a demanda a ser beneficiada, identificada no balanço de massa, e o consumo em kWh/tonelada disponibilizado por Di Maria et al. (2018).

Os tipos e quantidades de equipamentos que compõem a planta de reciclagem são definidos de acordo com a quantidade de RCD prevista a ser processada. A produção mensal considerada adota a capacidade de produção da maioria das plantas de reciclagem no Brasil, 10.000 m³/mês (ABRECON, 2015), considerando a massa específica identificada no subitem 3.1.1, Geração e Caracterização dos Agregados de RCD, ou seja, 10.850 toneladas/mês.

Os valores de distância média de coleta do RCD até a planta de reciclagem são disponibilizados pela planta de reciclagem do RCD de Porto Alegre-RS, correspondendo a 30 km. São mantidas as entradas e valores da construção da planta de reciclagem (“*Sorting facility construction*”). A emissão de material particulado (Particulates <2,5µm; < 10µm; e >2.5µm-<10µm) foi acrescida pelo quantitativo médio por tonelada processada, identificada em laboratório. Os valores, por serem muito pequenos, não alteram o valor disponível no *dataset* de origem.

O fluxo de entrada "*Waste concrete gravel*" é mantido, representando o AGR, na Reciclagem Atual, e o AGRrc, na Reciclagem Proposta. Da mesma forma, o fluxo de entrada "*inert waste*" é mantido, representando o AmGR e o AMR na Reciclagem Atual e AmGR, AMR e AGRpc na Reciclagem Proposta. Os valores das entradas "*Waste concrete gravel*" e "*market for inert waste*" são definidos de acordo com o balanço de massa, de cada processo avaliado.

Como descrito no capítulo 3.2.1, sobre as fronteiras do sistema, é considerado o modelo de sistema Atribucional com a abordagem de impacto líquido evitado, com a expansão do sistema englobando o impacto evitado da produção do AGN e AMN. O dado da produção de AGN utilizado é apresentado em 3.2.2, sendo aplicado somente na RP considerando a possibilidade de substituição deste pelo coproduto do seu processo, o AGRpc. Da mesma forma, dado de entrada referente à produção de AMN é incluído nos *datasets* dos métodos de Reciclagem Atual e Proposto, considerando a possibilidade de uso do AMR.

É adotado o *dataset* “*Sand quarry operation, extraction from river bed – BR*”, referente à extração de areia em leito de rio, como ocorre no município de Porto Alegre-RS disponível Moraga et al. (2018). O *dataset* foi adaptado, os *providers* que alimentam os fluxos, no *software* Open LCA, são da base Ecoinvent v. 3.4.

Os percentuais de substituição do AGN pelo agregado graúdo reciclado e do AMN pelo AMR são definidos conforme a Equação 8, de Cabral (2007). Os resultados estão disponíveis no subcapítulo 4.1.5, Análise da influência do beneficiamento gravimétrico. Nos métodos de Reciclagem Proposto é previsto substituição de 46,5% do agregado graúdo natural por AGRpc. As substituições do AMN por AMR são equivalentes em ambos os processos de Reciclagem avaliados, igual a 100%.

A adaptação do processo “*treatment of waste concrete gravel, sorting plant*” e os motivos para inclusão/exclusão/alteração das suas entrada e saídas nos novos *datasets* criados para representar os processos de Reciclagem Atual e Proposto estão disponíveis na Tabela 10.

Tabela 10 – Inventário dos dados de entrada e saída dos *datasets* criados para representarem os processos de Reciclagem Atual (RA) e Proposta (RP) para os RCD brasileiros. *Dataset* de origem, *treatment of waste concrete gravel, sorting plant-CH*.

Entrada/saída original	Entrada/saída adaptado	RA	RP	Unid.	Comentários
		Quant.	Quant.		
Dados de entrada					
Incluído	<i>Construction/Demolition waste (undefined)</i>	1,7085	5,1256	kg	Quantidade necessária para a produção de 1kg de agregado graúdo. Valor definido conforme características dos agregados de RCD brasileiro (3.1.1) e balanço de massa.
<i>Market for diesel, burned in building machine, U – GLO</i>	Mantido	6,3E-4	1,9E-3	J ¹¹	O dado de entrada no <i>dataset</i> de origem se refere ao consumo de diesel da demolição (DOKA, 2003). O valor é alterado para o consumo de diesel da retroescavadeira. Dado fornecido pela planta local.
<i>Market for electricity, low voltage, U – CH</i>	<i>electricity voltage transformation from medium to low voltage, S – BR</i>	8,1E-4	2,72E-3	kWh	O consumo de energia da planta é definido conforme o balanço de massa e o consumo de energia/tonelada disponibilizado por Di Maria et al. (2018). É considerado na RA: triturador, peneira, três correias transportadoras e separador magnético. Na RP: triturador, peneira, quatro correias transportadoras, separador magnético e jigue a ar.
<i>Market for excavation, hydraulic digger, U – GLO</i>	Excluído	5.56E-4	-	m ³	De acordo com o manual Ecoinvent, refere-se ao processo de demolição. Dado excluído por estar fora das fronteiras do sistema em estudo.
<i>Sorting facility construction, for construction waste, U – CH</i>	Mantido	1,0E-10	1,0E-10	Item(s)	Valor mantido, conforme dado de entrada do <i>dataset</i> “ <i>treatment of waste concrete gravel, sorting plant-CH</i> ”.
Incluído	<i>treatment of municipal solid waste, sanitary landfill, S – RoW</i>	4,27E-5	1,28E-4	kg	Refere-se a outros resíduos, misturados com RCD, com características semelhantes aos resíduos domiciliares. Dados definidos conforme percentuais disponibilizados pela planta local.
Incluído	<i>transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3, S – RoW</i>	0,6	0,6	t*km	Valor correspondente a relação fixa da distância média de coleta de RCD, 30 km. Dado disponibilizado pela planta local.
Incluído	<i>Produção de AGN</i>	-	- 1,95	kg	Dado disponível no item 3.2.2 deste trabalho.
Incluído	<i>Sand quarry operation, extraction from river bed - BR</i>	- 0,6	- 1,75	kg	Dado disponível na base Ecoinvent para a produção brasileira de agregado miúdo natural (AMN), a areia. Valor definido conforme percentual de AMR, extraído do balanço de massa.
Dados de saída					
<i>Particulates, <2.5 um</i>	Mantido	9,76E-6	9,76E-6	kg	Valor mantido, conforme dado “ <i>treatment of waste concrete gravel, sorting plant-CH</i> ”.
<i>Particulates, <10 um</i>	Mantido	4,91E-5	4,91E-5	kg	Valor mantido, conforme dado “ <i>treatment of waste concrete gravel, sorting plant-CH</i> ”.
<i>Particulates, >2.5 um, and <10 um</i>	Mantido	3,72E-5	3,72E-5	kg	Valor mantido, conforme dado “ <i>treatment of waste concrete gravel, sorting plant-CH</i> ”.
<i>Market for inert waste, U – CH</i>	<i>market for waste concrete, S – RoW</i>	0,10	2,05	kg	Os resíduos inertes disponíveis na base Ecoinvent refere-se a um resíduo genérico, logo optou-se pela sua troca. Dado refere-se aos AmGR na Reciclagem Atual e, além destes, ao AGRpc na Reciclagem Proposta. Valores definidos conforme soma dos percentuais das frações, extraído do balanço de massa.
<i>Waste concrete gravel</i>	Mantido	-1,0	-1,0	kg	Agregado graúdo reciclado.
Incluído	<i>Waste paper, unsorted</i>	8,54E-5	2,56E-4	kg	Valor estimado para os resíduos de papel, plástico e metal, respectivamente misturados com o RCD. Dados definidos conforme percentuais disponibilizados pela planta local.
Incluído	<i>Waste plastic, mixture</i>	1,28E-4	3,84E-4	kg	
Incluído	<i>Waste bulk iron, excluding reinforcement</i>	1,71E-4	5,13E-4	kg	

Fonte: o Autor.

¹¹ Considerando o 0,848 tEP/m³; 1 tEP (Brasil) = 45,2 x 10⁻³ TJ; tera-joule = 10¹² J;

4.2.2. Avaliação do impacto do ciclo de vida

Os resultados da AICV da produção de agregados graúdos reciclados de RCD, nos processos de Reciclagem Atual (RA) e Reciclagem Proposta (RP), evidenciam contribuições mais significativas do Transporte, dentre as entradas que compõe o sistema de produto de ambos os processos avaliados. Na Reciclagem Atual, o Transporte só não tem a maior contribuição no indicador FAETP. Já na Reciclagem Proposta, com maior demanda de RCD para a produção de 1kg de agregado graúdo reciclado rico em concreto (AGRrc), conforme balanço de massa, outras entradas passam a ter incremento das suas contribuições, como o consumo de Eletricidade, disposição em Aterro e a estrutura da Planta de reciclagem.

O consumo de Eletricidade e a disposição em Aterro, apesar de não representarem contribuições significativas na maioria dos indicadores ambientais avaliados em ambos os cenários de reciclagem, têm suas maiores contribuições na Ecotoxicidade Terrestre, Oxidação Fotoquímica, Toxicidade Humana, Ecotoxicidade em água salgada e Ecotoxicidade de água doce, este último com a maior representação dentre os 3 indicadores. Contribuições da gestão do RCD para a Ecotoxicidade na água são destacadas por Butera et al. (2015). Estes autores correlacionam os valores do indicador ao RCD pela possibilidade de lixiviação de elementos presentes neste tipo de agregados. De maneira análoga, a maior demanda do Aterro sanitário no cenário RP, correlaciona lixiviações e Ecotoxicidade de água, atingindo assim os resultados obtidos.

A Planta de reciclagem, processo que representa a estrutura média de uma planta, tem suas contribuições restritas a percentuais pequenos, ainda que superiores a outros dados de entrada. No método de Reciclagem Atual, esta entrada tem maior representatividade no indicador Ecotoxicidade de água doce e Oxidação Fotoquímica. No método de Reciclagem Proposta, entretanto, a Planta de reciclagem tem suas contribuições aumentadas, de maneira mais pronunciada, em indicadores como Depleção de recursos abióticos – elementos, Toxicidade Humana, Ecotoxicidade em água salgada, Oxidação fotoquímica e Ecotoxicidade terrestre. Estes resultados refletem a demanda dos processos de produção dos metais (ferro, bronze, alumínio, latão e outros) que compõem a estrutura da planta de reciclagem, e os impactos ambientais das emissões atmosféricas da produção dos mesmos.

Se comparado à produção de agregado graúdo natural (AGN) (Tabela 11), os impactos ambientais do agregado graúdo reciclado (RA e RP) são mais baixos na maioria dos indicadores

avaliados. Somente os indicadores GWP, DAR-f e ODP para processos de reciclagem têm um impacto maior que a produção de AGN, principalmente devido ao transporte.

Embora a expansão do sistema inclua a produção de agregados graúdos e miúdos naturais e seus impactos evitados, o Transporte contribui com percentuais expressivos em todos indicadores. Em GWP, DAR-f, Potencial de Acidificação e outros, por exemplo, o transporte excede 90% das contribuições. Esses resultados corroboram com Marinkovic et al. (2010), Coelho e de Brito (2013), Knoeri et al. (2013), Turk et al. (2015) e Faleschini et al. (2016), que destacam o transporte como principal fonte de impactos ambientais da reciclagem da RCD.

Tabela 11 – Resultados da avaliação ambiental da produção de agregado graúdo reciclado dos processos de Reciclagem Atual (RA) e Proposta (RP) considerando a expansão do sistema com a inclusão dos impactos evitados da substituição parcial dos AGN e AMN pelos coprodutos de cada processo de reciclagem.

CATEGORIAS DE IMPACTO	RA	RP	AGN
AP (kg SO ₂ eq.)	2,00E-05	-7,33E-06	3,39E-05
GWP 100 (kg CO ₂ eq.)	5,31E-03	1,03E-02	2,76E-03
DAR-e (kg antimônio eq.)	6,75E-09	-1,65E-08	1,84E-08
DAR-f (MJ)	6,45E-02	1,41E-01	2,49E-02
EP (kg PO ⁻⁴ eq.)	9,73E-06	8,97E-06	1,02E-05
FAETP doce (kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	3,73E-03	8,40E-03	1,42E-03
HTP (kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	2,27E-03	2,78E-04	3,26E-03
MAETP (kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	3,03E+00	8,08E+01	4,17E+00
ODP (kg CFC-11 eq.)	7,81E-10	1,80E-09	2,49E-10
PO (kg etileno eq.)	1,03E-06	7,63E-07	1,17E-06
TETP (kg 1,4-diclorobenzeno eq.)	1,51E-05	-8,53E-05	6,67E-05

AP: Potencial de Acidificação; **ODP:** Depleção da Camada de Ozônio; **DAR-e:** Depleção de recursos abióticos – elementos; **DAR-f:** Depleção de recursos abióticos – combustíveis fósseis; **FAETP:** Ecotoxicidade de água doce; **MAETP:** Ecotoxicidade de água salgada; **TETP:** Ecotoxicidade terrestre; **EP:** Eutrofização; **GWP:** Mudanças Climáticas; **PO:** Oxidação fotoquímica; e **HTP:** Toxicidade humana.

Fonte: o Autor.

Diferentemente dos processos de reciclagem, a produção de agregados graúdos naturais (AGN) tem contribuições distribuídas em um número maior de estágios que o processo de reciclagem. O processo de detonação, por exemplo, tem contribuições mais significativas em AP (65%), EP (54%), MAETP (31%) e PO (21%). O estágio Infraestrutura representa 83%, 75%, 74%, 59%, 49%, 22% nas categorias DAR-e, TETP, HTP, FAETP, MAETP e EP, respectivamente. Silgado et al (2018) descreve o processo de detonação como uma das principais fontes de impacto na produção da AGN.

A eletricidade, etapa pouco significativa nas contribuições dos impactos ambientais nos processos de reciclagem, atinge frações importantes nos indicadores GWP (53%), PO (47%), FAETP (30%), TETP (20%) e MAETP na produção de AGN. As categorias de impacto ODP

e DAR-f são as menos significativas na produção deste tipo de agregado.

O impacto evitado relacionado à não extração de agregados naturais fornece contribuições significativas no RA e no RP, minimizando os potenciais impactos de ambos os processos. A produção de transporte e agregados naturais representa mais de 90% dos impactos ambientais totais nos dois modelos (RA e RP), como pode ser visto na Figura 3. Assim, a participação dos impactos ambientais de outros insumos, como “*diesel, burned in building machine*” e “*sorting facility construction, for construction waste*”, representa contribuições de baixo impacto ambiental.

O uso da abordagem Atribucional e a expansão do sistema, com a abordagem de impacto evitado, minimizam significativamente os resultados para FAETP, MAETP e TETP no RP, principalmente por gerar maior quantidade de subprodutos (agregados miúdos reciclados e agregados graúdos reciclados pobres em concreto). O impacto evitado pelo consumo desnecessário de diesel para a dragagem de agregados miúdos naturais minimiza uma porcentagem significativa dos impactos ambientais.

As longas distâncias de transporte para a coleta de RCD resultam em significativas contribuições de impactos ambientais para RA e RP. Embora a expansão do sistema resulte em minimização de impactos ambientais, ainda há participação significativa do Transporte nos dois cenários de Reciclagem (RA e RP). Assim, é possível afirmar que o processo mais significativo da reciclagem de RCD no Brasil é o transporte. Essa afirmação corrobora com Butera et al. (2015) e Di Maria et al. (2018), que mesmo adotando o impacto evitado, também encontram no Transporte uma das principais fontes de impactos ambientais do processo de reciclagem de RCD.

De modo geral, os impactos da AGN são principalmente resultados das etapas de detonação, consumo de energia e infraestrutura da planta de processamento. Indicadores como DAE-e, MAETP, FAETP e TETP estão entre os que apresentam os maiores impactos ambientais da AGN. Os impactos ambientais dos indicadores TETP, inclusive, são os únicos maiores que os dois modelos de reciclagem (RA e RP), principalmente devido aos impactos relacionados à Infraestrutura, reflexo da demanda de metais por sua composição.

Os agregados produzidos através da RA e RP têm impactos ambientais maiores que o AGN em DAR-f, GWP e ODP. Esses indicadores aumentam nos processos de reciclagem, principalmente devido aos dados de transporte. Categorias importantes para o processo de reciclagem de RCD, como GWP, são destacadas por Sandin et al. (2014), Ghisellini et al. (2018) e Yazdanbakhsh et al. (2018).

Figura 40 - Comparação dos resultados da avaliação dos impactos ambientais dos processos de Reciclagem Atual (RA) e Proposto (RP) para o RCD brasileiro. Os resultados tomam como base a produção de 1kg de agregado graúdo reciclado. Os valores negativos expressos no gráfico representam o impacto evitado pela substituição parcial dos AGN e AMN pelos produtos de referência e coprodutos de cada processo de reciclagem.

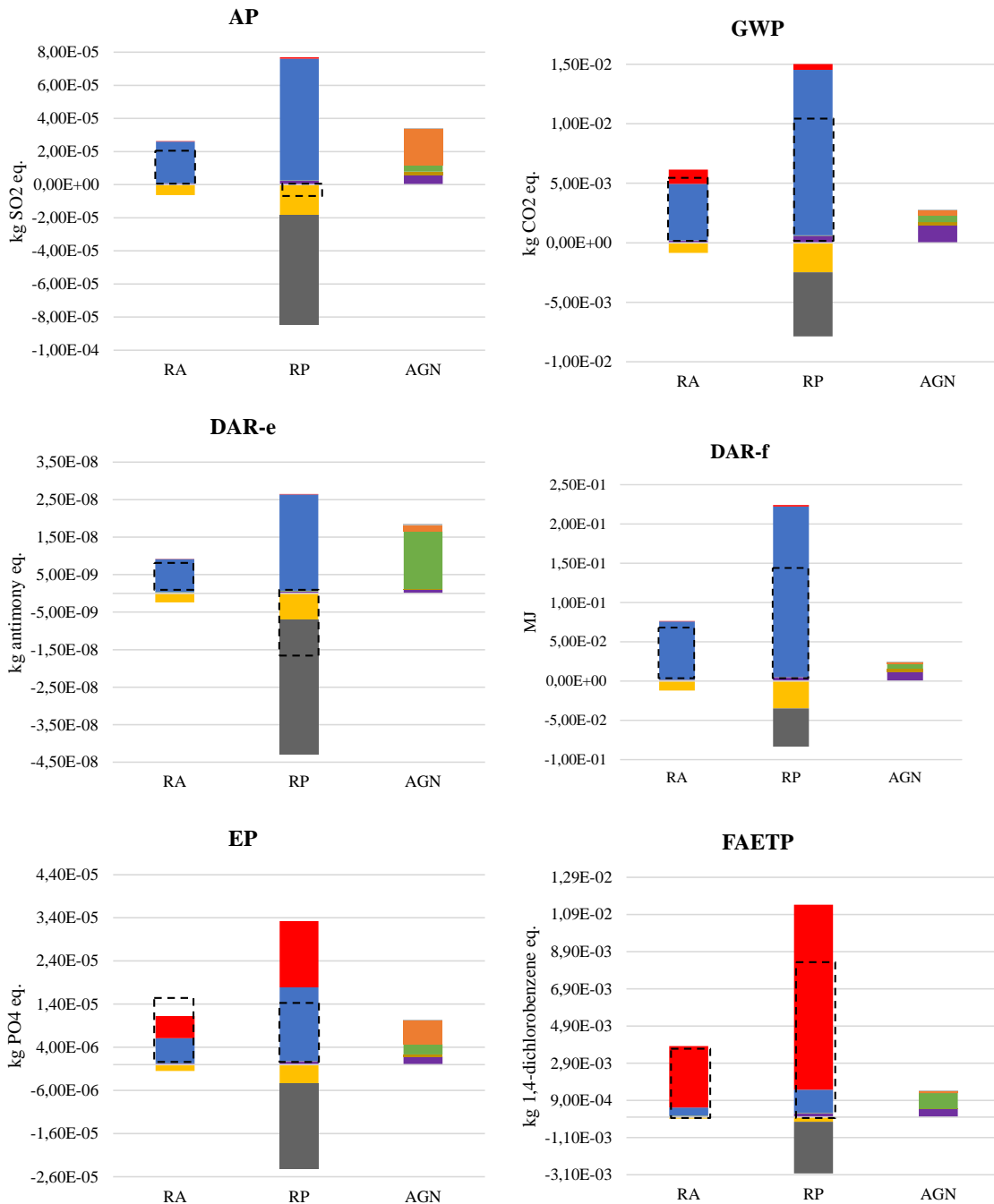
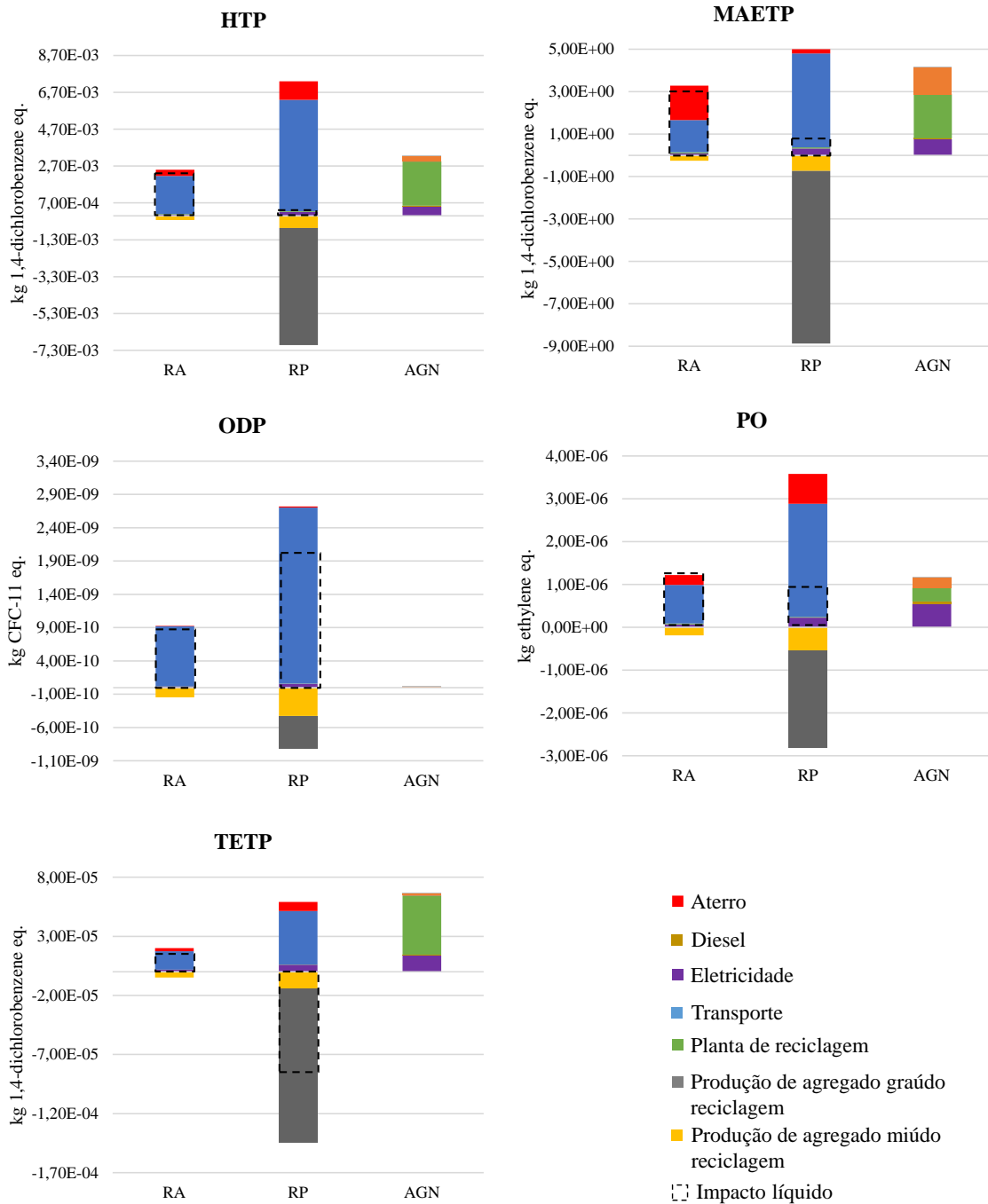


Figura 40 - Comparação dos resultados da avaliação dos impactos ambientais dos processos de Reciclagem Atual (RA) e Proposto (RP) para o RCD brasileiro. Os resultados tomam como base a produção de 1kg de agregado graúdo reciclado. Os valores negativos expressos no gráfico representam o impacto evitado pela substituição parcial dos AGN e AMN pelos produtos de referência e coprodutos de cada processo de reciclagem.(continuação...)



AP: Acidificação; ODP: Depleção da Camada de Ozônio; DAR-e: Depleção de recursos abióticos – elementos; DAR-f: Depleção de recursos abióticos – combustíveis fósseis; FAETP: Ecotoxicidade de água doce; MAETP: Ecotoxicidade de água salgada; TETP: Ecotoxicidade terrestre; EP: Eutrofização; GWP: Mudanças Climáticas; PO: Oxidação fotoquímica; e HTP: Toxicidade humana.

Fonte: o Autor.

A análise de sensibilidade é realizada para um parâmetro chave do sistema, o

Transporte. Essa análise de sensibilidade, no entanto, assume diferentes distâncias de transporte da fonte de agregados graúdos (planta de reciclagem ou mina) até o local na construção civil, como realizado por Xuan et al. (2018). A análise do transporte da planta de reciclagem para o local de produção de concreto também é avaliada em Kurda et al. (2018), em diferentes cenários.

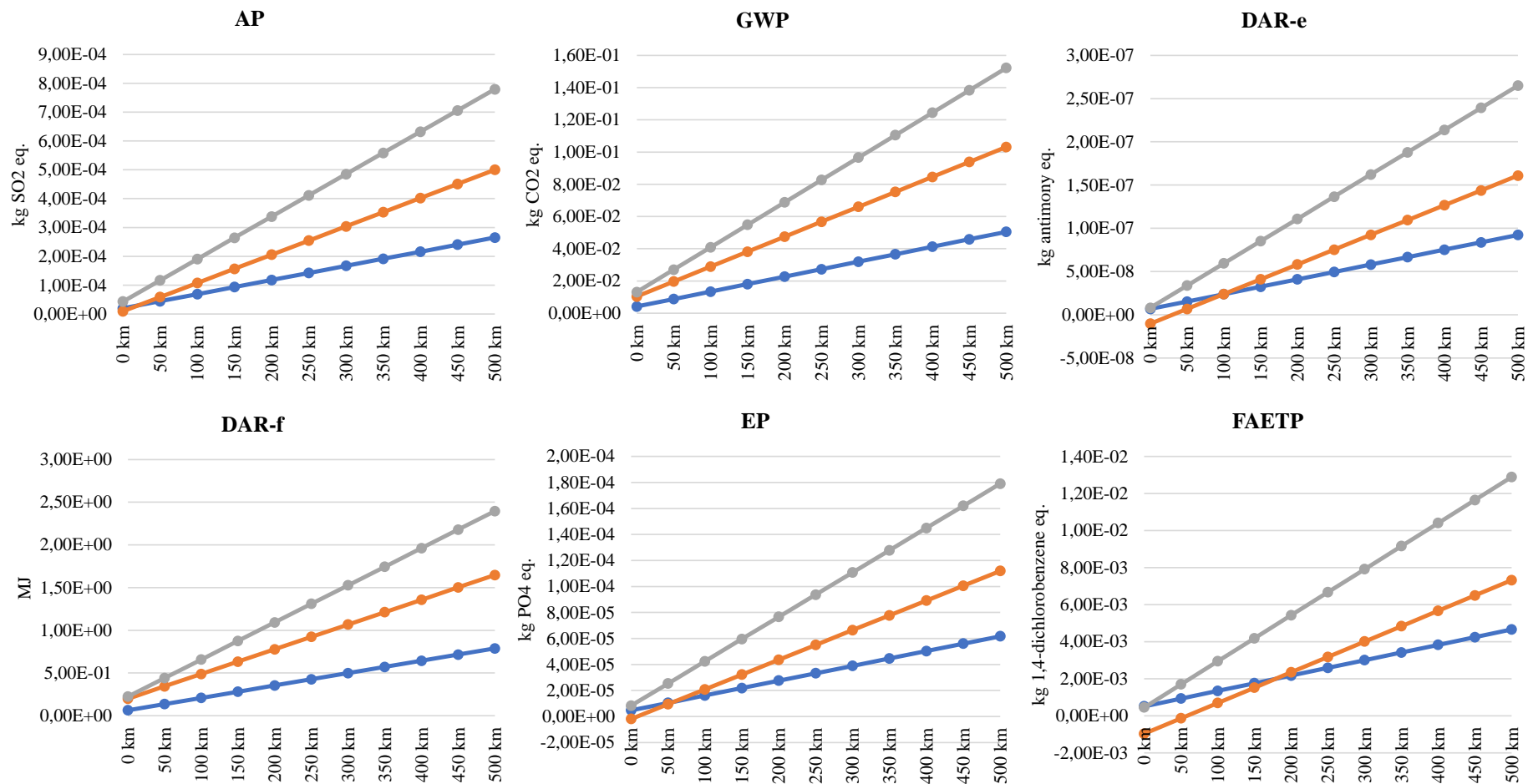
É provável que as distâncias de transporte variem de acordo com a geologia local, a disponibilidade de agregados naturais e o estágio de mercado dos agregados reciclados. Assim, é possível que varie a localização/distância da mina de agregados naturais e a localização/distância da planta de reciclagem com relação ao local de uso pela construção civil.

Os resultados são representados em um gráfico em que a abcissa é a variação da distância de transporte da fonte de produção agregada (usina de reciclagem ou mina) e onde a ordenada é o impacto de cada indicador (Figura 41). A análise de sensibilidade dos indicadores sugere que os impactos da produção de AGN só serão superados pelos processos de reciclagem (RA e RP) se estes tiverem uma maior distância de transporte (da origem à planta de reciclagem).

Dois comportamentos gráficos distintos podem ser observados com relação aos resultados dos processos de reciclagem. O primeiro sugere que os impactos totais do RP são sempre maiores que o RA, se as mesmas distâncias forem mantidas entre essas usinas de reciclagem e o local da construção civil. O segundo comportamento gráfico identificado refere-se à ocorrência de maiores impactos do RA em vista do RP em algumas distâncias equivalentes. Enquanto em AP, DAR-e, EP, HTP os impactos do RA são maiores que RP em distâncias inferiores ou próximas a 50 km, nos indicadores DAR-e e MAETP essas distâncias são próximas a 100 e 150 km, respectivamente. Os indicadores FAETP e TETP mostram as maiores distâncias (planta de reciclagem/canteiro de obras civis) em que os impactos do RA excedem o RP. O FAETP RP mostra menos impacto que o RA em distâncias equivalentes próximas a 200 km, enquanto o TETP a distâncias superiores a 300 km.

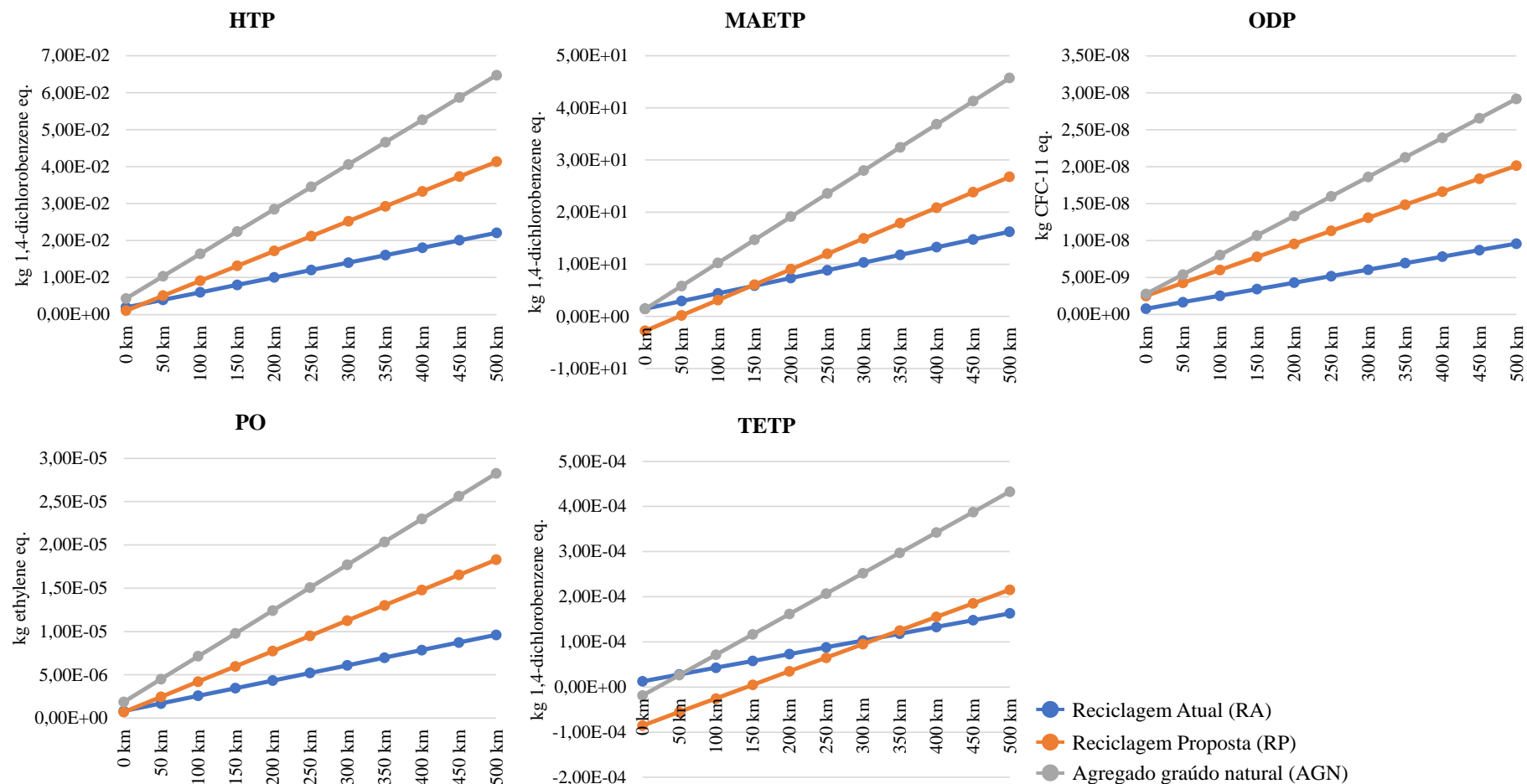
Esses resultados corroboram com a maior participação na abordagem do impacto evitado do AGN, se comparado ao AGRrc e AGRpc. Embora aumentando a eficiência do jigue a ar, reduzindo a carga necessária para a produção de 1 kg de AGRrc, deve ser uma condição para os melhores resultados ambientais, minimizando os impactos do transporte, o impacto evitado pela extração de agregados pode obter resultados ambientalmente menos impactantes sob algumas condições.

Figura 41 – Sensibilidade do transporte do RCD até ao local de uso do agregado produzido. Em azul, resultados do método de Reciclagem Atual de reciclagem. Em laranja, resultados do método de Reciclagem Proposto, com o uso do jigue a ar. Em cinza a variação do transporte para o Agregado Graúdo Natural (AGN).



Fonte: o Autor.

Figura 41 – Sensibilidade do transporte do RCD até ao local de uso do agregado produzido. Em azul, resultados do método de Reciclagem Atual de reciclagem. Em laranja, resultados do método de Reciclagem Proposta, com o uso do jigue a ar. Em cinza a variação do transporte para o Agregado Graúdo Natural (AGN).(continuação...)



AP: Potencial de Acidificação; **ODP:** Depleção da Camada de Ozônio; **DAR-e:** Depleção de recursos abióticos – elementos; **DAR-f:** Depleção de recursos abióticos – combustíveis fósseis; **FAETP:** Ecotoxicidade de água doce; **MAETP:** Ecotoxicidade de água salgada; **TETP:** Ecotoxicidade terrestre; **EP:** Eutrofização; **GWP:** Mudanças Climáticas; **PO:** Oxidação fotoquímica; e **HTP:** Toxicidade humana.

Fonte: o Autor.

4.3. ANÁLISE DOS CUSTOS NA PRODUÇÃO DE AGREGADO GRAÚDO RECICLADO BRASILEIRO

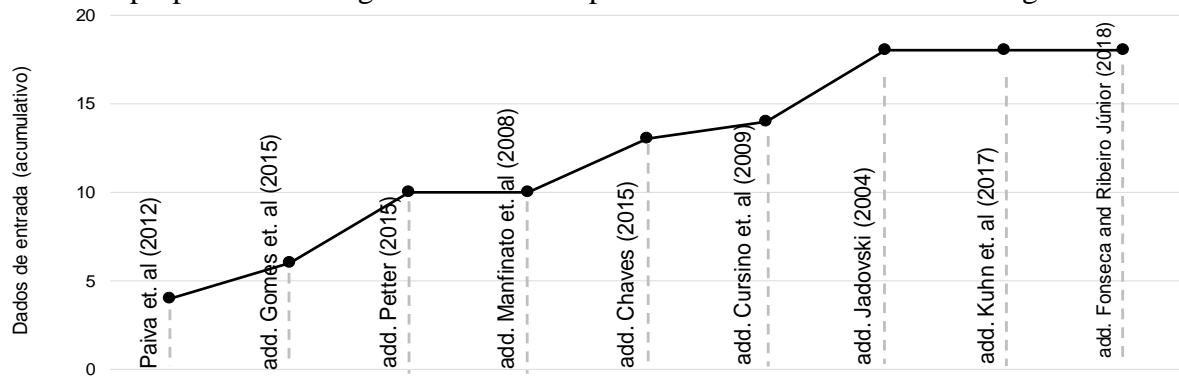
4.3.1. Inventário dos dados de entrada da análise de custo

O inventário dos dados de entrada da análise do custo da reciclagem do RCD brasileiro é dado pela realização de revisão da literatura referente ao tema. Inicialmente, 311 artigos são identificados nas plataformas *Elsevier* (144 artigos) e *Springer* (167 artigos). Deste total, 19 artigos referem-se a pesquisas sobre RCD, que têm como foco a avaliação de custos no processo ou gerenciamento de reciclagem. Doze (12) dos 19 artigos fornecem dados de entrada, são eles: Huang et al (2002), Zhao et al. (2004), Wang et al (2004), Duran et al. (2006), Coronado et al. (2011), Galán et al. (2013), Abdelhmid (2014), Dahlbo et al. (2015), Di Maria et al. (2018), Liu et al. (2019), Mah et al. (2018) e Queheille et al. (2019).

Dentre os dados de entrada identificados na revisão da literatura, descrita no parágrafo anterior, destacam-se por maior frequência de ocorrência e/ou relevância dos resultados, segundo os autores, o transporte dos resíduos (LIU et al. 2019; WANG et al., 2004; DURAN et al., 2006; CORONADO et al., 2011; GALAN et al., 2013; ABDELHMID, 2014; DI MARIA et al., 2018), desde a origem até a planta de reciclagem ou da planta ao local de uso dos AGR, e os custos relacionados à disposição de resíduos no aterro (HUANG et al., 2002; DURAN et al., 2006; ZHAO et al., 2011; GALAN et al., 2013). Os custos de Manutenção de máquinas e equipamentos, além dos custos relacionados aos trabalhadores da planta de reciclagem, também são destacados em alguns trabalhos por suas consideráveis contribuições nos custos do processo (HUANG et. al, 2002; JANDOVSKI e MASUERO, 2004; DURAN et. al, 2006; MANFINATO et. al, 2008; CORRÊA et. al, 2009; PAIVA et. al, 2012; e FONSECA e RIBEIRO JÚNIOR, 2018).

Literatura adicional é consultada a partir da segunda etapa da revisão, identificando um maior número de dados de entrada a serem considerados na análise de custo de planta de reciclagem de RCD. Foram identificadas 9 novas literaturas sobre gestão de RCD no Brasil (JANDOVSKI e MASUERO, 2004; PAIVA et al., 2012; MANFRINATO et al., 2008; CORRÊA et al., 2009; CHAVES, 2015; GOMES et al., 2015; PETTER, 2015; KUHN et al., 2017; e FONSECA e RIBEIRO JÚNIOR, 2018). A segunda etapa da revisão foi considerada finalizada quando se esgotou a identificação de novos dados de entrada na composição da avaliação de custos, como ilustrado na Figura 42.

Figura 42 - Contribuição de literatura adicional consultada na segunda etapa da revisão. O gráfico demonstra a soma dos diferentes dados identificados nestes trabalhos sobre análise de custos da reciclagem de RCD no Brasil. A representação dos trabalhos no gráfico segue a ordem de identificação dos trabalhos. Ao atingir a estabilidade do gráfico considerou-se que os dados de entrada propostos nos artigos científicos disponíveis sobre o assunto foram esgotados.



Fonte: o Autor.

Entre os dados de entrada mais citados pelos autores da revisão estão: consumo de Energia (JANDOVSKI e MASUERO, 2004; MANFINATO et al., 2008; PAIVA et al., 2012; GOMES et al., 2015; KUHN et al., 2017; FONSECA e RIBEIRO JÚNIOR., 2018), Aquisição de Equipamentos (JANDOVSKI e MASUERO, 2004; GOMES et al., 2015; PETTER., 2015; KUHN et al., 2017; MANFINATO et al., 2008; CORRÊA ET AL., 2009; CHAVES., 2015) e Construção civil (JANDOVSKI e MASUERO, 2004; MANFINATO et al., 2008; CORRÊA et al., 2009; PETTER, 2015; KUHN et al., 2017; FONSECA e RIBEIRO JÚNIOR., 2018). Dessa forma, é possível inferir que estes são itens críticos na reciclagem do RCD brasileiro e carecem de atenção no inventário de valores, análise e discussão dos resultados. Os custos associados à Manutenção são destacados em trabalhos de outros países e, portanto, também são considerados um dado de entrada relevantes. A Figura 43 ilustra as entradas definidas em cada literatura acessada.

Dados de entrada não identificados nas revisões são acrescentados aos dados inventariados, de modo a aprimorar o processo de análise de custo. A Figura 44 ilustra a contribuição do número de dados de entrada fornecido pela revisão (primeira etapa, segunda etapa e dados de entrada adicionais) para a análise de custo da reciclagem de RCD brasileiro.

Figura 43 – Relação dos dados de entrada inventariados na literatura sobre a avaliação de custos da reciclagem de RCD no mundo e no Brasil. Alguns dos dados listados são decompostos, alguns outros são considerados ainda que seus valores seja 0 (zero) no atual estágio da reciclagem do RCD no Brasil.

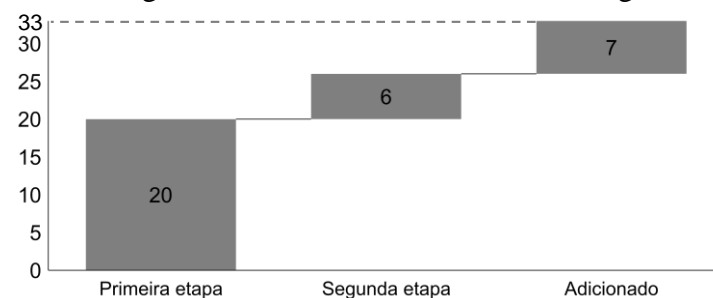
Dados de entrada	Autores																														
	Abdelhamid (2014)	Begum et. al (2006)	Chaves (2015)	Coronado et. al (2011)	Corêa et. al (2009)	Cursino et. al (2009)	Dahlbo et. al (2015)	Di Maria et. al (2018)	Duran et. al (2006)	Fonseca e Ribeiro Júnior (2018)	Galan et. al (2013)	Gan e Cheng (2015)	Gomes et. al (2015)	He et. al (2016)	Huang et. al (2002)	Jandovski e Masuero (2004)	Kuhn et. al (2017)	Liu et. al (2019a)	Liu et. al (2019b)	Mah et. al (2018)	Manfrimato et. al (2008)	Marzouk e Azab (2014)	Paiva et. al (2012)	Petter (2015)	Queheille et. al (2019)	Sobotka e Sagan (2016)	Wang et. al (2004)	Yuan et. al (2011)	Zhao et. al (2011)		
Administrativo	X								X			X			X						X										
Construção civil			X			X				X					X	X	X					X			X						
Regularização da empresa						X																									
Contingências																	X														
Depreciação			X									X																			
Consumo de Diesel							X	X	X				X		X	X						X		X							
Eletricidade						X	X	X	X			X		X	X	X						X		X							
Regularização Ambiental	X															X															
Equipamentos (p/ planta)	X	X			X		X	X	X			X		X	X	X						X			X				X		
Subsídio do governo															X																
Aquisição da propriedade			X		X			X	X							X	X														
Terraplanagem									X							X	X								X						
Manutenção dos equipamentos			X		X		X	X						X	X							X		X							
Manutenção dos veículos			X		X		X	X						X	X							X		X							
Manutenção da infraestrutura																X															
Salários/Encargos	X						X	X						X							X					X		X			
Instalação da planta de reciclagem										X															X	X					
Projeto																		X													
Venda de resíduos recicláveis						X									X																
Taxas																X															
Taxa de disposição (aterro)				X				X	X					X															X	X	
Treinamento	X																														
Transporte para o aterro (rejeito)	X		X			X	X	X											X						X			X			
Transporte para o local de uso	X		X			X	X	X											X						X			X			
Transporte do RCD da geração	X		X			X	X	X											X						X			X			
Veículos						X										X	X														

Fonte: o Autor.

São criadas duas entradas, com as nomenclaturas "Recebimento do RCD, segregado" e "Recebimento do RCD, misto", para diferenciar o custo cobrado do gerador pelas plantas de reciclagem brasileiras. Dado referente aos custos de Marketing também é adicionado aos dados de entrada. Os agregados reciclados disponíveis para venda são divididos em "AGR" e "AmGR/AMR", no método de Reciclagem Atual e "AmGR/AMR/AGRpc" e "AGRrc", no método de Reciclagem Proposto.

Alguns dados de entrada são decompostos. Os Impostos, por exemplo, sugeridos por Jadovski e Masuero (2004), são divididos em "Imposto sobre a receita" e "Contribuição social sobre os impostos". Da mesma forma, a Regularização Ambiental é decomposta em custo inicial da "1º Regularização Ambiental" e os custos de manutenção da licença ambiental, definido como "Regularização Ambiental, manutenção" que deve ser realizado em média a cada 4 anos, conforme a atividade de reciclagem de RCD no Brasil.

Figura 44 - Contribuição das etapas de revisão da literatura. O gráfico demonstra o aumento de insumos considerados em artigos sobre análise de custos da reciclagem de RCD no Brasil.



Fonte: o Autor.

4.3.2. Levantamento de Custos Fixos e Variáveis na reciclagem do RCD

A análise de custos requer a divisão dos dados de entrada em Custos Fixos e Custos Variáveis. Os Custos Fixos têm seus valores levantados para toda a vida útil da planta de reciclagem, neste trabalho estimado em 20 anos. Os Custos Variáveis têm seus valores identificados e adaptados com base em 1 mês de produção, considerando o recebimento mensal de 10852 toneladas de RCD, definida a partir dos dados de capacidade das plantas de reciclagem de RCD no Brasil (ABRECON, 2015), os valores de densidade obtidos nos ensaios do capítulo 3.1.1, Geração e Caracterização dos Agregados de RCD, e a composição gravimétrica identificada para o RCD de Porto Alegre-RS conforme Leite (2001) e Scoot Hood (2006).

Ambos os custos, Fixos e Variáveis, adotam como moeda o dólar americano (US\$), moeda referência no mercado global. É considerada a cotação de junho de 2019, onde US\$1,00

equivale a R\$ 3,82. A fonte dos valores dos dados de entrada adotados na análise de custos deste trabalho é descrita na Tabela 12.

Tabela 12 – Dados de entrada e fonte de valores adotados na análise de custos dos métodos de Reciclagem Atual e Proposto para o RCD neste trabalho.

DADO DE ENTRADA	FONTE/ADAPTADO DE
Construção Civil	Kuhn et al. (2017), Jadovski e Masuero (2004) e Corrêa et al. (2009)
Equipamentos e Veículos	Fornecedores de equipamentos
Administrativo, Depreciação, Terraplanagem, Manutenção dos Equipamentos e Veículos, Manutenção da Infraestrutura	Jadovski e Masuero (2004), Kuhn et al. (2017) e Fonseca e Ribeiro Júnior (2018) e informações da planta de reciclagem
Salário/Encargos	Informações da planta de reciclagem local e SINAPI (ref. Junh./2019)
Aquisição da Propriedade	Imobiliárias locais
Instalação da planta de reciclagem	Galán et al. (2013)
1 st Regularização Ambiental e sua manutenção	Órgão ambiental local
Regularização da Empresa	Corrêa et al. (2009)
Contingências e Projeto	Kuhn et al. (2017)
Eletricidade	Di Maria et al. (2018)
US\$/kwh	Concessionária de energia local
Contribuição social sobre os impostos, AmGR, AMR, AGRpc e AGRrc	Calculado
Marketing e Treinamento dos trabalhadores	Estimado
Recebimento de RCD misto, Recebimento de RCD segregado, Outros resíduos recicláveis e não recicláveis, Consumo de Diesel, Taxa de disposição,	Dado coletado e medido em laboratório
Taxa de venda	De acordo com a atividade
Transporte da fonte geradora até a planta e da planta ao aterro	Petter (2015) e dado coletado

Fonte: o Autor.

Custos Fixos estão relacionados a Construção Civil, Equipamentos, Aquisição do terreno, Terraplanagem, Instalação da planta, Veículos, Regularização da empresa, Contingências, Projeto e Depreciação. Os valores associados às entradas do método de Reciclagem Atual e do método de Reciclagem Proposto encontram-se na Tabela 13.

A definição dos custos da Construção civil no método de Reciclagem Atual é estimada considerando os valores, porte, tecnologia e outras informações disponíveis em Kuhn et al. (2017), Jadovski e Masuero (2004) e Corrêa et al. (2009). Para o método de Reciclagem Proposto, onde está prevista a inclusão do Jigue a ar. Assim, infere-se um acréscimo na Construção civil de 5% do valor com relação à Reciclagem Atual. Da mesma forma, a Instalação da Planta de Reciclagem, que no método de Reciclagem Atual adapta o valor sugerido por Galán et al. (2013) ao porte e características da planta de reciclagem em estudo, é acrescido em 5% na Reciclagem Proposta.

Tabela 13 – Custos Fixos e Variáveis aplicados na análise econômica, considerando os valores identificados na literatura, balanço de massa e estimativa para os métodos de Reciclagem Atual (RA) e Reciclagem Proposta (RP) de reciclagem de RCD no Brasil.

Custos Fixos (US\$)						
	Construção Civil	Equipamentos	Aquisição do terreno	Terraplanagem	Instalação da planta	Veículos
RA	88.082,90	205.222,80	129.533,68	4.404,15	68.000	156.151,81
RP	92.487,05	957.302,32	129.533,68	4.624,35	71.400	156.151,81
	1 st Regularização ambiental	Regularização da empresa	Contingência	Projeto	Depreciação	
RA	1.266,00	518,13	6.735,75	10.362,69	49.090,83	
RP	1.266,00	518,13	6.735,75	10.362,69	124.298,78	
Custo Variáveis (US\$/mês)						
	Administrativo	Regularização ambiental, manutenção	Subsídio do governo	Marketing	Salários/Encargos	
RA	148,45	308,60*	0,00	842,08	4.600,99	
RP	148,45	308,60*	0,00	900,23	4.600,99	
	Treinamento dos trabalhadores	Imposto sobre a receita	Contribuição Social sobre os Impostos	Taxa de disposição	Transporte para o aterro	
RA	23,00	33.683,05	1.479,53	0,00	0,00	
RP	23,00	36.009,29	1.479,53	0,00	0,00	
	Consumo de Diesel	Eletricidade	Manutenção dos equipamentos	Manutenção dos veículos	Manutenção da infraestrutura	
RA	800,00	570,86	5.130,57	18,62	880,83	
RP	800,00	639,51	23.932,56	18,62	924,87	
	Transporte para o local de uso	Transporte do RCD da fonte de geração	Recebimento do RCD, misto	Recebimento do RCD, segregado	Outros materiais recicláveis	
RA	24.412,50	48.834,00	43.698,38	48.580,88	0,27	
RP	24.412,50	48.834,00	43.698,38	48.580,88	0,27	
	AGR/AGRpc	AGRrc	AmGR e AMG			
RA	53.335,13	-	26.687,09			
RP	35.193,93	29.772,40	26.687,09			

* Pago a cada 4 anos.

Fonte: o Autor.

O custo de Regularização da empresa é estimado a partir de valor fornecido por Corrêa et al. (2009), e características da planta avaliada por este autor, adaptando seus valores a planta de reciclagem de RCD em estudo. É definido que as mudanças entre os métodos de Reciclagem Atual e Proposto não influenciam nos valores de Regularização da empresa, desta forma ambos os cenários tem o mesmo valor atribuído a este dado de entrada.

Os custos dos Equipamentos e Veículos são obtidos junto a fornecedores, e da mesma forma que o custos de aquisição do Terreno, têm depreciação estimada em 10%, conforme Auer et al. (2017) propôs para a reciclagem do RCD em um horizonte de 20 anos. Assim, o valor adotado é 5% e 7% mais conservador que os propostos por Maheshi et al. (2015) e Petter (2015), respectivamente, que, inclusive, consideram vida útil do projeto inferiores ao adotado. Não é considerado neste trabalho Depreciação da Construção civil.

Os custos da aquisição de Equipamentos são acrescidos no método de Reciclagem Proposto pela aquisição do jigue a ar e uma esteira transportadora a mais do que a Reciclagem Atual. Os custos da aquisição de Veículos, entretanto, são mantidos os mesmos em ambos os métodos de Reciclagem.

O custo de Aquisição do Terreno é definido mediante consulta de lotes entre 0,5 e 1 hectare, na mesma região da planta local de reciclagem de Porto Alegre-RS que disponibilizou parte dos dados de inventário. Os serviços de Terraplanagem têm um valor estimado correspondente a 5% das obras civis, percentual estimado a partir dos valores propostos por Jandovski e Masuero (2004), Petter (2015), Kuhn et al. (2017) e Fonseca e Ribeiro Júnior (2018).

Kuhn et al. (2017) sugerem que um valor de Contingência seja mantido, como reserva para eventuais situações imprevistas e/ou emergenciais. Nenhuma das literaturas consultadas, na revisão sobre custos na reciclagem de RCD, propõe valor para Contingências, desta forma é adotado percentual de 65% do valor do Projeto, baseando-se no percentual utilizado por Kuhn et al. (2017). O custo do Projeto inicial da planta de reciclagem também é obtido de Kuhn et al. (2017). Considera-se que o ingresso do Jigue a ar no desenvolvimento do Projeto não influencia no seu custo, logo os valores considerados nos métodos de Reciclagem Atual e Proposto são equivalentes.

Os Custos Variáveis tem uma quantidade maior de dados de entrada, como pode ser visto na Tabela 13. Os valores relacionados à “Regularização Ambiental, manutenção” são obtidos junto ao órgão ambiental local, sendo estes pagos a cada 4 anos. A contribuição do Subsídio do Governo é incluída como um dos dados de entrada na análise de custos, no entanto,

atualmente no Brasil nenhum valor é ofertado como forma de incentivo para a correta gestão deste tipo de resíduo. A adoção do Subsídio do Governo como dado de entrada, entretanto é sugerido/considerada por diversos autores (HUANG et al., 2002; DURAN et al., 2006; FU et al., 2017; LIU et al., 2019a), sendo utilizado na discussão dos resultados e posterior busca por soluções alternativas para resultados mais atrativos.

Custos Administrativos são estimados a partir de Jandovski e Masuero (2004) e de informações disponibilizadas pela planta de reciclagem do município de Porto Alegre-RS. Este dado considera valores administrativos (excluídos o consumo de eletricidade e custos com colaboradores) como consumo de água, telefone, internet, entre outros.

Os Salários/encargos são definidos com base no número de colaboradores da planta de reciclagem local e valores disponibilizados no SINAPI (referência jun./2019) para cada uma das atividades previstas para operação da planta de reciclagem dos Cenários propostos. São considerados: 2 auxiliares administrativo/operacionais, 2 motoristas para os caminhões, 1 operador para a retroescaveira e 1 gerente da planta. Os valores extraídos do SINAPI já consideram os encargos trabalhistas.

Os custos de Treinamento dos trabalhadores, assim como investimento em Marketing, não têm valores sugeridos nas literaturas consultadas, assim para ambos os dados de entrada são adotados valores de 0,5% sobre o Salário/encargos e receita bruta, respectivamente.

Conforme os dados inventariados na planta de reciclagem de RCD do município de Porto Alegre-RS, o Recebimento do RCD misto correspondem a 25% do total de RCD enviado à planta de reciclagem, ou seja, aproximadamente 2.713 toneladas/mês. Esse material possui uma fração de resíduos como papeis, plásticos, metais e rejeitos estimada em 0,001%, ou seja, 2,713 kg/mês. Destes, conforme estimativas da planta local de reciclagem, dois quintos (2/5) refere-se a resíduo metálicos, três décimos (3/10) refere-se a resíduos plásticos, um quinto (1/5) refere-se a resíduos de papel e uma décima parte (1/10) refere-se a rejeitos, destinados à coleta pública convencional por ter características semelhantes aos resíduos domiciliares.

Os resíduos de metais, papeis e plásticos, com mercado de reciclagem estabelecido no Brasil, tem valor agregado. Estes resíduos são incluídos na análise de custos como "Outros resíduos recicláveis". Considerando uma receita de US\$ 109,00/tonelada, os percentuais de cada material e os valores sugeridos pelo Compromisso Empresarial para a Reciclagem (CEMPRE, 2019), referência julho/agosto de 2019.

Os rejeitos, por possuírem características semelhantes ao resíduo domiciliar, são destinados na coleta municipal de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e, desta forma, não são

considerados como custo para as plantas de reciclagem em estudo. Assim, considerando não haver necessidade de disposição de resíduos que chegam à planta de reciclagem em aterro, os valores de Taxas de disposição e Transporte para aterro são iguais a 0 (zero).

A planta de reciclagem do município de Porto Alegre-RS disponibiliza dados de consumo de diesel pela retroescavadeira, que opera dentro dos limites da planta atendendo descarga/carga de RCD e agregados reciclados, correspondentes a 800 l/mês. O custo do diesel no Brasil é de aproximadamente US\$ 1,00/litro (referência, junho de 2019). Os custos relacionados ao consumo de diesel dos caminhões já estão inclusos nos valores dos dados de entrada definidos como "Transporte...".

O consumo de eletricidade diverge nos 2 cenários, Reciclagem Atual e Reciclagem Proposta, basicamente pela quantidade de equipamentos, considerando o consumo médio por equipamento sugerido por Di Maria et al. (2018). Desta forma, no método de Reciclagem Atual é considerado um consumo de aproximadamente 0,474 kwh/tonelada, e no método de Reciclagem Proposta o consumo estimado é de 0,531 kwh/tonelada. O valor do kwh é obtido junto aos dados públicos disponíveis pela empresa regional de fornecimento de energia (referência, junho de 2019) correspondendo a aproximadamente US\$ 0,111.

A Manutenção do Equipamento tem o custo estimado em 2,5% do capital total investido nos equipamentos, e a Manutenção dos Veículos é equivalente a 0,0018 US\$/km/veículo, baseado nos trabalhos de Paiva et al. (2012), Manfinato et al. (2008), Corrêa et al. (2009) Fonseca e Ribeiro Júnior (2018) e Jandovski e Masuero (2004). A definição do custo da Manutenção dos Veículos considera a quantidade de 10.852 toneladas/mês, 52 toneladas por viagem, 2 caminhões e são acrescidos 10% referente à movimentação interna da retroescavadeira no pátio da planta de reciclagem.

Os custos de Manutenção da Infraestrutura são estimados em 1% do custo da Construção Civil. A definição deste percentual observou os valores adotados por Jandovski e Masuero (2004), Kuhn et al. (2017) e Fonseca e Ribeiro Júnior (2018).

O custo mensal do Transporte do RCD da fonte de geração (10.852 toneladas) para a planta de reciclagem considera uma distância média de 30 km. O transporte de agregados reciclados para uso refere-se às porcentagens de AmGR, AMR e AGR no método de Reciclagem Atual e as porcentagens de AmGR, AMR, AGRpc e AGRrc no método de Reciclagem Proposta, equivalente a 10.850 toneladas/mês como uma distância média de 15 km. Ambos os transportes destacados neste parágrafo adotam o custo médio sugerida por Petter (2015) para Porto Alegre (US\$ 0,15/tonelada/km).

A receita do Recebimento do RCD misto, conforme dados disponibilizados pela planta de reciclagem local corresponde a US\$ 16,11/tonelada. O custo cobrado pelo Recebimento do RCD segregado, que corresponde a 75% (8.139 toneladas) do resíduo que chega à planta de reciclagem, é de aproximadamente US\$ 5,97/tonelada.

O agregado miúdo reciclado (AMR) produzido corresponde a 35,2% (3.819,20 toneladas/mês) dos RCD que chegam à planta de reciclagem, tanto na Reciclagem Atual quanto na Reciclagem Proposta. O agregado muito graúdo reciclado (AmGR), com granulometria >19,1mm, corresponde a 6% em ambos os cenários, e assim como o AMR é vendido a US\$ 5,97/tonelada.

O agregado graúdo reciclado (AGR), produzido no método de Reciclagem Atual corresponde a 58,8% (6.379,80 toneladas/mês). No método de Reciclagem Proposta, devido ao uso do jigge a ar para a melhoria da qualidade do RCD, são produzidas duas frações de agregados graúdos. Conforme balanço de massa, o agregado graúdo reciclado rico em concreto (AGRrc) corresponde a 20%, 2.170,00 toneladas/mês. Já o agregado graúdo reciclado pobre em concreto, correspondendo a 38,8%, 4.209,80 toneladas/mês. É definido que tanto o AGR, da Reciclagem Atual, quanto o AGRpc, da Reciclagem Proposta, tem valor de mercado igual a US\$ 8,36/tonelada. O AGRrc, entretanto, possui valor superior, estimado em US\$ 13,72/tonelada, valor equivalente ao custo do AGN (com base no SINAPI/junho2019).

Os valores relacionados à Contribuição Social sobre os Impostos são definidos conforme os valores médios atualmente em vigor no Brasil. Os valores considerados neste trabalho estão próximos aos sugeridos por Lima (2013) e Jandovski e Masuero (2004). São considerados PIS/COFINS e ICMS que somados representam 20%.

4.3.3. Análise dos indicadores econômicos

Os resultados da análise de custo evidenciam que ambos os cenários de produção de agregado reciclado não atingem valores Taxa Interna de Retorno do investimento (TIR) próximos à Taxa Mínima de Atratividade (TMA) sugerida para o tipo de atividade (12%) (PETTER, 2015; DOAN, 2016), como pode ser visto na Tabela 14. Os valores de TIR são de 3,38%, na Reciclagem Atual, e -5,56%, na Reciclagem Proposta. Esses resultados estão próximos aos obtidos por Petter (2015), que encontrou valores pouco expressivos, ou ainda negativos, de TIR para diferentes cenários de produção de agregados graúdos reciclados, alguns deles considerando o uso do jigge a ar. Ainda que Petter (2015) não tenha adotado os mesmos critérios de seleção dos dados de entrada, a proximidade dos resultados confirma a dificuldade

no alcance da viabilidade econômica na reciclagem e produção de agregados graúdos de RCD no Brasil.

Os valores de VPL tem aumento considerável entre os métodos de Reciclagem Atual e Proposto (aproximadamente 3,5 vezes maior). Este resultado reflete o alto valor necessário para a aquisição dos Equipamentos na Reciclagem Proposta, em especial o jigue a ar. Como consequência, os demais indicadores econômicos também são influenciados pelo aumento significativo dos custos iniciais deste método de Reciclagem.

O *Payback* encontrado para a Reciclagem Atual é de 14,37 anos. Apesar da Reciclagem Atual atingir valor de *Payback* inferior à vida útil prevista para o projeto (20 anos), este tempo de retorno do investimento pode não ser atrativo para investidores. Huang et al. (2002), Di Maria et al. (2018) e Neto et al. (2017) encontraram valores mais otimistas de *Payback*, entre 3 e 11,2 anos, no entanto, os estudos realizados por estes autores estão em um contexto de cenários na Ásia, Europa, e no caso de Neto et al. (2017) em parte brasileiro.

O Cenário Proposto tem previsto, conforme análise de custo, *Payback* superior a 38 anos, atingindo quase o dobro a vida útil prevista para o projeto (20 anos). Este resultado reflete o alto investimento inicial necessário (Custo Fixo), principalmente pela aquisição do jigue a ar. Assim, são alcançadas menores receitas mensais, resultado da subtração das receitas totais pelos custos variáveis (que também aumentam com o incremento do equipamento da mineração). Desta forma é possível inferir que somente a melhoria da qualidade do AGR, e aumento da receita pela venda de AGRrc não justificam a mudança tecnológica do método de Reciclagem Atual para o método de Reciclagem Proposto, considerando critérios econômicos.

Tabela 14 – Indicadores da análise econômica dos métodos de Reciclagem do RCD propostos neste trabalho.

RECICLAGEM	VPL (1.000 US\$)	TIR (%)	PAYBACK (ANOS)
RA	- 345	3,38	14,37
RP	- 1.252	- 5,56	38,48

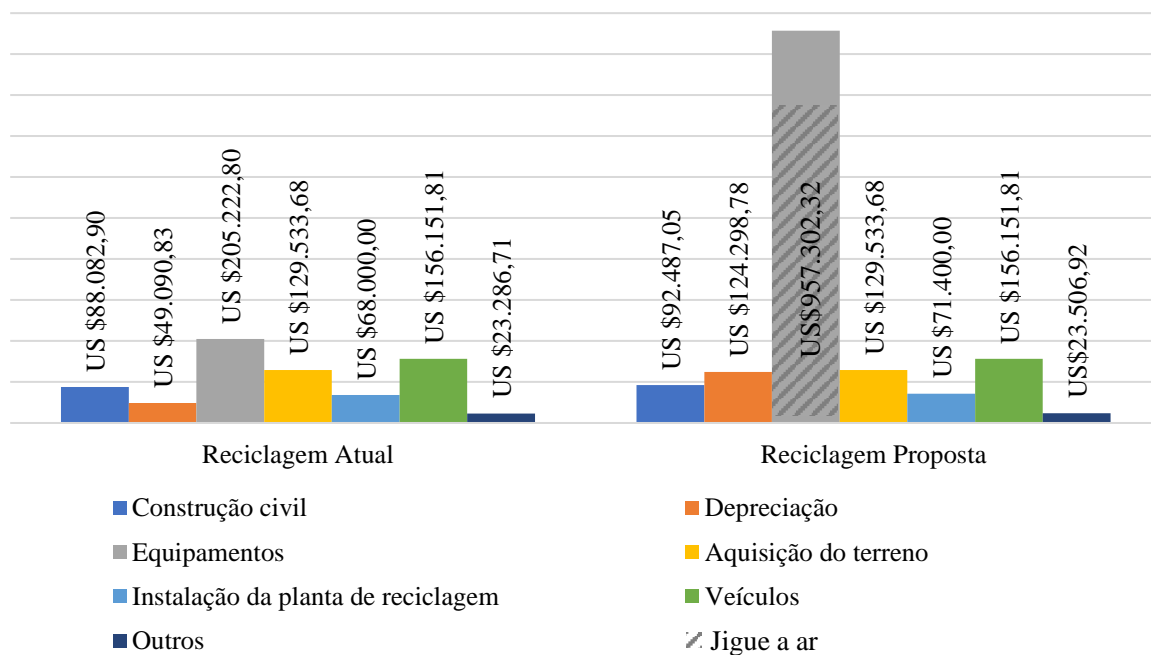
Fonte: o Autor.

Os dados de entrada mais significativos relacionados aos Custos Fixos, tanto no método de Reciclagem Atual quanto no método de Reciclagem Proposto são aquisição de Equipamentos, Veículos e Terreno, variando, entretanto, com relação ao percentual de participação nos Custos Fixos totais de cada Cenário. A participação mais significativa da aquisição dos Equipamentos em ambos os cenários corrobora com Huang et al. (2002), Wang et al (2004), Chaves (2015), Duran et al. (2006) e Galán et al. (2013). Assim, apesar destes estudos referirem-se a plantas de reciclagem fora do Brasil, é possível concluir sobre a

importância dos custos associados a este dado de entrada na viabilidade da reciclagem do RCD em qualquer lugar do mundo. Da mesma forma, esta corroboração entre os resultados obtidos e os já encontrados por outros autores permite inferir sobre a necessidade de busca por solução alternativa à aquisição dos equipamentos como forma de tornar economicamente viável e atrativo a atividade de reciclagem de RCD.

Os custos relacionados aos Equipamentos mais que duplicam quando comparadas suas contribuições aos Custos Fixos do método de Reciclagem Atual (29%) e Proposto (62%). A inclusão do jigue a ar na Reciclagem Proposta é o principal responsável por este aumento significativo identificado. O alto custo da aquisição do equipamento minimiza, inclusive, as contribuições de outros importantes dados de entrada, como a Aquisição do terreno (8%), Veículos (10%) e a Construção civil (6%), que na Reciclagem Atual representam 18%, 22% e 12%, respectivamente. O valor total dos Custos Fixos da Reciclagem Proposta é mais que o dobro da Reciclagem Atual. A Figura 45 ilustra a significativa diferença entre os cenários, principalmente dada pelo acréscimo nos custos da aquisição dos Equipamentos, seguido da aquisição de Veículos e do Terreno.

Figura 45 – Principais dados de entrada que compõem os Custos Fixos dos métodos de Reciclagem Atual e Proposto deste trabalho. Caixa hachurada representando a participação do jigue a ar, principal componente do Cenário Proposto.

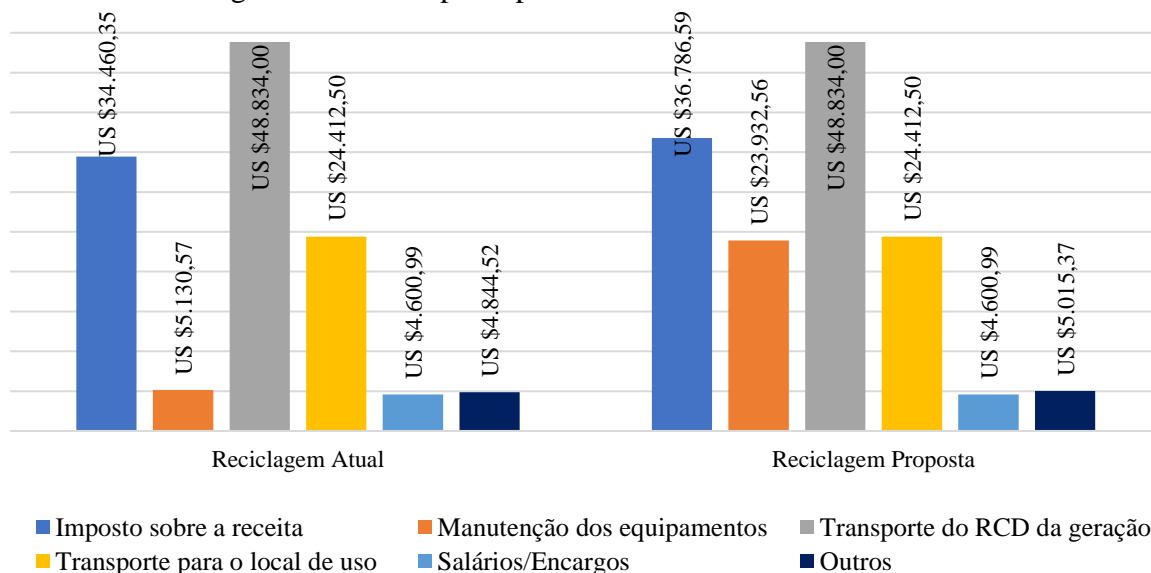


Fonte: o Autor.

Diferente dos Custos Fixos, os custos variáveis tem aumento pouco significativo se comparado à Reciclagem Atual com a Reciclagem Proposta. A divergência dos Custos Variáveis entre os métodos de Reciclagem, entretanto, tem a mesma origem dos Custos Fixos: a introdução do jigue a ar no processo de reciclagem do RCD brasileiro. O valor adotado para a Manutenção dos equipamentos tem aumento quando da inclusão do equipamento do jigue a ar que, como descrito em parágrafos anteriores, tem custo de aquisição representativo frente aos demais equipamentos do processo de reciclagem do RCD. Tanto no método de Reciclagem Atual quanto no método de Reciclagem Proposto, a participação da Manutenção dos equipamentos aumenta de 4%, na RA, para 15% na RP.

A Figura 46 ilustra a contribuição dos principais dados de entrada que compõem os Custos Variáveis. Nesta Figura é possível verificar a predominância do Transporte do RCD da fonte geradora, dos Impostos sobre a receita e do Transporte dos agregados reciclados para o local de uso como os dados de entrada mais significativos em ambos os Cenários. O Transporte do RCD da geração para a planta de reciclagem e da planta para o local de uso, são um dos principais pontos críticos dos custos da reciclagem de RCD, segundo Miah et al. (2018). Os dois dados de Transporte, juntos, representam quase a metade dos Custos Variáveis, seja na Reciclagem Atual (53%) ou na Reciclagem Proposta (46%).

Figura 46 – Contribuições mensais dos principais dados de entrada dos Custos Variáveis dos métodos de Reciclagem Atual e Proposta para o RCD brasileiro.



Fonte: o Autor.

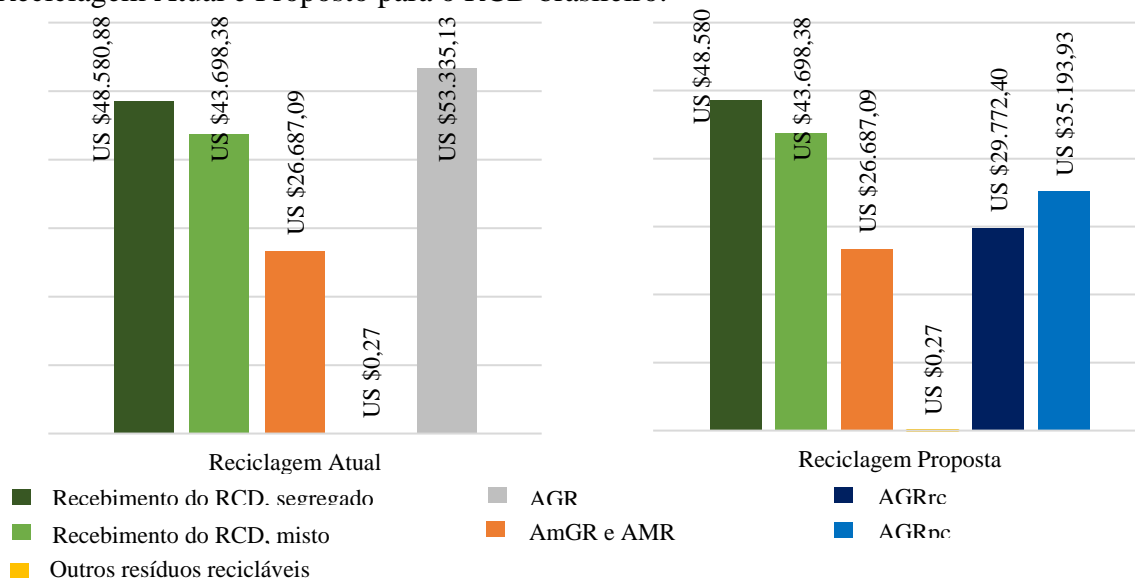
Os Impostos sobre a receita representam quase um quarto (1/4) dos Custos Variáveis nos métodos de Reciclagem Atual (25%) e Proposto (23%). Apesar deste dado de entrada ser

considerado em outras análises econômicas da reciclagem do RCD, como Jandovski e Masuero (2004) e Petter (2015), não são disponibilizadas maiores discussões sobre a redução destes impostos, sendo em outros trabalhos discutido o uso de Subsídios do governo local para fomentar a reciclagem do RCD (HUANG et al., 2002; DURAN et al., 2006; FU et al., 2017; LIU et al., 2019).

Assim, soluções alternativas para os dados de entrada de Transporte e Impostos sobre a receita são definidas como fontes potenciais na busca por resultados economicamente mais atrativos para a reciclagem de RCD nos Cenários avaliados.

O resultado da análise econômica das receitas dos Cenários de reciclagem (Figura 47) revela participação significativa do recebimento do RCD, seja de materiais segregados ou mistos, que somados representam aproximadamente 50% da receita em ambos os Cenários. A outra parcela das receitas é dada pela venda de agregados miúdos e graúdos reciclados, sendo a fração da venda de Outros resíduos recicláveis menor que 0,001%. A aplicação de legislações voltadas à melhoria da gestão dos resíduos, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) resulta em uma mudança desse paradigma, com resíduos potencialmente recicláveis (como papéis, plásticos e metais) chegam em plantas de reciclagem de RCD em quantidades muito inferiores aos anos que antecedem.

Figura 47 – Contribuições mensais de cada dado de entrada relacionado a receitas dos métodos de Reciclagem Atual e Proposta para o RCD brasileiro.



Fonte: o Autor.

A variação entre os resultados da Reciclagem Atual e da Reciclagem Proposta se dá, principalmente, pela produção de 2 tipos de agregados graúdos no método de Reciclagem

Proposto, o agregado graúdo reciclado rico em concreto (AGRrc) e o agregado graúdo reciclado pobre em concreto (AGRpc). A diferença entre a receita com a venda do AGR, da Reciclagem Atual, e dos AGRrc e AGRpc, da Reciclagem Proposta, é de pouco mais de 6,5%.

4.3.4. Soluções alternativas à viabilidade econômica

Como descrito na análise e discussão dos resultados dos indicadores econômicos, e suas relações com os dados de entrada que compõem os Custos Fixos e Variáveis, os Impostos sobre a receita, o Transporte (da fonte de geração e para o local de uso), aquisições do Terreno, Equipamento e Veículos, são alguns dos principais contribuintes para os resultados pouco otimistas para os indicadores TIR e *Payback*. Desta forma, estes dados de entrada, juntamente com a análise da possibilidade de Subsídios do governo local, prática considerada por autores como Huang et al. (2002); Duran et al. (2006); Fu et al. (2017); Liu et al. (2019) em seus estudos, são avaliadas a partir de soluções alternativas propostas. Ao final, são realizadas análises e discussões sobre o comportamento dos indicadores econômicos frente a mudanças destes dados de entrada. O ordenamento dos dados de entrada avaliados, as soluções alternativas propostas, e os critérios de identificação gráfica destas alternativas são descritos no Quadro 9. Os resultados obtidos para os indicadores TIR e *Payback*, com relação às soluções alternativas são ilustrados na Figura 48 e na Figura 49.

Quadro 9 – Descrição das soluções alternativas e variações aplicadas nos dados de entrada proposto para busca por resultados economicamente mais atrativos na reciclagem do RCD brasileiro.

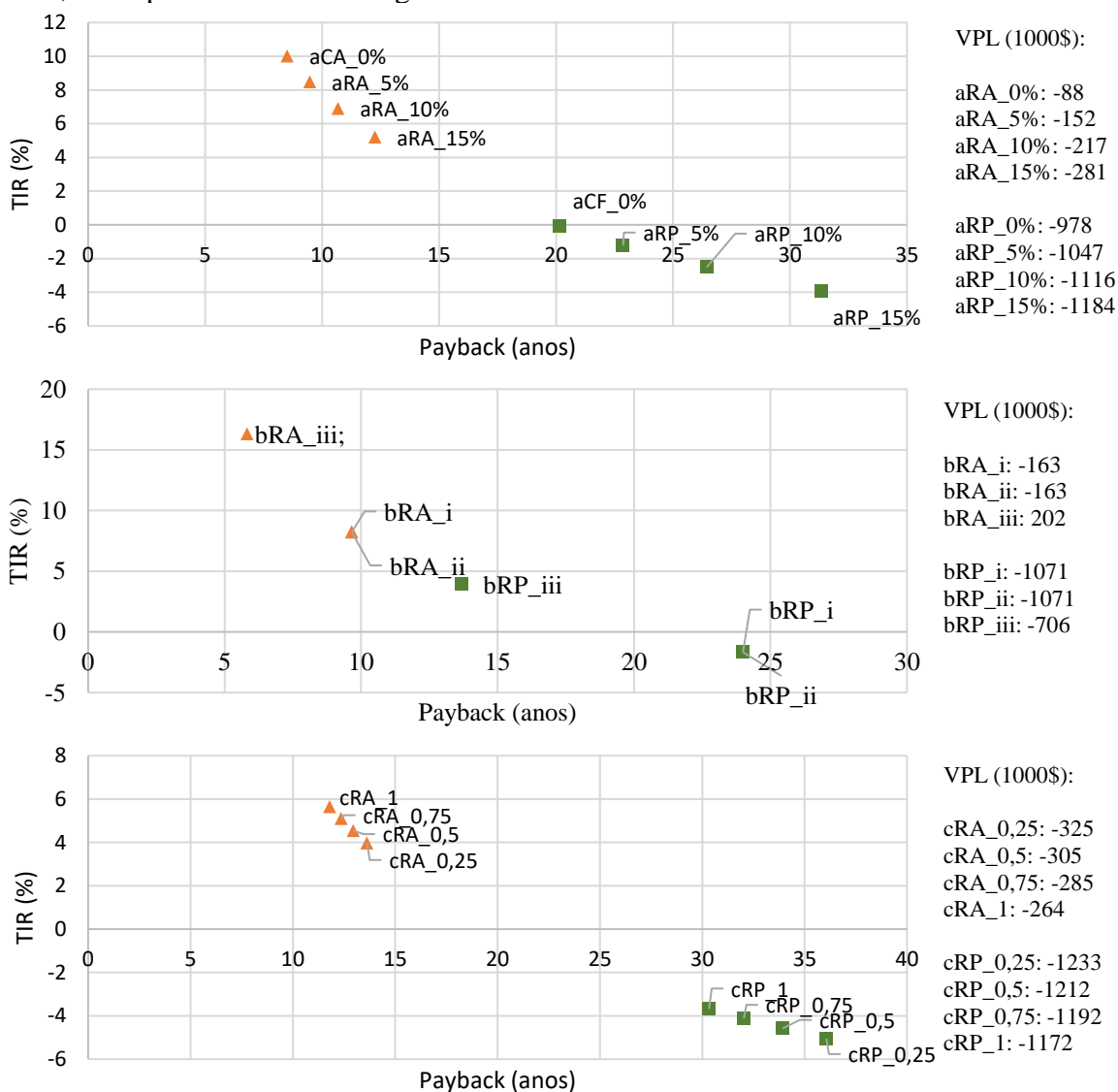
DADO DE ENTRADA	VARIAÇÃO
a. Impostos sobre a receita	Este dado de entrada adota, na análise econômica, 20% sobre a receita bruta. A identificação das soluções alternativas considera diferentes porcentagens de impostos. A identificação adota a letra “a”, referente a primeira solução alternativa; “RA”, referente à Reciclagem Atual e “RP” referente à Reciclagem Proposta; e o percentual de Imposto proposto sobre a receita.
b. Transporte do RCD da fonte de geração e do Transporte para o local de uso	A análise de custos inicial considerado US\$ 0,15/tonelada/km (PETTER, 2015). Três propostas são avaliadas: (i) redução do custo de transporte para US\$ 0,10 toneladas/km; (ii) exclusão do custo do Transporte para o local de uso; e (iii) exclusão de ambos os dados de Transporte. A identificação das alternativas é dada pela letra “b”, que representa a segunda solução alternativa, “RA” e “RP”, Reciclagem Atual e Proposta, respectivamente, e a numeração romana (i, ii e iii) cada uma das três propostas.
c. Subsídio do governo	Inicialmente não são considerados Subsídio do governo, por não existirem no Brasil. Assim, são avaliadas a inclusão de Subsídio. A identificação adota a letra “c”, representando a terceira solução alternativa, “RA” e “RP”, Reciclagem Atual e Proposta, respectivamente, seguido do valor (em US\$) proposto por tonelada recebida de RCD.

Quadro 9 - Descrição das soluções alternativas e variações aplicadas nos dados de entrada proposto para busca por resultados economicamente mais atrativos na reciclagem do RCD brasileiro (*continuação....*).

d. Aquisição do Terreno, Equipamentos e Veículos	São avaliadas a redução dos custos de Aquisição de Terreno, Equipamento e Veículos. A identificação adota a letra “d”, representando a quarta solução alternativa proposta, “RA” e “RP”, Reciclagem Atual e Proposta, respectivamente, a letra inicial do dado de entrada que propõem-se a redução dos custos (Terreno “T”, Equipamentos “E”, e Veículos “V”), seguido dos percentuais de redução propostos, 25%, 50%, 75% e 100%.
--	--

Fonte: o Autor.

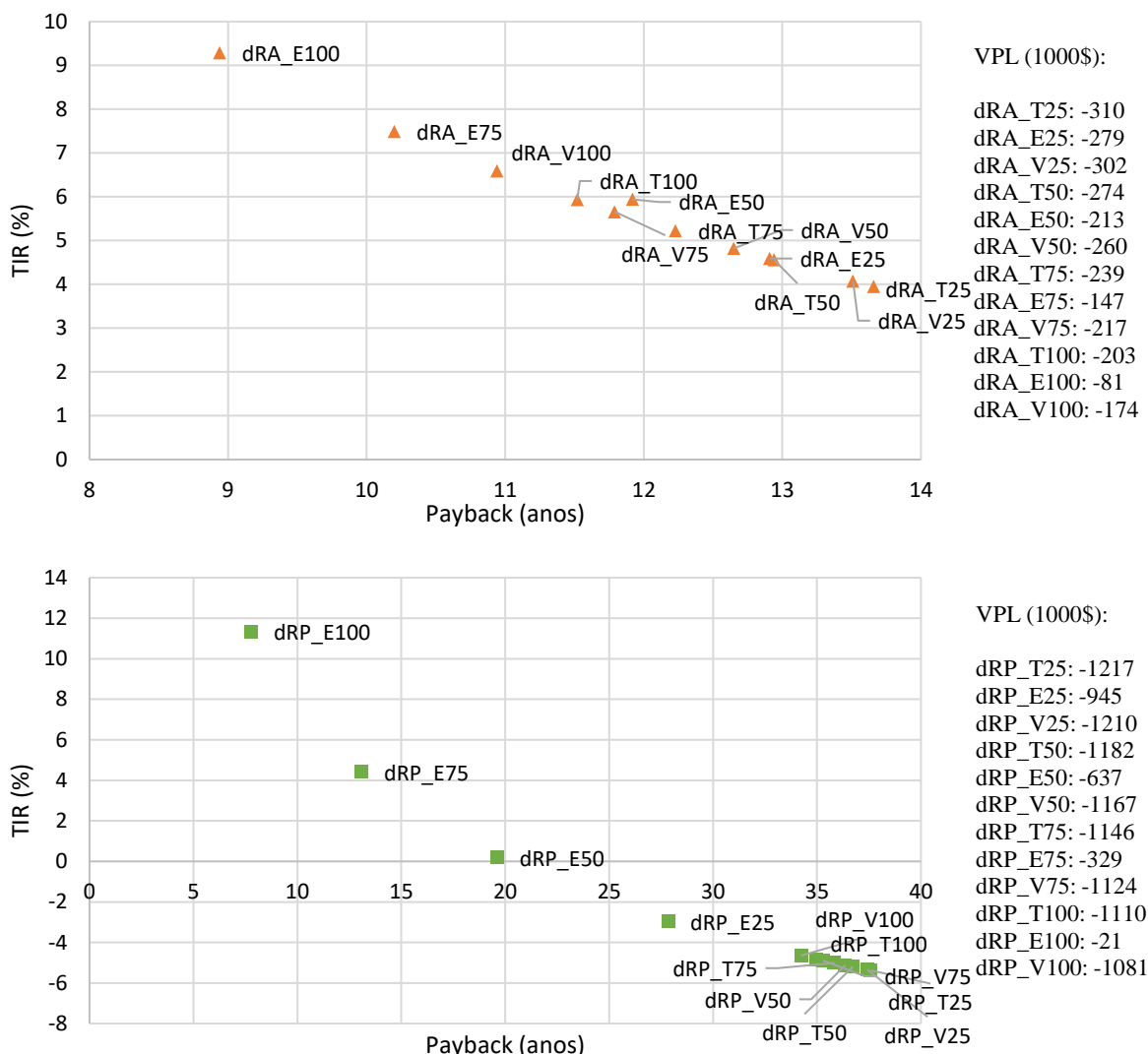
Figura 48 – Indicadores econômicos conforme variação de dados de entrada: Impostos sobre a receita, Transporte e Subsídio do governo.



a: variação do imposto sobre a receita (0%, 5%, 10% e 15%); b: variação das distâncias de transporte do RCD; c: variação do subsídio do governo por tonelada recebida (US\$ 0,25, US\$ 0,50, US\$ 0,75 e US\$ 1,00); RA: Reciclagem Atual; RP: Reciclagem Proposta; i: custo de transporte US\$ 0,10 toneladas/km; ii: exclusão do custo do Transporte para o local de uso; iii: exclusão de ambos os dados de Transporte.

Fonte: o Autor.

Figura 49 – Indicadores econômicos conforme variação de dados de entrada de Aquisição do Terreno, Equipamentos e Veículos. Gráficos representando os métodos de Reciclagem Atual (RA) e Reciclagem Proposta (RP) avaliados, respectivamente.



d: redução dos custos de aquisição do Terreno, Equipamento e Veículos (25%, 50%, 75% e 100%).
 Fonte: o Autor.

Os resultados da análise de soluções alternativas sugerem uma gama maior de possibilidade de alcance de indicadores econômicos mais atrativos na Reciclagem Atual. A proposta de exclusão de impostos sobre a receita da venda dos agregados reciclados (aRA_0%), e a exclusão dos custos de transporte da origem de geração do RCD para a planta e dos agregados reciclados da planta para o local de uso (bRA_iii) atingem valores de TIR próximo ao sugerido para este tipo de atividade (12%), com *Payback* próximos a 8 e 6 anos, respectivamente. Assim, estas soluções alternativas atingem valores que ainda necessitam do tomador de decisão a escolha por aceitar ou não o risco associado ao investimento no negócio.

Outras propostas de soluções alternativas para a Reciclagem Atual, como a redução de Impostos sobre a venda para 5% do (aRA_5%), a redução do custo de transporte (bRA_i), a exclusão do custo do Transporte para o local de uso (bRAiii) e a isenção da aquisição de Equipamentos (dRA_E100) tem valores de TIR entre 8% e 10%, desta forma apesar de não atingir o valor sugerido para o tipo de negócio (12%) estão próximos deste, permitindo ao tomador de decisão aceitar ou não o risco.

O Cenário Proposto somente atinge TIR próximos ao sugerido para a atividade de reciclagem de RCD na isenção da aquisição de Equipamentos (dCP_E100), com TIR de 11,3% com *Payback* próximo a 8 anos. As demais soluções alternativas propostas alcançam resultados que superam a TMA no Cenário Proposto.

4.4. INTENSIDADE DE IMPACTOS DOS CENÁRIOS DE RECICLAGEM DO RCD BRASILEIRO

A análise da Intensidade de Impacto dos processos de Reciclagem Atual (RA) e Proposto (RP) consideram os indicadores Custo unitário de produção, TIR e *Payback*. A interação destes três indicadores econômicos com os impactos ambientais analisa a relação impacto ambiental/custo, com a finalidade de identificar cenários economicamente e ambientalmente mais atrativos.

Inicialmente é avaliada a relação dos impactos ambientais (cada indicador) com o custo unitário de produção de agregados graúdos reciclados. O custo unitário de produção de 1 (uma) tonelada de agregado reciclado produzido nos RA e no RP são calculados conforme a Equação 12, servindo de base para a etapa posterior de avaliação da Intensidade de Impacto dos cenários de reciclagem (Atual e Proposto). Os resultados sugerem US\$ 1,21/tonelada para a RA e US\$ 1,70/tonelada para a RP. O AGN, por sua vez, tem custo unitário de produção estimado de US\$ 2,20/tonelada, conforme dados disponíveis por De Paula et al. (2017) e Cabral e Araújo (2015).

Como pode ser visto na Figura 50, a maioria das relações indicadores ambientais/indicadores econômicos da Reciclagem Atual e Proposto estão localizados fora da zona (verde), que representa menor intensidade de impacto com relação à produção do AGN.

Como visto no capítulo 4.3.3, Análise dos indicadores econômicos, *Payback* e TIR atingem valores que não justificariam o risco de investimento no negócio de reciclagem de RCD brasileiro, conforme as características dos métodos de Reciclagem Atual e Proposto. De modo equivalente, o uso destes indicadores na análise da Intensidade de Impacto, dada pela relação

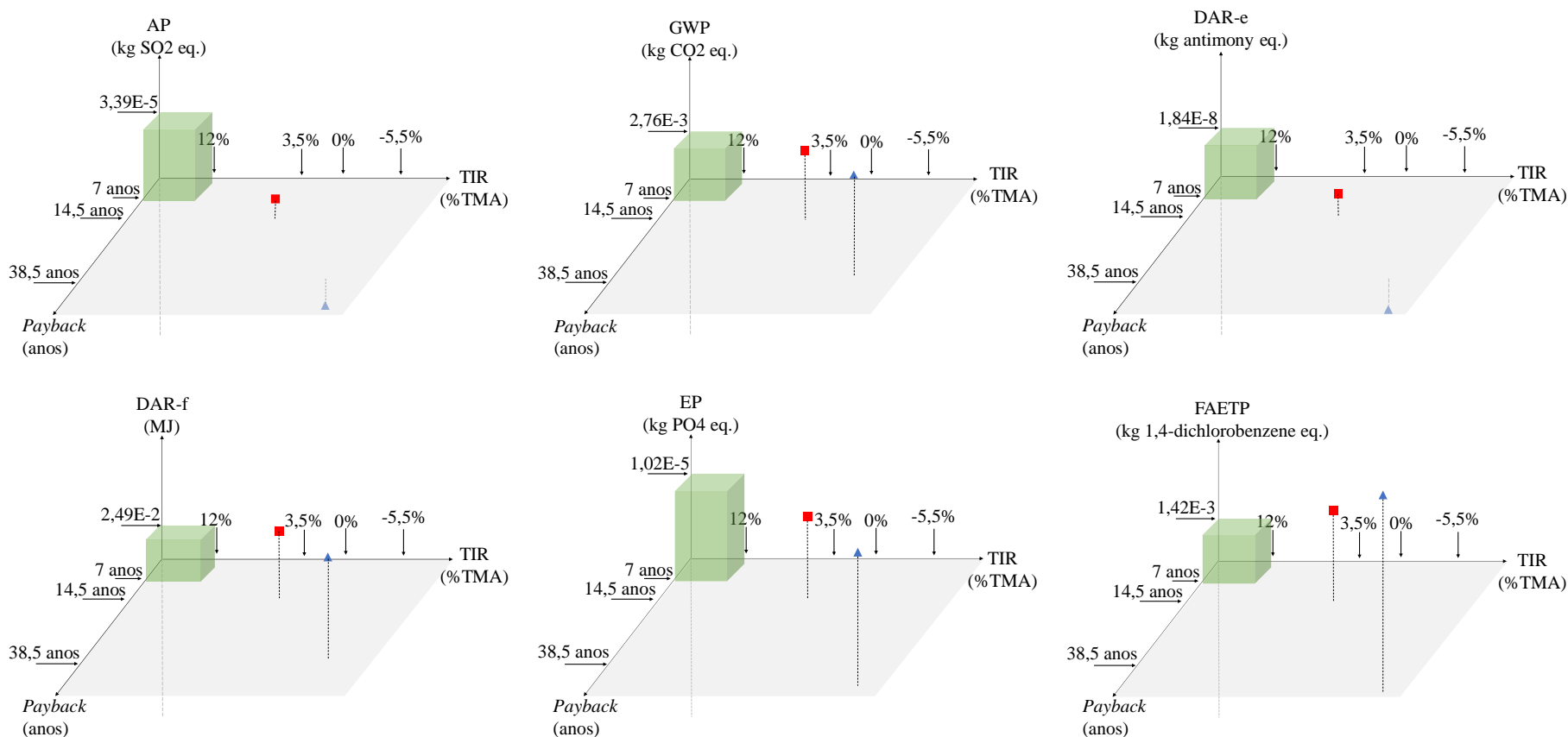
indicador ambiental/indicador econômico, atinge resultados menos atrativos, uma vez que os indicadores econômicos têm seus valores mantidos quando variados os indicadores ambientais, como pode ser visto na Figura 50. É utilizado como referência para o *Payback* o valor médio dentre os sugeridos por Huang et al. (2002), Neto et al. (2017) e Di Maria et al. (2018), igual a 7% e TIR de 12% conforme Petter (2015) e Doan (2016).

Os resultados ilustrados nos gráficos da Figura 50 permitem identificar a possibilidade de alcance de valores de Intensidade de Impacto mais atrativos que o agregado graúdo natural (AGN) na maioria das relações avaliadas. Para tal, se faz necessário, entretanto, a aplicação das soluções alternativas apresentadas e discutidas em 4.3.4.

Ambos os cenários (RA e RP) somente atingirão valores de Intensidade de Impacto próximo ao do AGN quando da isenção dos custos de transporte, para a RA, ou a isenção da aquisição dos equipamentos, na RP. Assim, os resultados revelam que o atual método de reciclagem de RCD tem como um dos seus gargalos, considerando o critério de Intensidade de Impacto, semelhante aos identificados por Tishcer et al. (2013), Mah et al. (2018) e Zhang et al. (2018).

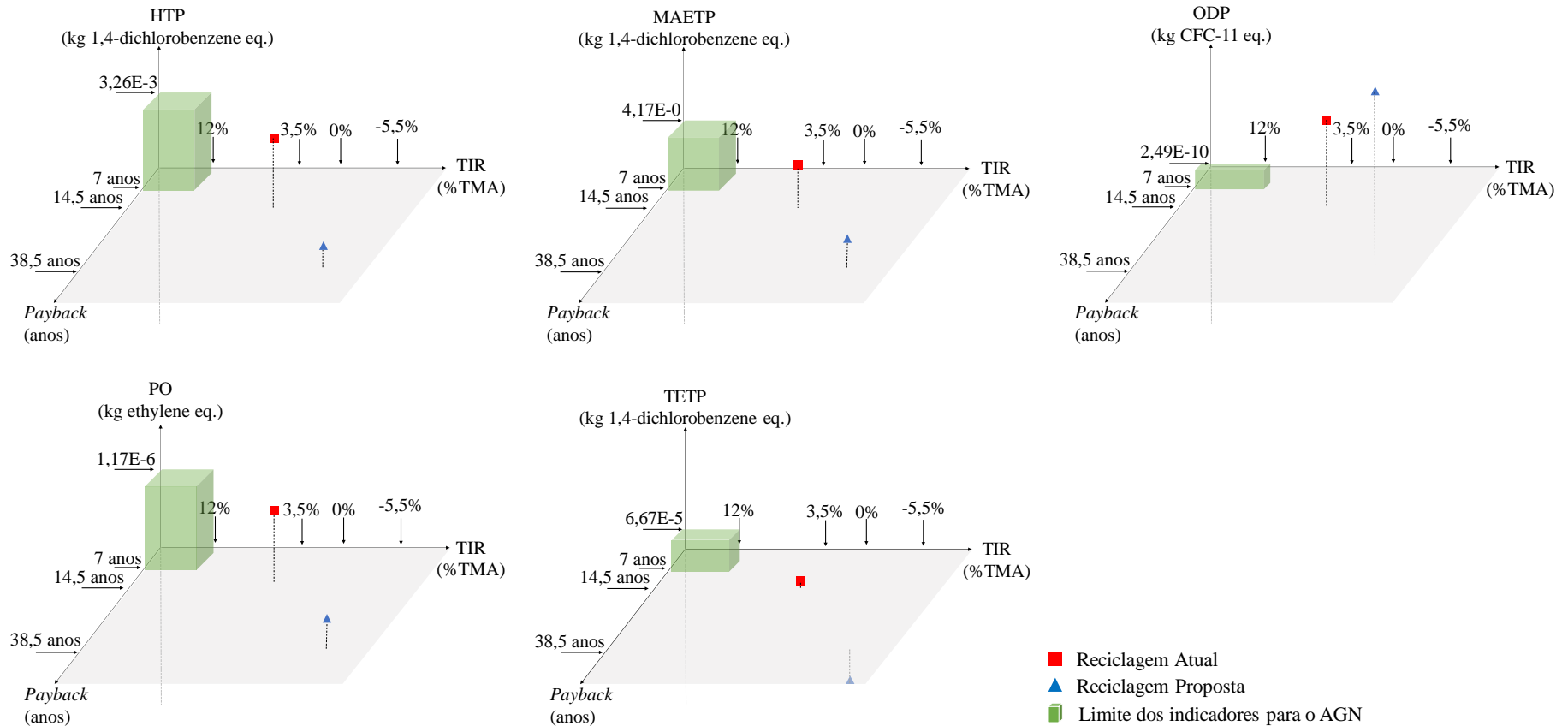
Ainda que já seja conhecido que os custos de equipamentos seja um dos principais contribuintes aos custos da reciclagem do RCD (HUANG et al., 2002; WANG et al., 2004; CHAVES, 2015; DURAN et al., 2006; e GALÁN et al., 2013), os resultados da análise de Intensidade de Impacto da RP revelam que o ingresso do uso do jigue a ar induz acréscimos consideráveis neste indicador.

Figura 50 –Indicadores de Intensidade de Impacto considerando como indicadores econômicos, além do custo unitário de produção, os valores de TIR e Payback. O eixo y representa os indicadores ambientais, que possuem relação equivalente com o agregado natural quando estabelecida a relação impacto ambiental/custo.



Fonte: o Autor.

Figura 50 –Indicadores de Intensidade de Impacto considerando como indicadores econômicos, além do custo unitário de produção, os valores de TIR e Payback. O eixo y representa os indicadores ambientais, que possuem relação equivalente com o agregado natural quando estabelecida a relação impacto ambiental/custo. (continuação...)



AP: Potencial de Acidificação; **ODP:** Depleção da Camada de Ozônio; **DAR-e:** Depleção de recursos abióticos – elementos; **DAR-f:** Depleção de recursos abióticos – combustíveis fósseis; **FAETP:** Ecotoxicidade de água doce; **MAETP:** Ecotoxicidade de água salgada; **TETP:** Ecotoxicidade terrestre; **EP:** Eutrofização; **GWP:** Mudanças Climáticas; **PO:** Oxidação fotoquímica; e **HTP:** Toxicidade humana.

Fonte: o Autor.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a viabilidade técnica, ambiental e econômica do uso do jigue a ar na reciclagem de RCD com características do gerado no Brasil. A análise de viabilidade técnica utilizou de sucessivos ensaios no jigue a ar com RCD gerado para representar o resíduo gerado no Brasil. A Avaliação do Ciclo de Vida foi a ferramenta utilizada para quantificar os impactos ambientais, considerando as 11 categorias de impacto do método CML 2002 *baseline*. A análise de custo foi realizada com base nos indicadores TIR e *Payback*. Os resultados das avaliações ambientais e econômicas foram analisados, ainda, em um contexto de Intensidade de Impacto.

Conclui-se que do ponto de vista técnico é viável utilizar o jigue a ar para a melhoria da qualidade de agregados graúdos reciclados com características do gerado no Brasil. Sua introdução no atual método de reciclagem das plantas de reciclagem resultaria em menores impactos ambientais, se comparado aos resultados do RA e o uso de agregado graúdo natural. Porém, devido ao seu alto custo de aquisição atualmente, seus indicadores econômicos são pouco atrativos ao negócio.

Os resultados desta tese são pioneiros na geração, caracterização e uso do jigue a ar no beneficiamento do RCD com características do gerado no Brasil, permitindo assim a dinâmica entre as propriedades destes agregados e do processo de beneficiamento neste equipamento.

A presença de agregados graúdos Cerâmicos no RCD brasileiro, que possuem forma lamelar em sua maior parte, requer o uso de altas Taxas de expansão (fluxo ascensional de ar) no beneficiamento do RCD com jigue a ar, com a finalidade de aumentar a concentração de agregados graúdos reciclados de Concreto na camada inferior.

A Taxa de expansão é considerada o parâmetro operacional mais relevante para o beneficiamento dos agregados de RCD com características do gerado no Brasil utilizando o jigue a ar como método de beneficiamento gravimétrico. Assim, a aquisição e uso deste equipamento em agregados com características do gerado no Brasil deve observar *a priori* se a potência disponível para o fluxo ascensional atinge valores no mínimo superiores ao identificado neste trabalho, conforme a potência disponível no equipamento utilizado nos testes.

O uso do jigue a ar não altera características dos agregados graúdos reciclados relevantes ao uso na construção civil. Os resultados obtidos na avaliação das propriedades dos agregados graúdos pós beneficiamento evidenciam que os AGRrc, mesmo após o processamento no jigue a ar, mantém distribuição granulométrica próxima à usual pela construção civil, brita 1.

A geração de emissões e as perdas durante o processo de beneficiamento são pouco expressivas quando comparadas à massa total de agregados utilizados nos testes do uso do equipamento. As emissões atmosféricas, no entanto, requerem atenção, uma vez que estão constituídas de partículas menores que 10 micrômetros e 2,5 micrômetros, diâmetro de partículas inaláveis e que podem chegar aos pulmões, respectivamente.

O método de Reciclagem Proposto, que considera o uso do jigue a ar, tem mais benefícios ambientais, se comparado à Reciclagem Atual e à produção de agregado graúdo natural. Os resultados podem ser ainda mais favoráveis à reciclagem se minimizadas as significativas contribuições dos impactos associados ao transporte do RCD da fonte geradora para a planta de reciclagem e/ou da planta de reciclagem para o local de uso (obra).

Conclui-se que o transporte é o principal contribuinte da ACV da reciclagem de RCD conforme o escopo deste trabalho. Ainda assim, devido aos impactos evitados a soma das distâncias de coleta do RCD e envio dos agregados reciclados podem superar 50, 100 ou até 300 km antes de seus impactos superarem os impactos do processo de Reciclagem Atual.

Os métodos de Reciclagem Atual e Proposto analisados para o Brasil somente atingem indicadores econômicos (VPL, TIR, *Payback*) atrativos se adotadas algumas soluções alternativas como a redução de impostos, minimização de custos de transporte, na Reciclagem Atual, ou a concessão dos equipamentos da planta de reciclagem, em ambos os métodos. O uso de Parceria Público Privada, onde são cedidos os equipamentos ao empreendimento, pode tornar os métodos de Reciclagem Atual e Proposto mais atrativos para investidores.

Solução alternativa como a adoção de Subsídio do governo tem efeito pouco significativo nos resultados de ambos os Cenários de reciclagem avaliados. A adoção desta ferramenta somente seria viável a valores impraticáveis de US\$/tonelada.

A análise da Intensidade de Impactos dos métodos de Reciclagem Atual e Proposto, se adotada a relação disponível em parte da literatura (impacto ambiental/custos unitário), minimiza os resultados pouco atrativos dos demais indicadores econômicos. Logo, conclui-se mais adequado o uso da relação impacto ambiental/TIR ou *Payback* para o alcance de resultados mais fidedignos da Intensidade de Impactos da atividade.

Resultados economicamente mais atrativos para a reciclagem de RCD no Brasil podem ser alcançados se revisada a atual TMA desta atividade, principalmente devido aos avanços legais e sociais na busca por soluções ambientalmente mais amigáveis.

O uso de novas tecnologias, como o jigue de ar, deve ser precedido da consolidação do mercado de agregados reciclados no Brasil. Somente assim, acredita-se que pode haver uma maior demanda por agregados reciclados de maior qualidade para usos mais nobres.

6. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Algumas das lacunas que estão ao redor desta tese são traduzidas na forma de propostas de trabalhos futuros, conforme descrito a seguir:

- a. avaliar o uso dos processos unitários de reciclagem atuais ou outros alternativos na alteração/controle das propriedades físicas do RCD para induzir a melhores resultados de beneficiamento gravimétrico no jigue a ar;
- b. realizar inventário nacional das plantas de reciclagem de RCD para a aperfeiçoamento da Avaliação do Ciclo de Vida deste tipo de atividade;
- c. estudar o cenário econômico do mercado do RCD brasileiro com a finalidade de aferir os valores de risco de investimento do negócio (TMA).

REFERÊNCIAS

ABDELHAMID, M. S. Assessment of different construction and demolition waste management approaches. **HBRC Journal**. 10 (3) 317 – 326, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação — Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

_____. **NBR 7809**: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR 7.211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro 2009a.

_____. **NBR 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009b.

_____. **NBR 14044**: Avaliação do ciclo de vida - requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009c.

_____. **NBR 15.116**: Agregados reciclados de resíduos da construção civil – Utilização em pavimentos e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004b.

_____. **NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2017a.

_____. **NBR 15270-2**: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria Parte 2: Métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2017b.

_____. **NBR 15310**: Componentes cerâmicos - Telhas - Terminologia, requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2009d.

ABRECON – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. Relatório. Pesquisa Setorial 204/2015.A **Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição no Brasil**. Abrecon, São Paulo-SP , 2015.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017. Edição especial de 15 anos**. Brasil, 2017.

ADAMS, M.P. ; FU, T. ; CABRERA, A.G. ; MORALES, M. ; IDEKER, J.H. ; ISGOR, O.B. Cracking susceptibility of concrete made with coarse recycled concrete aggregates. **Construction Building Materials**. 102. 802-810. 2016.

AFSHAR, T.; DISFANI, M. M.; ARULRAJAH, A.; et al. Impact of Particle Shape on Breakage of Recycled Construction and Demolition Aggregates. **Powder Technology**, v. 308, p. 1–12, 2017.

AMBRÓS, W. M.; CAZACLIU, B. G.; SAMPAIO, C. H.,. Wall effects on particle separation in air jigs. **Powder Technology**. 301, 2016, p.369–378.

AMBRÓS, W. **Novos aspectos da estratificação de partículas em jiges descontínuos**. Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. 2017.

AMBRÓS, W.M.; SAMPAIO, C.H.; CAZACLIU, B. G.; et al. Usage of air jigging for multi-component separation of construction and demolition waste. **Waste Management**. v. 60. 2017. p. 75–83.

ÂNGULO, S.C; TEIXEIRA, C.E.; de CASTRO, A.L.; NOGUEIRA, T.P., Construction and demolition waste: evaluation of quantification methods. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, 16-3, 2011, 299-306.

AUER, J.; BEY, N.; SCHÄFER, J.M. Combined Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing in the Eco-Care-Matrix: A case study on the performance of a modernized manufacturing system for glass containers. **Journal of Cleaner Production**, 141, 2017, p. 99-109.

BERNARDES, A.; THOMÉ, A.; PRIETTO, P.D.M.; ABREU, Ag.G. Quantificação e classificação de resíduos de construção e demolição coletados em Passo Fundo, RS. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 3, p. 65-76, jul./out. . 2008.

BLENGINI, G.A. 2009. Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: a case study in Turin, Italy. **Building and Environment**. 44 (2), 2009. p. 319–330.

BOHNE, R.A.; BRATTEBØ, H.; BERGSDAL, H. Dynamic eco-efficiency projections for construction and demolition waste recycling strategies at the city level. **Journal of Industrial Ecology**. 12 (1), 2008. p. 52-68.

BOVEA, M.D.; POWEL, J.C. Developments in life cycle assessment applied to evaluate the environmental performance of construction and demolition wastes. **Waste Management** , 50. 2016, p. 151-72.

BRASIL. Lei Federal 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União** em 03 de ago.2010. 2010.

BUTERA, S.; CHRISTENSEN, T.H.; ASTRUP, T.F. Life cycle assessment of construction and demolition waste management. **Waste Management**. 44. 2015. p. 196-205

CABRAL, A.E.B. **Modelagem de Propriedades Mecânicas e de Durabilidade de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados, Considerando-se a Variabilidade da**

Composição do RCD. 258 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CABRAL, B.V.; ARAÚJO, M.F. **Valorização de uma Pedreira pelo Método doo Fluxo de Caixa Descontado.** Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Produção da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

CARPENTER, A., JAMBECK, J.R., GARDNER, K., WEITZ, K.,. Life cycle assessment of end-of-life management options for construction and demolition debris. **Journal of Industrial Ecology.** 17 (3). 2013. p. 396–406.

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

CAZACLIU, B.; SAMPAIO, C. H.; MILTZAREK, G.; et al. The potential of using air jiggling to sort recycled aggregates. **Journal of Cleaner Production**, 66, 2014, p. 46 – 53.

CEMPRE – COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA A REICLAGEM. **Cempre Informa Número 136 julho/agosto.** Material Reciclável. 2019.

CHAVES, A.C.Z. **Viabilidade econômica de uma usina de reciclagem de resíduos da construção civil em Araçatuba, SP.** Dissertação de Especialização. Departamento de Economia Rural e Extensão, Setor de Ciências Agrária. Universidade Federal do Paraná, Brazil. 2015.

COELHO, A.; BRITO, J. de. Influence of construction and demolition waste management on the environmental impact of buildings. **Waste Management.** 32. 2012. p. 532-541.

COELHO, A.; BRITO, J..Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – Part I: Energy consumption and CO₂ emissions. **Waste Management.** 33, 2013a, p. 1258–1267.

COLODEL CMT (2008). Systematic approach for the transferability of life cycle inventory data between countries. International Conference on EcoBalance, Tokio, Japan, 10-12 Dez. 2008. **Anais do....**, 2018.

CONDEIXA, K., HADDAD, A., BOER, D. Life cycle impact assessment of masonry system as inner walls: a case study in Brazil. **Constr. Build. Mater.** 70. 2014. p. 141-147.

CORONADO, M.; DOSAL, E.; COZ, A.; et al. Estimation of construction and demolition waste (C&DW) Generation and multicriteria analysis of C&DW management alternatives: A case study in Spain. **Waste and Biomass Valorization**, 2. 2011, p. 209–225.

CORRÊA, B. C., CURSINO, D., SILVA, G. Viabilidade de Implantação de uma Usina de Reciclagem da Construção Civil na Cidade de São José dos Campos/SP. XIII Encontro Latino-Americano de Iniciação Científica e IX Encontro Latino-Americano de Pós-Graduação. **Anais [...]**. Universidade do Vale do Paraíba. 2009.

DAHLBO, H., BACHÉR, J., LÄHTINEN, K., JOUTTIJÄRVI, T., SUOHEIMO, P., MATTILA, T., SIRONEN, S., MYLLYMAA, T., SARAMÄKI, K. Construction and demolition waste management - A holistic evaluation of environmental performance. **Journal of Cleaner Production**. 107. 2015. p. 333-341.

De PAULA, G.; ENGEL, W.; KOCHEN, R.M.; QUEIROZ, S.S. Análise de custos de recursos naturais: estudo de caso de em empresa de produtos de mineração na região oeste do Paraná. Congresso Internacional de Administração. **Anais [...]**, 2017.

DI MARIA, A.; EYCKMANS, J.; VAN ACKER, K. Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making. **Waste Management** . 2018. No prelo.

DING, Z.; WANG, Y.; ZOU, P.X. W. An agent based environmental impact assessment of building demolition waste management: Conventional versus green management. **Journal of Cleaner Production**. 133. 2016. p. 1136-1153.

DOAN, D. Modeling Construction and Demolition Waste Recycling Program in Bangkok: Benefit and Cost Analysis. **Journal of Construction Engineering and Management**. 142 (12). 2016.

DOKA, G. **Life cycle inventories of waste treatment services**. Final report ecoinvent. 2003.

DURAN, X., LENIHAN, H., O'REGAN, B. A model for assessing the economic viability of construction and demolition waste recycling - The case of Ireland. **Resources, Conservation and Recycling**. 46 (3). 2006. p. 302-320.

EARLES, J.M., HALOG, A. Consequential life cycle assessment: a review. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. 16, 2011. p. 445–453.

EKVALL, T.; WEIDEMA, B.P. System boundaries and input data in consequential life cycle inventory analysis. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 9, 2004. 161-171.

EUROPEAN COMMISSION. **Resource Efficient Use of Mixed Wastes**: Improving management of construction and demolition waste. Final Report. October 2017.

FALESCHINI, F., ZANINI, M.A., PELLEGRINO, C., PASINATO, S. Sustainable management and supply of natural and recycled aggregates in a medium-size integrated plant. **Waste Management**. 49, 2016. p. 146-155.

FERRÁNDEZ-GARCÍA, A., IBÁÑEZ-FORÉS, V., BOVEA, M.D., 2016. Eco-efficiency analysis of the life cycle of interior partition walls: a comparison of alternative solutions. **Journal of Cleaner Production**. 112 (1), 649–665.

FONSECA, T.D.S., RIBEIRO JUNIOR, L.U. Avaliação da Viabilidade de Implantação Técnica e Econômica da uma Usina de Reciclagem de Resíduos Sólidos da Construção Civil em Itajubá-MG. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.7, n.1, 2018. p. 133-144.

FU, P.; LI, H.; WANG, X.; LUO, J.; ZHAN, S.L.; Zuo, C. Multiobjective Location Model Design Based on Government Subsidy in the Recycling of CDW. **Mathematical Problems in Engineering**. 2017.

GALAN, B., DOSAL, E., ANDRÉS, A., VIGURI, J. Optimisation of the construction and demolition waste management facilities location in Cantabria (Spain) under economical and environmental criteria. **Waste and Biomass Valorization**. 4 (4), 2013. p. 797-808.

GHISELLINI, P.; RIPA, M.; ULGIATI, S. Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review. **Journal of Cleaner Production**. 178. 2018. p.618-643.

GOMES, A.P.W., FIORAVANTE, A.S.A., GOMES, A.P. Análise de viabilidade econômica da implantação de uma usina de reciclagem de resíduos de construção civil em Viçosa-MG. **Seminar: Strategic Management**. Ponta Grossa/PR, Brazil. 2015.

GUIGNOT S.; TOUZÉ, S.; VON DER WEID, F.; MÉNARD, Y.; VILLENEUVE, J. Recycling Construction and Demolition Wastes as Building Materials: A Life Cycle Assessment. **Journal of Industrial Ecology**. 19 (6). 2015. 1030-1043.

HACKENHAAR, I.C., WASKOW, R.P., TUBINO, R.M.C., PASSUELLO, A. Life Cycle Assessment applied to Construction and demolition waste treatment: scenario analysis based on Ecoinvent® background database. **In Sustainable Built Environmental D-A-CH Conference**. 11-14 September, 2019. Austria.

HUANG, W., LIN, D., CHANG, N., LIN, K. Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process. **Resources, Conservation and Recycling** 37, 2002. p. 23-37.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA – IBICT. **Desenvolvimento Sustentável e Avaliação do Ciclo de Vida**. IBICT / CNI. Brasília, DF. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA - IBICT. **Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o Contexto Brasileiro (RAICV)**. Organização, Cássia Maria Lie Ugaya, José Adolfo de Almeida Neto e Maria Cléa Brito de Figueiredo . — Brasília, DF : Ibict, 2019. 165 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. TECHNICAL REPORT – TR. ISO/TR **14047:2012**. Environmental management - Life cycle assessment -- Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations. 2012.

JADOVSKI, I., MASUERO, A.B. Estudo dos custos de implantação, operação, e manutenção de usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição. Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Resíduos e Desenvolvimento Sustentável (ICTR 2004). **Anais do...** Florianópolis/SC, Brazil. 2004.

JIMÉNEZ, J.R., AYUSO, J., LÓPEZ, M., FERNÁNDEZ, J.M., de BRITO, J. Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. **Construction and Building Materials**. 40, 2013. p. 679–690.

KANNO, R., WASKOW, R.P., TUBINO, R.M.C. CDW Quantification in The Several Stages of Life of a Building: Identification and Characterization of The Main Methods. **Mix Sustentável**. v. 6 (1). 2019. P. 67-75.

KIM, H., TENREIRO, C., AHN, T.K. 2D representation of life cycle greenhouse gas emission and life cycle cost of energy conversion for various energy resources. **Korean Journal of Chemical Engineering**. 10, 2013. p. 1882-1888.

KLANG, A.; VIKMAN, P.-A.; BRATTEBI, H. Sustainable management of demolition waste—an integrated model for the evaluation of environmental, economic and social aspects. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 38 (4). 2003. p. 317-334.

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

KOWOL, D.; MATUSIAK, P.. Badania Skuteczności Osadzarkowego Oczyszczania Kruszywa z Ziaren Węglanowych. *Mining Science: Mineral Aggregates*, Wrocław, v. 22, 2015. p.83-92.

KUHN, C., BRUM, E.M., BERTICELLI, R., PANDOLFO, A., PASQUALI, P.B. Análise de Viabilidade Econômica de uma Usina de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil (In portuguese). **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**. 6 (2). 2017. p. 478-494.

KURDA, R.; SILVESTRE, J.D.; de BRITO, J. Life cycle assessment of concrete made with high volume of recycled concrete aggregates and fly ash. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 139, Dez. 2018. p. 407-417.

LAURENT, A., CLAVREUL, J., BERNSTAD, A., BAKAS, I., NIERO, M., GENTIL, E., Christensen, T.H., Hauschild, M.Z. Review of LCA studies of solid waste management systems—Part II: methodological guidance for a better practice. **Waste Management**. 34 (3), 2014. p. 589–606.

LEITE, M.B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Recicladados de Resíduos de Construção e Demolição**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, RS. 2001.

LEITE, F. C. **Comportamento Mecânico de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil de Base e Sub-Base de Pavimentos**. São Paulo, 2007. 216f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

LIU, J.; XIAO, Y.; WANG, D.; PANG, Y. Optimization of site selection for construction and demolition waste recycling plant using genetic algorithm. **Neural Computing and Applications**. 31 (s1). 2019. p. 233-245.

LORENZO-TOJA, Y., VAZQUEZ-ROWE, I., AMORES, M.J., TERMES-RIFE, M., MARÍN-NAVARRO, D., MOREIRA, M.T., FEIJOO, G. Benchmarking wastewater treatment plants under an eco-efficiency perspective. **Science of the Total Environment**. 2016. P. 468e479.

LOVATO, P.S. **Verificação dos Parâmetros de Controle de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição para Utilização em Concreto**. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MAH, C. M.; FUJIWARA, T.; HO, C.S. Life cycle assessment and life cycle costing toward eco-efficiency concrete waste management in Malaysia. **Journal of Cleaner Production**, 172. 2018, p. 3415-3427.

MAHESHI, D.; STEVEN, V.P.; KAREL, V.A. Environmental and economic assessment of 'open waste dump' mining in Sri Lanka. **Resources, Conservation and Recycling**. 102. 2015. p. 67-79.

MANFRINATO, J.W.S., ESGUÍCERO, F.J., MARTINS, B.L. Implementation of Plant for Recycling of Civil Construction Waste (CDW) as an Action for Sustainable Development – Case Study. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. A integração de cadeias produtivas com a abordagem de fabricação sustentável. **Anais do...** Rio de Janeiro/RJ, Brazil. 2008.

MARINKOVIC, S., RADONJANIN, V., MALEŠEV, M., IGNJATOVIC, I. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. **Waste Management**, vol. 30, n. 11, 2010. p. 2255-2264.

MARTINEZ-SANCHEZ, V., KROMANN, M. A., ASTRUP, T. F. Life cycle costing of waste management systems: Overview, calculation principles and case studies. **Waste Management**. 36, 2015. p. 343-355.

MCGINNIS, M.J., DAVIS, M., de la ROSA, A., WELDON, B.D., KURAMA, Y.C. Strength and stiffness of concrete with recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**. 154, 258–269. 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedade e Materiais**. 2ª Edição. São Paulo: IBRACON, p. 751, 2014.

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

MIAH, J.H.; KOH, S.C.L.; STONE, D. A hybridised framework combining integrated methods for environmental Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing. **Journal of Cleaner Production**, 168. 2017, p. 846-866.

MIRANDA, L.F.R.; ÂNGULO, S.C.; CARELI, E.D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 57-71, jan./mar. 2009.

MORAGA, G., MORALES, M.F.D., KIRCHHEIM, A.P., PASSUELLO, A. **Relatório técnico de adaptação de dados de Inventário de Ciclo de Vida de materiais de construção**. Porto Alegre. 2018.

MORALES, M., MORAGA, G., KIRCHHEIM, A.P., PASSUELLO, A. Regionalized inventory data in LCA of public housing: A comparison between two conventional typologies in southern Brazil. **Journal of Cleaner Production**. v. 238, 2019.

NAGATAKI, S., GOKCE, A., SAEKI, T., HISADA, M., Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, 34, 6. 2004.

NETO, R.O.; GASTINEAU, P.; CAZACLIU, B.G.; LE GUEN, L.; PARANHOS, R.S.; PETTER, C.O. An economic analysis of the processing technologies in CDW recycling platforms. **Waste Management**. 60. 2017. p. 277-289.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. 5ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OLIVEIRA, L. A. et al. Adapting existing life cycle inventory of building products for the Brazilian context. In: SUSTAINABLE BUILDING CONFERENCE, 2013. **Anais [...]**. Graz, Austria, 2013. p. 25-28.

PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V. W. Y.; LABRINCHA, J. A. **Handbook of recycled concrete and demolition waste**. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: Number 47. 2013.

PAIVA, E.C.R., SILVA, C.M. BERNARDES, S.D. Economic Feasibility of a Bulk Recycling Department in Catalan -GO. III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. **Anais do...** Goiânia/GO, Brazil. 2012.

PEDRO, D., de BRITO, J., EVANGELISTA, L., Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. **Construction and Building Materials**, 71. 2014. p. 141-151.

PENTEADO, C.; ROSADO, L. Comparison of scenarios for the integrated management of construction and demolition waste by life cycle assessment: A case study in Brazil. **Waste Management and Research**. 34 (10). 2016. p. 1026-1035.

PETTER, R.A. **A técnica de análise de risco econômico aplicada a diferentes cenários de investimento. Estudo de caso: Mineração de elementos de terras raras Reciclagem de rejeitos de demolição e construção civil**. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2015.

PIEPENBRIN, M., KICHERER, A. **Making sustainability of plastics measurable**. *Kunstst. Plast. Eur.* 94, 2004. p. 32-34.

PINTO, T. P., GONZÁLES, J. LR., **Manejo e gestão de resíduos da construção civil**. Manual de orientação: como implantar um sistema de manejo e gestão nos municípios. 2005.

PITA, F.; CASTILHO, A. Influence of shape and size of the particles on jigging separation of plastics mixture. **Waste Management**, [s.l.], v. 48, p.89-94, fev. 2016.

QUEHEILLE, E., TAILLANDIER, F., SAIYOURI, N. Optimization of strategy planning for building deconstruction. **Automation in Construction**. 98, 2019. p. 236-247.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais da Construção Civil**. 2ª Edição. Belo Horizonte: editora UFMG, 2003.

RODRIGUEZ, g.; MEDINA, c.; ALEGRE, f.j.; ASENSIO, e.; SANCHES de ROJAS, m.i. Assessment of Construction and Demolition Waste plant management in Spain: in pursuit of sustainability and eco-efficiency. **Journal of Cleaner Production**. v. 90 (1). 2015. p. 16-24.

ROSADO, C.; PEIXOTO, L. Environmental performance evaluation of an inter-municipal consortium of construction and demolition waste. Sixteenth International Waste Management and Landfill Symposium. **Anais [...]**. 2017. 10 p.

RÜDENAUER, I.; GENSCHE, C.O.; GRIEBHAMMER, R.; BUNKE, D. Integrated Environmental and Economic Assessment of Products and Processes. **Journal of Industrial Ecology**. 9 (4). 2005. p. 105-116.

SAADE, M.R.M.; da SILVA, M.G.; da SILVA, V.G. A novel perspective on the avoided burden approach applied to steel-cement making joint system. Sustainable Built Environment (SBE) Regional Conference Zurich 2016. **Anais do...** 2016. p. 310-314.

SAMPAIO, C. H.; CAZACLIU, B. G.; MILTZAREK, G. L.; et al. Stratification in airjigs of concrete/brick/gypsum particles. **Construction and Building Materials**. 109, 63–72. 2016.

SAMPAIO, C.H.; TAVARES, L.M.M. **Beneficiamento Gravimétrico. Uma introdução aos processo de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade**. Editora UFRGS, 2005.

SANDIN, G., PETERS, G.M., SVANSTRÖM, M. Life cycle assessment of construction materials: the influence of assumptions in end-of-life modelling. **International Journal of Life Cycle Assessment**. 19 (4), 2014. p. 723–731.

SILVA, B.A.; FERREIRA PINTO, A.P.; GOMES, A. Influence of natural hydraulic lime content on the properties of aerial lime-based mortars. **Construction and Building Materials**. 72. 2014. p. 208–218.

SCOTT HOOD, R. S., 2006. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre.

SILGADO, S.S.; VALDIVIEZO, L.C. DOMINGO, S.G.; ROCA, X. Multi-criteria decision analysis to assess the environmental and economic performance of using recycled gypsum cement and recycled aggregate to produce concrete: The case of Catalonia (Spain). **Resources, Conservation and Recycling**. v. 133, Jun. 2018. p. 120-131.

SIMION, I.M., FORTUNA, M.E., BONOLI, A., GAVRILESCU, M. Comparing environmental impacts of natural inert and recycled construction and demolition waste processing using LCA. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**. 21 (4), 2013a. p. 273–287.

SIMION, I.M., GHINEA, C., MAXINEASA, S.G., TARANU, N., BONOLI, A., GAVRILESCU, M. **Environmental Engineering and Management Journal**. 12 (4), 2013b. p. 779–788.

SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. Acesso em: jun. 2019. Disponível em in: <http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/Paginas/default.aspx>. Acesso em jul. 2019.

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES PARA O SANEAMENTO. **Série Histórica**. 2017. Disponível em: < <http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em jul. 2018.

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES PARA O SANEAMENTO. **Série Histórica**. 2018. Disponível em: < <http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em jul. 2018.

SOBOTKA, A.; SAGAN, J. Cost-saving Environmental Activities on Construction Site - Cost Efficiency of Waste Management: Case Study. **Procedia Engineering**. 161. 2016. p. 388-393.

TILLMAN A.M. Significance of decision-making for LCA method- ology. **Environmental Impact Assessment Review**. 20. 2000. p. 113–123.

Tischer, A.; Besiou, M.; Graubner, C.-A. Efficient waste management in construction logistics: a refurbishment case study. **International Journal of Logistics-Research and Applications**. 6, 2013. p. 159–171.

TROCHU, J.; CHAABANE, A.; OUHIMMOU, M. A carbon-constrained stochastic model for eco-efficient reverse logistics network design under environmental regulations in the CRD industry. **Journal of Cleaner Production**. v. 245 (1). 2020.

TURK, J., COTIC, Z., MLADENOVIC, A., SAJNA, A. Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. **Waste Management**. 45. 2015. p. 194-205.

UNEP/SETAC. **Towards a Life Cycle Sustainability Assessment**. United Nations Environment Programme/Society of Environmental Toxicology and Chemistry, Paris, France. 2011.

VIEIRA, P.S., HORVATH, A., 2008. Assessing the end-of-life impacts of buildings. **Environmental Science & Technology**. 42, 4663e4669.

VITALE P., ARENA N., GREGORIO F., ARENA, U. Life cycle assessment of the end-of-life phase of a residential building. **Waste Management**, vol. 60, 2017. p. 311-321.

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

WANG, J. Y., TOURAN, A., CHRISTOFOROU, C., FADLALLA, H. A systems analysis tool for construction and demolition wastes management. **Waste Management**. 24 (10), 2004. p.989-997.

WASKOW, R.P.; GSCHWENTER, V. L.; TUBINO, R.M.C., Projeto amostral para resíduos brasileiros de construção e demolição. VII Seminário de Inovação e Tecnologia IFSul. **Anais do...**, Porto Alegre, Brazil, 2018a.

WASKOW, R. P.; PASSUELLO, A.; TUBINO, R. M. C. Principal fonte de incerteza na avaliação do ciclo de vida de resíduos de construção e demolição. VI Congresso Brasileiro de Gestão do Ciclo de Vida – GCV. **Anais do...** 2018b.

WASKOW, R.P., SANTOS, V. L. G., KANNO, R., TUBINO, R.M.C. Cost Assessment of the Brazilian Construction and Demolition Waste Recycling Plant: A Case Study of Porto Alegre. **Revista Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS)**. 2019. No prelo.

WEIDEMA, B. **Market information in life cycle assessment**. Environmental Project No. 863. Denmark. 2003.

WEIDEMA, B.; HISCHIER, R.; ALTHAUSA, H.; BAUER, C.; DOKA, G.; DONES, R.; RISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N.; NEMECEK, T.; PRIMAS, A.; WERNET, G. Ecoinvent Report n. 02. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories. 2009.

WEIDMANN, D.F. **Contribuição ao estudo da Influência da Forma e da Composição Granulométrica de Agregados Miúdos de Britagem nas Propriedades do Concreto de Cimento**. Florianópolis, 2008. 295f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós Graduação em Eng. Civil – UFSC. Florianópolis, 2008.

WERNET, G.; BAUER, C.; STEUBING, B.; REINHARD, J.; MORENO-RUIZ, E.; WEIDEMA, B. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. **International Journal of Life Cycle Assessment**. 21 (9). 2016. p. 1218-1230.

WIJAYASUNDARA, M., MENDIS, P., CRAWFORD, R.H. Methodology for the integrated assessment on the use of recycled concrete aggregate replacing natural aggregate in structural concrete. **Journal of Cleaner Production**. 166, 2017. p. 321–334.

WILLS, B.A. **Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**. 7. ed. Cornwall, Uk: Butterworth-heinemann, 2006.

XUAN, D.; POON, C.S.; ZHENG, W. Management and sustainable utilization of processing wastes from ready-mixed concrete plants in construction: A review. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 136, Set. 2018. p. 238-247.

XUE, J. Indicators of decoupling housing-related environmental impacts from economic growth. **Journal of Housing and the Built Environment**. 27. 2012. p. 495–516.

YAZDANBAKHSI, A. BANK, L.C.; BAEZ, T.; WERNICK, I. Comparative LCA of concrete with natural and recycled coarse aggregate in the New York City area. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. June 2018, Volume 23, Issue 6, pp 1163–1173.

YUAN, H. P.; SHEN, L. Y.; HAO, J.J.L.; LU, W. S. A model for cost-benefit analysis of construction and demolition waste management throughout the waste chain. **Resources, Conservation and Recycling**. 55 (6). 2011. p. 604-612.

ZAMAGNI, A.; GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R.; MASONI, P.; RAGGI, A. Lights and shadows in consequential LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. 17. 2012. p. 904–918.

ZANG, C.; HU, M.; DONG, L.; GEBREMARIAM, A.; MIRANDA-XICOTENCATL, B.; Di MARIO, F.; TUKKER, A. Eco-efficiency assessment of technological innovations in high-grade concrete recycling. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 149. 2019. p. 649-66.

ZHAO, W., REN, H., ROTTER, V. S. A system dynamics model for evaluating the alternative of type in construction and demolition waste recycling center - The case of Chongqing, China. **Resources, Conservation and Recycling**. 55 (11), 2004. p. 933-944.

PUBLICAÇÕES RELATIVAS À TESE

WASKOW, R.P.; GSCHWENTER, V. L.; TUBINO, R.M.C., Projeto amostral para resíduos brasileiros de construção e demolição. VII Seminário de Inovação e Tecnologia IFSul. **Anais** [...], Porto Alegre, Brazil, 2018a.

HACKENHAAR, I.C., WASKOW, R.P., TUBINO, R.M.C., PASSUELLO, A. (2019) Life Cycle Assessment applied to Construction and demolition waste treatment: scenario analysis based on Ecoinvent® background database. In: Sustainable Built Environmental D-A-CH Conference. **Anais** [...], Austria. September, 2019. p. 11-14.

CUNHA, M.G.; WASKOW, R.; SANTOS, V.L.G.; KANNO, R.; SILVA, L.A.; TUBINO, R.M.C. Índice de Forma do Agregado Reciclado de Concreto: Comparativo entre EN 933-3:2003 e NBR 7809:2008. LIVX Congresso Brasileiro do Concreto. Bento Gonçalves-RS, Out/Nov, 2017. **Anais** [...]. 2017.

WASKOW, R.P.; PASSUELLO, A.; TUBINO, R.M.C. Principais Fontes de Incerteza na Avaliação do Ciclo de Vida de Resíduos da Construção e Demolição. VI Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida. Brasília-DF, jun. de 2018. **Anais** [...]. 2018.

WASKOW, R.P.; SANTOS, V.L.G.; KANNO, R.; TUBINO, R.M.C. Test for Geometrical Properties of Recycled Aggregates: Comparisons of EN 933-3:2003 and NBR 7809:2008 Standard Test Methods. IV International Conference Progress of Recycling in the Built Environment, Lisboa, Portugal, out. 2018. **Anais** [...]. 2018.

WASKOW, R.P.; PASSUELLO, A.; TUBINO, R.M.C. A Proposal of Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA) in Construction and Demolition Waste (CDW) Management, Considering Technological, Environmental and Economic Aspects. IV International Conference Progress of Recycling in the Built Environment, Lisboa, Portugal, out. 2018. **Anais** [...]. 2018.

WASKOW, R.P., SANTOS, V. L. G., KANNO, R., TUBINO, R.M.C. Cost Assessment of the Brazilian Construction and Demolition Waste Recycling Plant: A Case Study of Porto Alegre. **Revista Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS)**. 2019. No prelo.

WASKOW, R.P.; KANNO, R.; TUBINO, R.M.C. Premises for Eco-Efficiency Analysis on Construction and Demolition Waste Recycling. **Revista Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS)**. 2019. No prelo.

WASKOW, R.P., SANTOS, V. L. G., TUBINO, R.M.C. Delineamento Amostral de Agregados de Construção e Demolição. **Mix Sustentável**. 5 (4), 2019. p. 79-88.

KANNO, R., WASKOW, R.P., TUBINO, R.M.C. CDW Quantification in The Several Stages of Life of a Building: Identification and Characterization of The Main Methods. **Mix Sustentável**. v. 6 (1). 2019. P. 67-75.

GLOSSÁRIO

Intensidade de Impacto: relação *impacto ambiental/custo* utilizada para relacionar desempenho ambiental e econômico

Jigue a ar: equipamento de beneficiamento gravimétrico (por densidade). A separação dos materiais se dá por sucessivos pulsos ascendentes de ar que passam pela camada de materiais que são alimentados de maneira contínua. Os fluxos periódicos de ar fazem com que agregados menos densos ascendam e os mais densos permaneçam, ou sejam direcionados, na camada inferior.

Agregado graúdo reciclado rico em concreto: camada de agregados formada no jigue a ar a partir do beneficiamento por densidade do RCD. Correspondendo a camada inferior, de maior densidade, com maior percentual de agregados reciclados de concreto em comparação aos percentuais de argamassa e cerâmica.

Agregado graúdo reciclado pobre em concreto: camada de agregados formada no jigue a ar a partir do beneficiamento por densidade do RCD. Correspondendo a camada superior, de menor densidade, com maior percentual de agregados reciclados de argamassa e cerâmica em comparação aos percentuais de agregados reciclados de concreto.

Estratificação: processo contínuo de formação de camadas de diferentes densidade, ordenadas de maneira ascendente de materiais mais densos aos menos densos, por equipamentos que utiliza meio fluido para tal.

Beneficiamento gravimétrico: processo de melhoria da qualidade de um material composto por elementos de diferentes densidades.

Fluidização: estágios de expansão do leito de agregados pela introdução de fluido caracterizado pela maior ascensão de partículas de menor densidade e menor ascensão de partículas de maior densidade dando suporte ao processo de estratificação.

Taxa de expansão: intensidade de aplicação do fluido utilizado para o beneficiamento de materiais particulados por diferença de densidade em equipamento de beneficiamento gravimétrico.

Frequência de expansão: número de vezes em que é introduzido o fluido para expansão do leito de partículas para fluidização e estratificação ao longo de determinado período de tempo.

Modelo de sistema Atribucional: modelo de sistema passível de ser adotado em uma ACV onde os impactos ambientais são acrescidos aos impactos ambientais globais sem considerar consequências aos mercados equivalentes a partir de seus coprodutos e produtos.

Modelo de Sistema Consequencial: modelo de sistema passível de ser adotado em uma ACV onde os impactos ambientais alternam como consequência de adições ou subtrações de atividades relacionados por mercados equivalentes de coprodutos e produtos.

Valor Presente Líquido (VPL): equação econômico-financeira utilizada para determinar o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros apropriada, descontado o custo do investimento inicial.

Taxa Interna de Retorno do investimento (TIR): equação matemática-financeira utilizada para calcular a taxa de desconto que teria um determinado fluxo de caixa para igualar a zero seu Valor Presente Líquido. Se a TIR for inferior a zero o investimento não é viável, porém se for superior a zero é viável.

Taxa Mínima de Atratividade (TMA): taxa de juros que representa o mínimo que um investidor se propõe a ganhar quando faz um investimento, ou seja, a partir de qual valor se obtém um lucro real sobre o projeto. O valor é estipulado para cada tipo de negócio. Sua definição leva em consideração uma série de questões de mercado.