



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

ISABELLE BARCELOS CARIMAN

**ANÁLISE DA VIABILIDADE FINANCEIRA PARA USINAS DE
BENEFICIAMENTO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO**

VITÓRIA - ES

2022

ISABELLE BARCELOS CARIMAN

**ANÁLISE DA VIABILIDADE FINANCEIRA PARA USINAS DE
BENEFICIAMENTO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável.

Orientadora:

Prof^a. Dra. Luciana Harue Yamane

Coorientador:

Prof. Dr. Renato Ribeiro Siman

VITÓRIA - ES

2022

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

B242a Barcelos Cariman, Isabelle, 1995-
ANÁLISE DA VIABILIDADE FINANCEIRA PARA
USINAS DE BENEFICIAMENTO DE RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO / Isabelle Barcelos Cariman.
2022.
86 f. : il.

Orientadora: Luciana Harue Yamane.

Coorientador: Renato Ribeiro Siman.

Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Desenvolvimento Sustentável) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Resíduos de Construção e Demolição. 2. Agregado reciclado. 3. Viabilidade financeira. 4. Viabilidade técnica. 5. Usinas de beneficiamento. I. Harue Yamane, Luciana. II. Ribeiro Siman, Renato. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 628

ISABELLE BARCELOS CARIMAN

**ANÁLISE DA VIABILIDADE FINANCEIRA PARA USINAS DE
BENEFICIAMENTO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável.

Aprovada em 16 de fevereiro de 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof^a. D.Sc. Luciana Harue Yamane
Orientadora - PPGES / CT / UFES

Prof. D.Sc. Renato Ribeiro Siman
Coorientador - PPGES / CT / UFES

Prof. D.Sc. Ednilson Silva Felipe
Examinador Interno - PPGES / CT / UFES

Prof. D.Sc. José Donizetti de Lima
Examinador Externo – PPGEPS / DAMAT / UTFPR

À Deus, a minha família, noivo e amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus e a minha família, pai, mãe e irmã, pelo amor, incentivo, apoio incondicional e por todos os sacrifícios que tiveram que fazer para que eu chegasse até aqui, obrigada.

Ao meu noivo, Maurício, pelo companheirismo e paciência mesmo nos momentos em que não estive presente. Obrigada.

A minhas amigas Luana e Florene que se fizeram presentes não só na minha vida, mas também na pesquisa auxiliando da maneira que podiam.

A todos que de alguma forma colaboraram para a elaboração da pesquisa. Principalmente a Prof^a Dra. Luciana Harue Yamane e ao Prof. Dr. Renato Ribero Siman pela orientação, suporte, paciência e incentivos, durante todo o período do mestrado. Obrigada.

Ao LAGESA, a UFES, seu corpo docente, direção e administração que possibilitaram inúmeras oportunidades de crescimento educacional e pessoal. E a Vila Recicla por seu apoio no desenvolvimento dessa pesquisa.

RESUMO

O desenvolvimento urbano está associado à crescente geração de Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Apesar de ser um processo tecnologicamente conhecido e gerador de benefícios ambientais, o Beneficiamento de RCD e a produção de Agregado Reciclado (AR) para sua ampla reciclagem apresentam entraves técnicos e econômicos, carecendo serem esclarecidos. A partir de ampla revisão bibliográfica e documental, os parâmetros porosidade, absorção de água, densidade e resistência foram identificados como aqueles que são mais alterados com a inserção do AR na produção de concreto, determinando que a sua prévia classificação e homogeneidade granulométrica do AR influenciam na viabilidade técnica de suas aplicações. Por outro lado, os custos operacionais com transporte de AR e as taxas de juros aplicadas no financiamento desse tipo de empreendimento influenciam severamente a viabilidade financeira de usinas de reciclagem de RCD. Em uma segunda etapa foi realizado um estudo de caso para analisar os efeitos e magnitudes de custos intrínsecos ao beneficiamento e a viabilidade de um projeto. Para isso, foram utilizados dados do Espírito Santo/Brasil. Sendo assim, foi possível observar que mesmo que analisado os impactos dos juros de beneficiamento sobre a viabilidade do projeto, o valor para venda do AR e recebimento do RCD pode ser cerca de 100% mais significativo. Por fim, esse trabalho fornece instrumentos que embasam a tomada de decisão para implantação de usinas de beneficiamento de resíduos de construção e demolição, além de fomentar a reciclagem de RCD.

Palavras-Chave: Resíduos de Construção e Demolição. Agregado reciclado. Viabilidade financeira. Viabilidade técnica.

ABSTRACT

Urban development is associated with the growing generation of Construction and Demolition Waste (CDW). Despite being a technologically known process that generates environmental benefits, the Processing of CDW and the production of Recycled Aggregate (RA) for its extensive recycling present technical and economic barriers, which need to be clarified. From an extensive bibliographical and documental review, the parameters porosity, water absorption, density and strength were identified as those that are most changed with the insertion of RA in the production of concrete, determining that its previous classification and granulometric homogeneity of RA influence in the technical feasibility of its applications. On the other hand, the operating costs with transporting RA and the interest rates applied in the financing of this type of project severely influence the economic viability of CDW recycling plants. In a second stage, a case study was carried out to analyze the effects and magnitudes of intrinsic costs in the improvement and feasibility of a project. For this, data from Espírito Santo/Brazil were used. Thus, it was possible to observe that even after analyzing the impacts of interest on the project's viability, the value for selling the RA and receiving the CDW can be about 100% more significant. Finally, this work provides instruments that support decision-making for the implementation of processing plants for construction and demolition waste, in addition to encouraging the recycling of CDW.

Keywords: Construction and Demolition Waste. Recycled Aggregate. Economic viability. Technical viability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1: Diagrama de blocos dos capítulos que compõe os elementos textuais da presente pesquisa. 15
- Figura 2: Aplicações potenciais dos agregados reciclados a partir de resíduos da construção e demolição. 23
- Figura 3: Relação ente a taxa de absorção de água (%) com relação a fração na composição ou granulometria do agregado reciclado no concreto. 26
- Figura 4: Países que apresentam normas para uso estrutural e não estrutural do concreto de agregado reciclado. 29
- Figura 5: Demanda total por agregado natural (areia e brita/bica corrida) (ton./ano) em obras públicas na Região Metropolitana da Grande Vitória, Espírito Santo, Brasil, e taxa de crescimento do PIB no estado (2008-2020). 32
- Figura 6: Distribuição percentual média dos elementos que compõem custos (a) pré-operacionais e (b) operacionais 49
- Figura 7: Análise de sensibilidade do Valor Presente Líquido (VPL) em razão da variação da modalidade de captação de recursos e da taxa de financiamento e do valor aplicado na venda do agregado reciclado (AR). 56
- Figura 8: Análise de sensibilidade de VPL com base na taxa de recebimento de RCD separado e misturado. 60

LISTA DE QUADROS

- Quadro 1: Etapas metodológicas para desenvolvimento da pesquisa. 20
- Quadro 2: Critérios de busca por campo nas bases de dados GEO-OBRAS ES para levantamento da demanda de agregado reciclado no Espírito Santo. 21
- Quadro 3: Propriedades físicas e mecânicas do concreto com agregado reciclado (CAR) comparado ao concreto produzido com agregado natural (CAN). 25
- Quadro 4: Etapas metodológicas para desenvolvimento da etapa de revisão sistemática para coleta de dados secundários. 38
- Quadro 5: Despesas pré-operacionais da usina hipotética instalada na RMGV. 41
- Quadro 6: Dimensionamento das despesas operacionais da usina de beneficiamento - três cenários produtivos. 42
- Quadro 7: Custo calculado para valor de frete para transporte de RCD 43

Quadro 8: Taxas de juros aplicadas para modalidades de crédito nacional e internacionais.	44
Quadro 9: Valores aplicados no modelo para venda de AR.	45
Quadro 10: Cenário Base A - VPL com relação a variação da taxa de juros e valor venda de agregado reciclado.	46
Quadro 11: Valores aplicados a taxa de recebimento de RCD.	47
Quadro 12: Cenário Base B - VPL com relação a variação da taxa de juros e da taxa de recebimento de RCD.	48
Quadro 13: Custos de implantação para uma usina de beneficiamento de RCD com capacidade máx. instalada de 130ton./hora.	50
Quadro 14: Custos de operação anual para usina de beneficiamento de capacidade máxima instalada de 130ton./hora considerando o funcionamento de 30%, 60% e 100% da capacidade máxima instalada.	51
Quadro 15: Receita aferida para a venda de agregado reciclado (AR) calculada com base no nível produtivo (valores aplicados em AN).	52
Quadro 16: Receita aferida para a venda de agregado reciclado (AR) calculada com base no nível produtivo (valores aplicados para AR brasileiros)	53
Quadro 17: Receita aferida para a venda de agregado reciclado (AR) calculada com base no nível produtivo (valores aplicados para AR brasileiros)	53
Quadro 18: VPL calculado a partir do Cenário A	55
Quadro 19: Tipos de instrumentos econômicos utilizados por países da Europeus, EUA, Canadá e Bélgica.	58
Quadro 20: VPL calculado a partir do Cenário B.	59
Quadro 21: Indicação dos cenários viáveis segundo o VPL calculado.	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AN - Agregado Natural

AR - Agregado Reciclado

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CAN - Concreto de Agregado Natural

CAR - Concreto de Agregado Reciclado

CE - Concreto estrutural

CNE - Concreto não estrutural

DPO - Despesas Pré-Operacionais
DO - Despesas Operacionais
FLC - Fluxo Líquido de Caixa
IPCA - Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
LA - Coeficiente de Los Angeles
PERS - Plano Estadual de Resíduos Sólidos
R - Receitas
RCD - Resíduos de Construção e Demolição
TIR - Taxa Interna de Retorno
TLP - Taxa de longo prazo
TMA - Taxa Mínima de Atratividade
ton./ano - Toneladas por ano
ton./hora - Toneladas por hora
VPL - Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

A - Amortização dos custos
 C - Custos com consumo de água e energia
 D_e - Depreciação
 D_i - Custo com diesel para maquinários
 E - Custos com aquisição de equipamentos
 i - Taxa de juros ou custo do capital
 I - Custos com a instalação de equipamentos
 M_a - Custos com a manutenção de equipamentos
 M_o - Refere-se ao custo de mão de obra
 O - Custos com obras
 R - Dispêndios com rejeito: transporte e taxa de aterro
 t - Custos com tributos
 T - Custos de frete com o transporte de RCD e AR
 T_e - Custos de aquisição do terreno

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL E ESCOPO DA DISSERTAÇÃO	12
CAPÍTULO 2: ASPECTOS TÉCNICOS E NORMATIVOS PARA USO DO AGREGADO RECICLADO E AVALIAÇÃO DA DEMANDA NO ESPÍRITO SANTO	17
2.1. INTRODUÇÃO.....	18
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	20
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
2.3.1. <i>Aplicações do agregado reciclado de resíduos de construção e demolição na construção civil</i>	22
2.3.2. <i>Aspectos técnicos: uso do agregado reciclado na produção de concreto</i>	24
2.3.3. <i>Aspectos normativos: uso do agregado reciclado na produção de concreto</i>	29
2.3.4. <i>Estudo de caso - Avaliação do potencial da oferta e demanda por AR: cenário prospectivo no Espírito Santo</i>	30
2.4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	32
CAPÍTULO 3: VIABILIDADE FINANCEIRA DE USINAS DE BENEFICIAMENTO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	34
3.1. INTRODUÇÃO.....	34
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	37
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
3.3.1. <i>Descrição da composição de custos para usinas fixas de beneficiamento de resíduos de construção e demolição no Brasil</i>	47
3.3.2. <i>Efeito da modalidade de captação de recursos financeiros</i>	52
3.3.3. <i>Impacto da dimensão financeira dentro da gestão de RCD de incentivo: sobretaxação de RCD em aterro</i>	55
3.4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	61
CAPÍTULO 4: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	63
4.1. CONCLUSÕES	63
4.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	64
CAPÍTULO 5: REFERÊNCIAS	65
APÊNDICE A: DEMANDA POR AGREGADO NO ESPÍRITO SANTO (2008-2020).....	75
APÊNDICE B: CUSTOS SIGNIFICANTES EM PROJETOS DE USINAS FIXAS DE BENEFICIAMENTO DE RCD.....	76

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL E ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

No mundo, cerca de 35% (p/p) dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) ainda são destinados para aterros sanitários (MENEGAKI; DAMIGOS, 2018). A China, maior gerador de RCD no mundo, desviou de aterros sanitários 3 a 10% dos cerca de 1 bilhão de toneladas de RCD geradas em 2014, já o Brasil aterrou 40% do RCD gerado (MENEGAKI; DAMIGOS, 2018), e pesquisas descreveram que apenas 6,14% foi reciclado em 2015 (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018). Ainda há uma fração significativa que possivelmente seja descartada de forma ilegal em áreas urbanas, próximos de corpos hídricos e estradas (CONTRERAS *et al.*, 2016).

Embora a disposição final de RCD em aterros sanitários seja a destinação mais atraente economicamente, sua destinação para a reutilização e/ou reciclagem poderia aproveitar seu potencial de reciclagem, além de valorizar essa fração de resíduo (XU; SHI; ZHAO, 2019). Essas alternativas apresentam benefícios ao meio ambiente, sendo os principais: a redução do uso de Agregados¹ Naturais (AN); redução no consumo energético na produção do AN e; redução da destinação dos RCD em aterros sanitários ou em locais inadequados (SILVA; DE BRITO; DHIR, 2017).

A reciclagem de RCD quando possibilitada pela segregação na fonte e coleta diferenciada segue para tratamento em usinas de beneficiamento. Essas usinas são responsáveis por realizar a triagem, descontaminação, trituração e classificação do resíduo (KUMBHAR; GUPTA; DESAI, 2013). Segundo a literatura, essas usinas podem ser constituídas para serem fixas ou móveis e são geralmente compostas por um ou mais trituradores, esteiras e peneiras (BARBUDO *et al.*, 2020; KUMBHAR; GUPTA; DESAI, 2013; OLIVEIRA NETO *et al.*, 2017; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2017).

O processo de beneficiamento depende de dois fatores: a condição do resíduo utilizado como matéria-prima e sua futura aplicação. Dessa forma, as usinas de beneficiamento podem produzir Agregados Reciclados (AR) de diferentes características que podem ser usados na fabricação de elementos estruturais e não estruturais (KUMBHAR; GUPTA; DESAI, 2013; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2019).

O AR produzido pode variar em sua composição e granulometria, podendo ser percebido como areia, brita, pedra e pedrisco, classificados em agregados miúdos (< 4,75 mm) e

¹ Agregados são elementos granulares utilizados na construção civil, podendo ser classificado como naturais quando oriundos de fontes dos recursos naturais (SERNA; REZENDE, 2009).

agregados graúdos (> 4,5 mm) (SERNA; REZENDE, 2009). Outros elementos separados, como o papelão, metal, plástico, madeira e rejeitos podem ainda ser encaminhados para a reciclagem ou para aterro sanitário (KUMBHAR; GUPTA; DESAI, 2013).

No Brasil, a Resolução nº 307 de 2002 da CONAMA, alterada pelas resoluções nº 348/04, nº 431/11, nº 448/12 e nº 469/2015 orientam a gestão dos RCD (BRASIL, 2002), classificando-os em: Classe A (agregados cimentícios que podem ser reutilizados/reciclados); Classe B (outros recicláveis como papéis, plásticos, papelão, vidros, madeira, metais e gesso); Classe C (resíduos que não apresentam viabilidade técnica ou financeira para reciclagem); e Classe D (resíduos perigosos).

Assim como no Brasil, na Europa, a legislação apresenta classificações específicas de RCD sendo oito subclasses, de acordo com os constituintes e periculosidade do resíduo, incluindo resíduos inertes de edifícios ou infraestruturas civis que são indicados pela classe 17.01 Concreto, Tijolos, Telhas e Cerâmica (EUROPA, 2008). Diferentemente, a China e os Estados Unidos não apresentam leis federais que subclassificam esses resíduos de forma específica (CHINA, 2018; JIN; CHEN, 2019; US EPA, 2012a, 2012b; WEN et al., 2014)

No entanto, apesar de existirem regulamentações específicas tanto no Brasil quanto na Europa, o uso do AR em substituição ao AN na construção civil ainda é questionado, visto que a reciclagem de RCD altera as propriedades dos elementos produzidos (MEDINA *et al.*, 2014; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2014). Diante deste questionamento, a viabilidade técnica da utilização dos AR deve ser comprovada para cada caso mediante a análise dos parâmetros físicos, tais como densidade, porosidade, absorção de água, resistência à compressão (BRAVO *et al.*, 2015a; GONZÁLEZ-FONTEBOA; MARTÍNEZ-ABELLA, 2008; OSSA; GARCÍA; BOTERO, 2016), coeficiente de Los Angeles (LA) (KOX *et al.*, 2019), abrasão (LEITE *et al.*, 2011), energia de compactação (BRAVO *et al.*, 2018; OSSA; GARCÍA; BOTERO, 2016), dentre outros.

Considerando o aspecto técnico como viável, conforme instrução normativa que se orienta (DIMITRIOU; SAVVA; PETROU, 2018), a sustentabilidade financeira das usinas de beneficiamento dos RCD se torna o fator decisivo para viabilizar a reciclagem (FU *et al.*, 2017; COELHO; DE BRITO, 2013; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2019).

Dessa forma, a avaliação da viabilidade financeira desse tipo de empreendimento é fundamental. São fatores decisivos para configurar a viabilidade do empreendimento o equilíbrio entre a oferta de resíduo e a demanda por material reciclável para a definição do porte das usinas (MORESCO, 2017). Essa delimitação do porte e do equilíbrio do estoque por sua vez são dependentes do aporte subsidiário (FU *et al.*, 2017; NUNES *et al.*, 2007).

O aporte subsidiário na dimensão financeira dentro da gestão de RCD pode ser representado por meio de ferramentas taxativas de aterramento; subsidiárias no aporte econômico da indústria ou para incentivo no desvio de RCD para beneficiamento ou para incentivo ao uso do AR (GIORGI; LAVAGNA; CAMPIOLI, 2018).

Políticas de incentivos creditícios e desoneração fiscal também podem ser aliados para viabilizar a implementação destas usinas, sob o aspecto econômico (COELHO; DE BRITO, 2013; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2019), uma vez que, empreendimentos desse porte carecem de dispendioso investimento inicial (OLIVEIRA NETO *et al.*, 2017; TAM, 2008; ZHAO; LEEFTINK; ROTTER, 2010), e estão sujeitos a diferentes tipos de taxas de juros.

De forma resumida, se para que seja comprovada a viabilidade técnica para uso do AR se fazem necessárias normas técnicas de uso é necessário investigar quais são os usos que dispõem de maior segurança técnica. E ainda, então, avaliar se existe oferta de RCD capaz de suprir a demanda por AR desses devidos usos. Ainda, uma vez que, é certo que a viabilidade de usinas de beneficiamento de RCD é dependente de aporte subsidiário (COELHO; DE BRITO, 2013) é preciso avaliar qual a significância da taxação dos juros aplicados ao financiamento para viabilidade financeira do empreendimento.

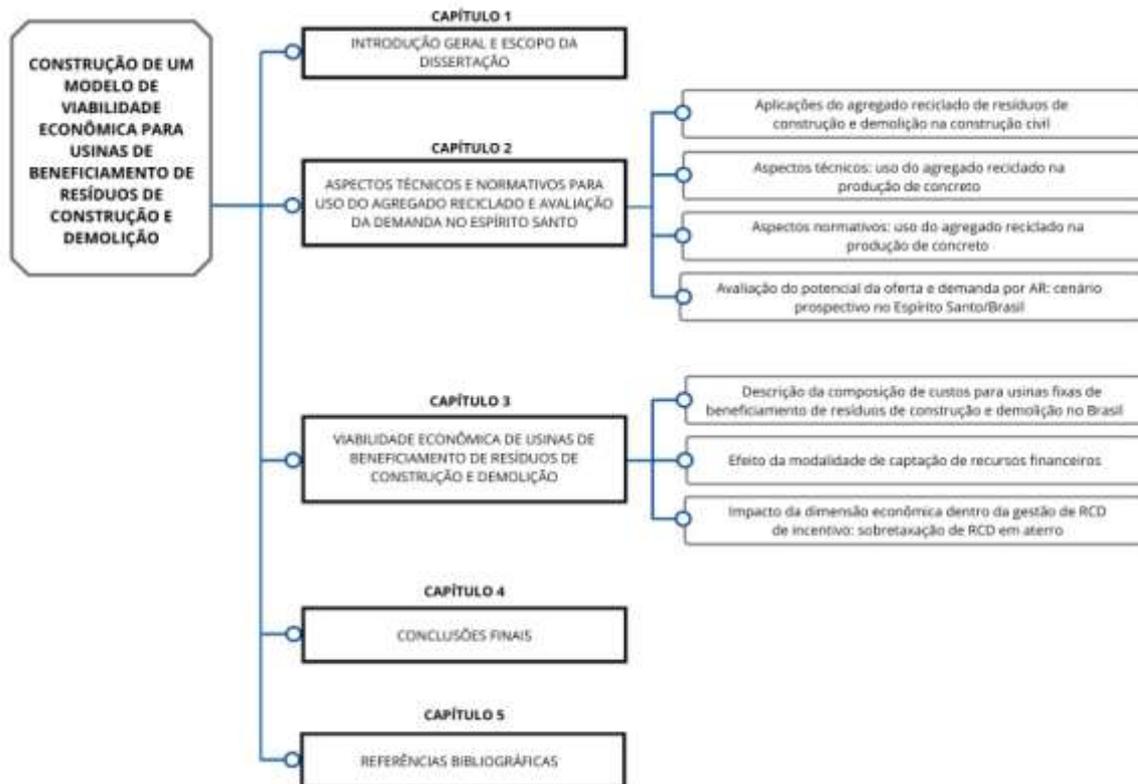
Desta forma, esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar a viabilidade técnica e analisar a dimensão financeira dentro da gestão do RCD por meio da viabilidade financeira e no processo de tomada de decisão na implantação de usinas de beneficiamento de resíduos da construção e demolição. Tendo como enfoque, a análise da significância da taxa de juros na viabilidade de um empreendimento.

Ainda, tem como objetivos específicos:

- Identificar as possibilidades dos usos dos agregados reciclados para aqueles já existem consenso técnico;
- Analisar a oferta e demanda por agregado reciclado para obras públicas em substituição ao agregado natural;
- Analisar os elementos que compõem os custos das usinas de beneficiamento de resíduos de construção e demolição;
- Analisar o efeito da modalidade de captação de recursos financeiros na viabilização financeira do empreendimento;
- Avaliar os impactos da variação da taxa de juros do financiamento em um estudo de caso para o Espírito Santo.

Diante disso, além do capítulo introdutório, o desenvolvimento desta dissertação foi dividido em dois outros capítulos principais redigidos na forma de artigos. Enquanto o segundo capítulo buscou descrever os elementos e os usos que já encontram viabilidade técnica para uso na construção civil bem como as relações de oferta e demanda que descrevem os elementos de definição de porte para empreendimentos de beneficiamento de RCD; o terceiro capítulo buscou descrever os elementos que compõem a viabilidade financeira das usinas de beneficiamento, além de prover uma metodologia que seja útil para a análise de sua viabilidade no processo de reciclagem de RCD. A Figura 1 apresenta um fluxograma com os principais elementos textuais dessa dissertação.

Figura 1: Diagrama de blocos dos capítulos que compõe os elementos textuais da presente pesquisa.



Fonte: Autoria própria.

Conforme observado na Figura 1, no Capítulo 1, desenvolveu-se uma introdução dos conceitos e discussões que se apresentaram, bem como, uma breve apresentação dos capítulos deste trabalho.

No Capítulo 2, por meio de uma pesquisa exploratória estruturada baseada na técnica de leitura e análise de fontes bibliográficas e documentais, objetivou-se levantar as possibilidades de aplicações do AR; detalhar os aspectos técnicos e normativos que determinam a viabilidade técnica do seu uso na construção civil; e verificar os desafios enfrentados no cenário brasileiro e para o estado do Espírito Santo/Brasil para viabilização do

uso do concreto produzido a partir de agregado reciclado por meio da avaliação da demanda por agregado reciclado.

Por sua vez, o Capítulo 3, teve como objetivo descrever os elementos que compõem os custos de usinas de beneficiamento de resíduos de construção e demolição, e suas magnitudes, analisando o efeito de captação de recursos financeiros por meio do método VPL (Valor Presente Líquido) com dados brasileiros e do estado do Espírito Santo/Brasil.

No Capítulo 4, as considerações finais, inicialmente, apresentam conclusões obtidas em torno das discussões dos Capítulos 2 e 3. E posteriormente, sugestões para trabalhos futuros, reunidas em torno das questões que surgiram durante o desenvolvimento do trabalho e que não foram resolvidas.

CAPÍTULO 2: ASPECTOS TÉCNICOS E NORMATIVOS PARA USO DO AGREGADO RECICLADO E AVALIAÇÃO DA DEMANDA NO ESPÍRITO SANTO

Resumo

Embora pareça ser consenso que a reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) promove benefícios ambientais, apenas uma parcela inexpressiva de RCD é destinada à reciclagem no Brasil e em outras partes do mundo. As informações dispersas quanto os potenciais aplicações e à insegurança sobre a qualidade técnica do agregado reciclado (AR) são os principais fatores apontados para sua utilização na construção civil. Este estudo identificou os principais tipos de aplicações dos RCD reciclados e os respectivos elementos relacionados à viabilidade técnica por meio de ampla revisão bibliográfica e documental. Identificou-se que as principais aplicações de RCD reciclados são o reuso direto no canteiro de obra, o uso na agricultura e a produção de AR para uso estrutural e não estrutural. Em relação ao uso do AR, os estudos indicam que os parâmetros técnicos para a construção civil que podem sofrer alteração são porosidade, absorção de água, densidade e resistência, sendo dependentes de um criterioso processo de classificação e homogeneização granulométrica dos AR. Esta constatação demonstrou a necessidade de uniformização desses procedimentos, de forma a trazer confiabilidade para o uso dos RCD reciclados, uma vez que a viabilidade técnica não é o principal fator limitante para implantação de usinas de beneficiamento de RCD. Ainda, realizou-se um estudo de caso da análise de demanda por areia e brita na Região Metropolitana da Grande Vitória, estado do Espírito Santo (RMGV/ES), a fim de verificar a viabilidade de instalação de uma estação de beneficiamento de RCD em razão da demanda por AR. Para isso, foram utilizadas bases de dados governamentais. Sendo assim, foi possível observar que a inviabilização da reciclagem de RCD não se aplica à oferta e demanda, mas, constatou-se a necessidade de ampliação de incentivo à reciclagem de RCD em função da demanda por areia e brita reciclada.

Palavras Chaves: Resíduos de Construção e Demolição. Agregado reciclado. Viabilidade técnica. Reciclagem. Usinas de beneficiamento.

2.1. INTRODUÇÃO

Os processos de construção e demolição são essenciais para o desenvolvimento dos centros urbanos, entretanto, a má gestão dos materiais utilizados na construção civil, e a necessidade de reformas e atualizações na paisagem urbana geram excessivas quantidades de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) (AKHTAR; SARMAH, 2018). Estima-se que de todo o material adquirido para construção, de 25% a 30% deles sejam desperdiçados como RCD (CHILESHE *et al.*, 2018).

Os RCD são definidos como resíduos sólidos oriundos da construção, reforma e demolição de edificações e estruturas civis, constituindo uma mistura de argamassa, cerâmica, concreto, metais, madeira, outros resíduos recicláveis e ainda porções misturadas de solo e cascalho, e além de sua fração mineral mista, a composição química dos RCD pode variar com as atividades financeiras, clima, região, padrão econômico e de construção, inerentes a região de geração (DE BRITO; AGRELA; SILVA, 2019; MENEGAKI; DAMIGOS, 2018; ZHENG *et al.*, 2017).

O Brasil, gerou cerca de 201.884 milhões de m³ RCD, em 2019 (MMA; SECRETARIA DE QUALIDADE AMBIENTAL, 2020), do total gerado em média 40% do RCD se destinada a aterros sanitários (MENEGAKI; DAMIGOS, 2018) e apenas 6,14% foram reciclados em 2015 (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018). Ainda assim, existe uma fração remanescente destinada ilegalmente, sendo despejada em áreas urbanas, causando impactos que contribuem, por exemplo: a deterioração do lençol freático e das águas superficiais, proliferação de vetores e inundação de áreas urbanas (DA PAZ *et al.*, 2020; NUNES; MAHLER, 2020).

A reciclagem é defendida como a forma ambientalmente adequada de destinar os RCD por apresentar benefícios ao meio ambiente, sendo os principais a redução: do uso de agregados naturais (AN); do transporte dos locais de extração de AN; do consumo de energia na produção de AN e; da destinação de RCD em aterros sanitários ou em locais inadequados (AGRELA *et al.*, 2011; DEVI *et al.*, 2021; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2017).

Apesar de ainda ser inexpressiva, a parte dos RCD que vai para a reciclagem é processada em usinas de beneficiamento, que são responsáveis por beneficiar os RCD transformando-os em agregado reciclado (AR) através de operações unitárias como triagem, descontaminação, trituração e classificação (KUMBHAR; GUPTA; DESAI, 2013; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2019).

A classificação do RCD se baseia na Resolução nº 307 de 2002 da CONAMA, alterada pelas resoluções nº 469/2015, nº 448/12, nº 431/11 e nº 348/04, que orienta a gestão dos RCD no

Brasil (BRASIL, 2002). Composto-se gravimetricamente por 28% - 82,8% a Classe A (reutilizáveis ou recicláveis como agregados); 10,78% - 44% a Classe B (recicláveis para outras destinações que não como agregados de construção civil); e 6,43% - 29% a Classe C e D (sem tecnologia ou aplicação economicamente viável para reciclagem ou recuperação e perigosos) (ESPÍRITO SANTO, 2019; REZENDE; SANTANA, 2018; FERREIRA; MOREIRA, 2013).

O AR beneficiado varia em sua composição e granulometria, podendo ser percebido como areia, brita, pedra e pedrisco e granulometricamente classificado em agregado miúdo (< 4,75 mm) e gráudo (> 4,5 mm) (SERNA; REZENDE, 2009).

Com base nas suas propriedades físicas e químicas, os AR podem ser usados na fabricação de elementos estruturais, não estruturais ou de pavimentação (KUMBHAR; GUPTA; DESAI, 2013). Nawaz, Qureshi e Ali (2021) defendem a ampliação das aplicações do AR, condicionando seu uso ao atendimento dos critérios técnicos exigidos aos usos que se destinam (KOX *et al.*, 2019).

Cabe ressaltar que existem, além das exigências técnicas, alguns obstáculos quanto ao uso do AR em substituição ao AN na fabricação de produtos para a construção civil. Por exemplo, na produção de concreto há falta de confiança dos consumidores devido ao desconhecimento das propriedades físicas tanto do AR quanto do concreto produzido a partir dele (MEDINA *et al.*, 2014; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2014). Nesse sentido, avaliar a viabilidade técnica de utilização dos AR é de suma importância para desmistificar a segurança técnica de sua aplicação na construção civil (SILVA; DE BRITO; DHIR, 2014).

Parâmetros como densidade, absorção de água, resistência à compressão (BRAVO *et al.*, 2015a; ZHENG *et al.*, 2017), coeficiente de Los Angeles (LA) (KOX *et al.*, 2019), abrasão (KUMAR, 2017) e energia de compactação (BRAVO *et al.*, 2018; OSSA; GARCÍA; BOTERO, 2016) podem ser analisados para atestar a qualidade e segurança técnica de produtos contendo AR.

Os AR na fração de areia e brita representam 56% de toda produção e demanda nas usinas de beneficiamento brasileiras (MMA; SECRETARIA DE QUALIDADE AMBIENTAL, 2020) em razão do perfil de construção nacional que carece dessas frações caracteristicamente composto por alvenaria (FERREIRA; MOREIRA, 2013). Sendo assim, em função desses grãos utilizados em obras não estruturais e de pavimentação, já existe norma para aplicação de AR no Brasil (ABNT, 2004c).

Diante do exposto, e considerando que a viabilidade técnica do uso do AR depende do atendimento dos critérios técnicos necessários para uso do material produzido (SILVA; DE

BRITO; DHIR, 2019); e que há carência de informações adensadas demonstrando a segurança técnica do uso do AR (RUIZ; RAMÓN; DOMINGO, 2020), o objetivo deste estudo foi levantar as possibilidades de aplicações do AR e detalhar os parâmetros que determinam a viabilidade técnica do seu uso na construção civil, tendo em vista a necessidade de reduzir o desvio dos RCD dos aterros sanitários e locais de disposição irregular e promover a reciclagem em consonância com o princípio da economia circular.

Ainda, por fim, busca-se por meio de um estudo de caso analisar os elementos normativos para uso e avaliação da demanda por agregado reciclado no cenário brasileiro. Bem como, verificar se para os usos que há viabilidade do uso do AR existe oferta de RCD e demanda por AR, mais especificamente na fração de areia e brita.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Revisão Sistemática

A metodologia adotada foi uma revisão sistemática, baseada na técnica de leitura e análise de fontes bibliográficas e documentais. O Quadro 1 apresenta as etapas do trabalho alinhadas com os objetivos da pesquisa e as respectivas metodologias e ferramentas que foram adotadas.

Quadro 1: Etapas metodológicas para desenvolvimento da pesquisa.

OBJETIVOS DA PESQUISA	FERRAMENTA	PORTAL	PERÍODO	TERMOS DE BUSCA
Identificar os potenciais de aplicações do AR, bem como, usos e restrições do uso.	A pesquisa bibliográfica usou a ferramenta de código aberto, bibliometrix, junto ao mapeamento bibliométrico empregando programação em linguagem R (ARIA; CUCCURULLO, 2017).	SCOPUS e Web of Science	2016 a 2021	("CDW" OR "construction and demolition waste" OR "recycled aggregate") AND ("application" OR "structural use" OR "non-structural use")
Identificar os aspectos técnicos relacionados a viabilidade técnica do uso do AR na produção de concreto				("CDW" OR "construction and demolition waste" OR "recycled aggregate") AND ("structural concrete" OR "non-structural concrete" OR "technical viability" OR "technical security").
Avaliar as questões normativas que influenciam na viabilidade do uso do AR na produção de concreto				("CDW" OR "construction and demolition waste" OR "recycled aggregate") AND ("legislation" OR "international standards" OR "normative" OR "international norms"). Também foram utilizados documentos normativos (Especificações Padrão) para fins de análises e comparações.
Estudo de caso: avaliar o potencial de oferta e demanda por AR em substituição ao agregado natural no cenário brasileiro e RMGV	Pesquisa documental, com normas técnicas e regulamentares e bancos de dados governamentais	GEO-OBRAS	2008 a 2019	"Demanda por AR no Brasil" e "Demanda por AR no Espírito Santo".

Fonte: Autoria própria.

2.2.2. Estudo de caso: Análise de oferta de RCD e demanda por AR no Espírito Santo

No Brasil, o uso dos AR em obras de pavimentação e na produção de concreto de uso não estrutural é regulamentado por normas da ABNT, NBR 15.115:2004 e NBR 15.116:2004, respectivamente.

A NBR 15.115 estabelece procedimentos de execução de camadas em obras de pavimentação (ABNT, 2004d). Uma vez que, na produção de concreto se faz necessário o uso de areia e brita (KUMBHAR; GUPTA; DESAI, 2013), justifica-se a maior demanda por AR nesta fração no Brasil (MMA; SECRETARIA DE QUALIDADE AMBIENTAL, 2020).

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos, de 2020, traz como meta o incentivo ao mapeamento e resíduos oriundos de indústrias, assim como da construção civil, para incentivo a logística reversa (MMA; SECRETARIA DE QUALIDADE AMBIENTAL, 2020). Sendo assim, uma vez que, o Espírito Santo foi escolhido para estudo de caso, por apresentar dados disponíveis para busca no sistema GEO-OBRAS que dispõe dados sobre obras públicas municipais e estaduais realizadas no estado. Os critérios de busca estão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2: Critérios de busca por campo nas bases de dados GEO-OBRAS ES para levantamento da demanda de agregado reciclado no Espírito Santo.

Campo	GEO-OBRAS ES
Período	2008 a 2019
Tipo de obras	Adutora, aterro sanitário, canal, drenagem urbana, módulo sanitário, rede de coleta de esgoto, rede de distribuição de água, rodovia não pavimentada, rodovia pavimentada, via urbana não pavimentada, via urbana pavimentada, via urbana a ser pavimentada, rede coletora de esgoto, esgotamento sanitário, estrada vicinal não pavimentada, estrada vicinal pavimentada drenagem de águas pluviais, e ruas e avenidas
Setor beneficiado	Todos
Modalidade	-
Situação da Obra	Concluída e não recebida, concluída e recebida provisoriamente, e concluída e recebida definitivamente.

Fonte: Autoria própria.

Os critérios estabelecidos no Quadro 2 para busca foram baseados na norma ABNT NBR 15116/2004, que prevê o uso de AR apenas para obras não estruturais, para pavimentação e concreto sem função estrutural (ABNT, 2004b). Sendo assim, foram definidos os tipos de obras apresentadas no Quadro 2.

Quanto a granulometria, foram requeridos dados sobre a demanda de AN nas frações areia e brita/bica corrida, uma vez que são as frações mais demandadas tanto para agregados oriundos de fontes naturais quanto recicladas (DNPM, 2018; MMA; SECRETARIA DE QUALIDADE AMBIENTAL, 2020).

Com relação aos dados utilizados para calcular a oferta de RCD para o estudo de caso, em nível de Brasil, utilizou-se dados do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, de 2020, o qual

estimou a uma média de RCD gerado no país em 2018 (MMA; SECRETARIA DE QUALIDADE AMBIENTAL, 2020).

Em nível estadual, fez-se uso dos dados apresentados pelo Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Espírito Santo (PERS-ES) sobre a quantia de RCD gerada no estado em 2017 (ESPÍRITO SANTO, 2019).

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Aplicações do agregado reciclado de resíduos de construção e demolição na construção civil

O agregado reciclado gerado em obras de construção civil e demolição pode ter diferentes aplicações dependendo do grau de beneficiamento e qualidade do resíduo a ser reciclado (RUIZ; RAMÓN; DOMINGO, 2020), sendo classificados para uso estrutural e não estrutural (KUMBHAR; GUPTA; DESAI, 2013; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2019), conforme podemos verificar na Figura 2. Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos brasileira (BRASIL, 2010), a gestão dos RCD se inicia na adoção de técnicas que promovam a sua redução ou não geração desde a fonte geradora.

Figura 2: Aplicações potenciais dos agregados reciclados a partir de resíduos da construção e demolição.



Fonte: Autoria própria.

Para minimizar a geração de RCD, inicialmente, é necessária a adoção de técnicas analíticas de planejamento da obra civil, que visem a otimização dos recursos bem como ser considerada a possibilidade de reutilização sem necessidade de beneficiamento nos próprios canteiros das obras. Para tanto, é crucial que a separação e acondicionamento dos resíduos

ocorram de maneira apropriada, podendo ainda ser adotados equipamentos portáteis de pequeno porte para pré-tratamento, tais como britadeiras.

Vale ressaltar também que a segregação dos RCD nos canteiros de obra agrega valor ao AR produzido em usinas de beneficiamento, visto que reduz tempo e custos com o tratamento do RCD (SANTOS; MARCHESINI, 2018).

A reutilização dos RCD é realizada quando não há rigor para a qualidade técnica do uso final, como na reutilização de revestimentos, louças e telhas utilizadas nas instalações provisórias de canteiros de obra; no uso de terra e entulho para preenchimento de valas e no aterramento de solo; no emprego de embalagens de metais ou madeira para acondicionamento de outros resíduos; ou na sinalização de cercas e portões (RUIZ; RAMÓN; DOMINGO, 2020).

A partir do beneficiamento dos RCD, os agregados miúdos podem ser incorporados nas frações de areia sendo possível sua utilização em argamassas de uso não estrutural e para assentamento e revestimento com granulometria entre 0,075 mm e 4,8 mm (SERNA; REZENDE, 2009; DE OLIVEIRA; CABRAL, 2011; JOCHEM *et al.*, 2019).

A areia produzida a partir do RCD também pode apresentar uma estrutura irregular a depender do equipamento utilizado para a cominuição, o que propicia maior absorção de água (ULSEN *et al.*, 2021). Assim, a argamassa produzida com RCD, que é heterogênea, pode apresentar fissuras e descolamentos e a viabilidade técnica depende da regulamentação local (DE OLIVEIRA; CABRAL, 2011; JOCHEM *et al.*, 2019).

Para sanar o aparecimento de fissuras e descolamentos, pode-se incorporar componentes como cinzas volantes com ativador de silicato, já que as cinzas propiciam a produção de argamassa e concreto, com melhores propriedades reduzindo a absorção de água em 23% e aumentando a resistência à compressão em 21-30%, com a incorporação de 3 e 6% de silicato de sódio e 20% de cinzas volantes, e entre 14-17% com a inclusão de 3 e 6% de silicato de sódio e 40% de cinzas volantes (NAWAZ; QURESHI; ALI, 2021).

Apesar da diversidade de aplicações dos AR produzidos a partir do beneficiamento de RCD, os principais usos são na execução de base ou sub-base de pavimentos e na produção de concreto (estrutural e não estrutural) variando de acordo com o país (ABNT, 2004c; KUMBHAR; GUPTA; DESAI, 2013).

Nos Estados Unidos, mais de 60% dos AR são utilizados na formação de base na pavimentação, 9% na produção de concreto não estrutural para pavimento e 6% para produção de concreto de uso estrutural ou não estrutural (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018). Já na Europa, 80% dos AR são usados na construção civil em obras de edifícios e infraestrutura e somente 20% em obras de pavimentação (TAM; SOOMRO;

EVANGELISTA, 2018).

Para uso na pavimentação, a base ou sub-base de pavimentos para infraestrutura rodoviária é composta por um sistema de várias camadas: uma camada superior (revestimento), sendo em geral uma superfície de concreto ou asfalto; base e sub-base, compostos por agregados compactados de qualidade definida de acordo com o volume de tráfego da via; e a construção do aterro (corpo) compactado, que também requer robustas quantidades de aterro (ABNT, 2004b; TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018).

O potencial de aplicação dos agregados reciclados em obras de pavimentação ou de geotecnia está relacionado ao volume demandado, chegando a mais de 260 m³ para a pavimentação de apenas 0,191 km de estrada (GEOOBRAS ES, 2015), enquanto na construção de aterros sanitários é utilizado como reforço de subleito (LNEC, 2009).

Em fração graúda, os AR podem ser aplicados na constituição de pavimento, a depender de sua qualidade (SERNA; REZENDE, 2009), apresentando granulometria máxima de 63 mm (ABNT, 2004d). Para se ter uma noção, na construção da base de vias urbanas, pode ser utilizado cerca de 2.250 m³/km de brita graduada compactada compondo uma faixa de 30 cm (ALMEIDA *et al.*, 2018).

Conforme pode ser percebido na Figura 2, a reciclagem de RCD também permite o uso de AR em outros setores, como na agricultura para calagem do solo, uma vez que o gesso pode ser aplicado para correção da sua acidez e dirimir problemas relacionados à drenagem ácida. Os resíduos de gesso apresentam cerca de 8,5% de material reativo para calagem (carbonato de cálcio e de magnésio), porém 80% da composição é de quartzo, que não apresenta função corretiva de acidez, assim seriam necessárias quantidades consideráveis para a efetiva calagem, ou processos capazes de retirar a sílica antes da aplicação no solo (LASSO *et al.*, 2013).

Por fim, no cenário atual, em relação ao uso na construção civil, apesar de existirem diversas possibilidades de aplicações do AR, na prática, a viabilidade técnica ainda é questionada dada a carência de estudos e normas técnicas que incluam parâmetros e limites especificamente dos AR para cada uso.

2.3.2. Aspectos técnicos: uso do agregado reciclado na produção de concreto

O concreto é um material amplamente utilizado na construção civil para produção de elementos estruturais e não estruturais, como na construção de edifícios e infraestrutura urbana e podem ser produzidos a partir de AR e de agregado natural (AN) (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018). O uso de AR em substituição ao AN, de maneira geral, forma um

produto que difere em suas propriedades físicas, químicas e mecânicas (OMARY; GHORBEL; WARDEH, 2016; SORATO, 2016), visto que a produção a partir do AN, por proceder de fonte homogênea (a partir de uma rocha), produz um concreto de qualidade superior.

A fonte caracteristicamente heterogênea do AR apresenta-se como um fator desafiador para o estabelecimento do padrão de qualidade e segurança técnica (KUMAR, 2017), visto que as propriedades físicas e mecânicas do concreto de agregado reciclado (CAR), com as mesmas proporções de água e cimento, são inferiores se comparadas ao concreto de agregado natural (CAN), conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3: Propriedades físicas e mecânicas do concreto com agregado reciclado (CAR) comparado ao concreto produzido com agregado natural (CAN).

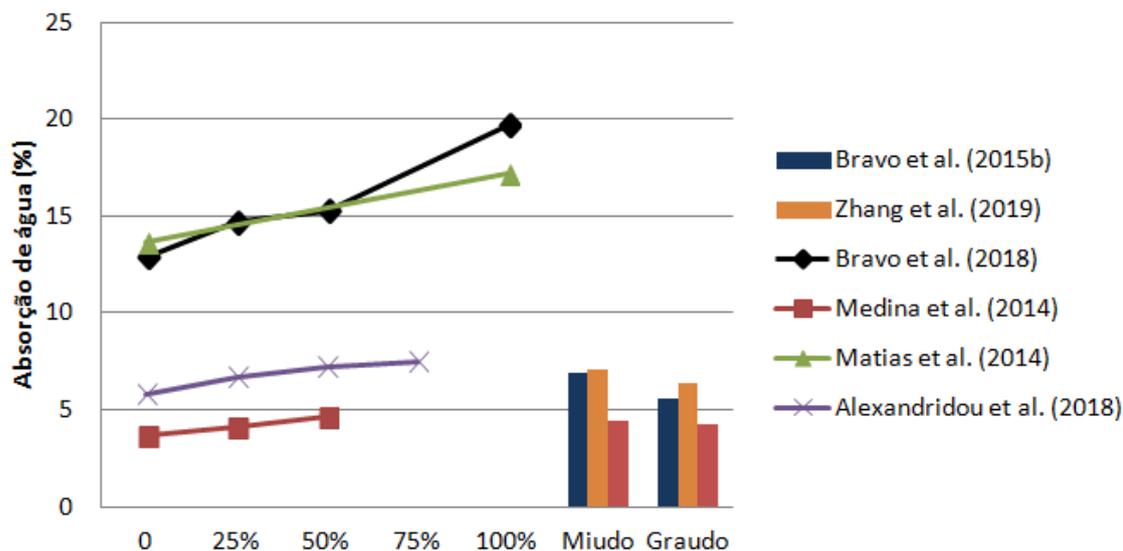
Propriedades físicas e mecânicas	CAR comparado com CAN
Força compressiva	Diminui até 25%
Resistência à tração e à ruptura por flexão	Diminui até 10%
Módulos de elasticidade	Diminui até 45%
Absorção de água	Aumentou até 50%
Resistência ao congelamento e degelo	Diminuiu

Fonte: Adaptado de Kumar (2017, p. 249). Legenda: CAR - concreto com agregado reciclado; CAN - concreto com agregado natural.

A alteração das propriedades físicas e mecânicas listadas no Quadro 3 está relacionada à maior porosidade em AR, sendo até 11,38% mais presentes que nos AN, devido à recompactação sofrida pelo agregado no processo de reciclagem (GÓMEZ-SOBERÓN, 2002). Assim, quanto maior a porosidade dos agregados, conseqüentemente maior a absorção de água, deixando o concreto mais exposto a agentes externos (BRAVO et al., 2015a; OSSA; GARCÍA; BOTERO, 2016) e suscetível à deterioração (MATIAS *et al.*, 2014).

Na produção de concreto a partir de AR, a maior porosidade leva a necessidade de adicionar maior quantidade de água na mistura estabelecendo a hidratação do cimento acima do indicado (GONZÁLEZ-FONTEBOA; MARTÍNEZ-ABELLA, 2008). Assim, considerando que a durabilidade do concreto depende da capacidade de penetração e absorção (ALEXANDRIDOU; ANGELOPOULOS; COUTELIERIS, 2018), diversos estudos compilados na Figura 3 buscaram compreender de que forma as alterações estruturais influenciam na viabilidade técnica do concreto produzido com AR (CAR).

Figura 3: Relação entre a taxa de absorção de água (%) com relação a fração na composição ou granulometria do agregado reciclado no concreto.



Fonte: Autoria própria.

A partir da análise da Figura 3 foi possível observar que a taxa de absorção de água cresce proporcionalmente conforme a taxa de substituição de AN por AR na produção de concreto (BRAVO *et al.*, 2015a; OSSA; GARCÍA; BOTERO, 2016), crescendo cerca de 5% entre a produção de CAN (com 0% de AR em sua composição) comparado ao CAR (com a taxa de substituição de 100% de AR na produção do concreto) (BRAVO *et al.*, 2018; MATIAS *et al.*, 2014). Ademais, quanto à granulometria, as partículas miúdas possuem maior capacidade de absorção de água devido às propriedades estruturais (MEDINA *et al.*, 2014).

Apesar dos resultados aproximados quanto a absorção de água obtidos nos diferentes estudos, as diferenças discretas observadas nos valores podem ser justificadas pela variação na constituição do AR, uma vez que, os estudos de Bravo *et al.* (2018) e Medina *et al.* (2014) utilizaram material de usinas de beneficiamento de Portugal, enquanto Matias *et al.* (2014) da Escócia e Alexandridou *et al.* (2018) da Grécia.

Bravo *et al.* (2015b, 2018) analisaram a absorção de água para uso de concreto com aplicação estrutural e constataram uma redução na resistência do CAR. Ademais, ambos estudos retificam a necessidade de evitar partículas com granulometria na fração argila para produção de concreto que exija maior resistência.

A adição de superplastificantes foram analisadas comprovando que, apesar de não reduzirem a taxa de absorção de água, promovem o aumento da taxa de resistência do concreto (BRAVO *et al.*, 2018a, b; MATIAS *et al.*, 2014; MEDINA *et al.*, 2014) em até 35% (BRAVO *et al.*, 2018).

Melhores taxas foram obtidas na produção de CAR usando agregado misto para o concreto

estrutural, a uma taxa de 35% gráudo e 6% miúdo, bem como para concreto não estrutural, com 70% gráudo e 30% miúdo (ALEXANDRIDOU; ANGELOPOULOS; COUTELIERIS, 2018; ZHANG *et al.*, 2019).

Ainda, a maior porosidade das partículas de AR e a menor densidade dos materiais à base de argila e flutuantes, que podem estar presentes, fazem com que a densidade do AR seja menor se comparada ao AN (GONZÁLEZ-FONTEBOA; MARTÍNEZ-ABELLA, 2008; MEDINA *et al.*, 2014; NOVÁKOVÁ; MIKULICA, 2016; OMARY; GHORBEL; WARDEH, 2016), afetando diretamente a densidade do concreto, a qual está relacionada, além do peso próprio da estrutura, com a capacidade do concreto de suportar esforços (SAYADI *et al.*, 2016).

No entanto, a diferença no valor da densidade nem sempre é um problema, sendo uma característica necessária na produção de concreto leve, utilizados como base na produção de ligantes hidráulicos (GOMES *et al.*, 2015), conferindo uma vantagem no uso de AR.

Medina *et al.* (2014) compararam a densidade de agregados com tamanho máximo de até 20 mm, tomando como referência um AN de cascalho de densidade 2,66 g/m³, encontrando densidades de 2,54 g/m³ para AR com a presença de partículas flutuantes, e 2,56 g/m³ para AR sem a presença de partículas flutuantes. Para Agrela *et al.* (2011), os valores obtidos ficaram na faixa entre 2,22 e 2,58 g/m³, em estudo que caracterizou um total de 19 AR misturados com diferentes materiais constituintes.

Considerando que os valores de resistência de um concreto tendem a diminuir com o aumento das porcentagens da utilização do AR (MEDINA *et al.*, 2014), a resistência à compressão usualmente é o principal parâmetro verificado para determinar a qualidade de um concreto (BRAVO *et al.*, 2015b; OMARY; GHORBEL; WARDEH, 2016; SAYADI *et al.*, 2016). Isso ocorre devido à menor resistência mecânica dos AR, que promovem um aumento nas áreas frágeis no concreto e a maior absorção de água.

Contudo, a evolução de resistência do concreto produzido com AR ao longo do tempo é idêntica a evolução de um concreto produzido com AN, ou seja, a resistência continua aumentando após 28 dias, apesar do concreto convencional sempre atingir valores superiores ao CAR (BRAVO *et al.*, 2015b).

Medina *et al.* (2014) pesquisaram a resistência à compressão de diferentes concretos após 28 dias e todos os concretos apresentaram resistência à compressão acima de 30 MPa. Todavia, como esperado, os valores de resistência diminuíram com o aumento da proporção de substituição do AN pelo AR, obtendo em média a resistência à compressão de 15 a 20% menor para o CAR comparado ao concreto de referência. Para amenizar esse efeito, Pereira, Evangelista e De Brito (2012) verificaram aumento de até 69,5% na resistência à compressão

com uso de aditivos superplastificantes na produção de CAR.

Já os parâmetros densidade, absorção de água e coeficiente de Los Angeles (LA), usados para determinar a resistência à abrasão, foram investigados por Kox *et al.* (2019), que partiram do pressuposto que RCD composto por concreto com uma baixa relação água/cimento tende a possuir alta resistência. Os autores reportaram que o AR produzido tende a apresentar densidades mais altas e coeficientes de absorção de água mais baixos. Estes resultados permitem inferir que os ensaios de abrasão LA poderiam ser dispensados, se conhecida a taxa de absorção de água e a densidade do AR, o que conseqüentemente implicaria na redução de custos.

Seguindo esta mesma linha, Leite *et al.* (2011) ao avaliarem um AR com abrasão LA de 51,5%, ressaltaram que, como a resistência a esforços mecânicos do AR tende a ser menor do que a de AN, ocorre uma redistribuição de tamanhos durante o processo de compactação devido à quebra parcial dos agregados.

Outro potencial aplicação do CAR é em obras de pavimentação, porém, a exigência quanto a resistência mecânica do AR pode ser ainda maior quando comparada a concretos voltados para a construção de edificações (KOX *et al.*, 2019; LEITE *et al.*, 2011).

Com relação ao concreto não estrutural produzido com AR para uso na pavimentação, a energia de compactação é uma das propriedades mais alteradas, uma vez que, se comparado aos AN é necessária maior compressão dos agregados a fim de alcançar maior resistência para o concreto. Essas alterações são justificadas pelas características de deformabilidade e redistribuição dos AR devido à quebra inicial em função da compressão (BRAVO *et al.*, 2018; OSSA; GARCÍA; BOTERO, 2016).

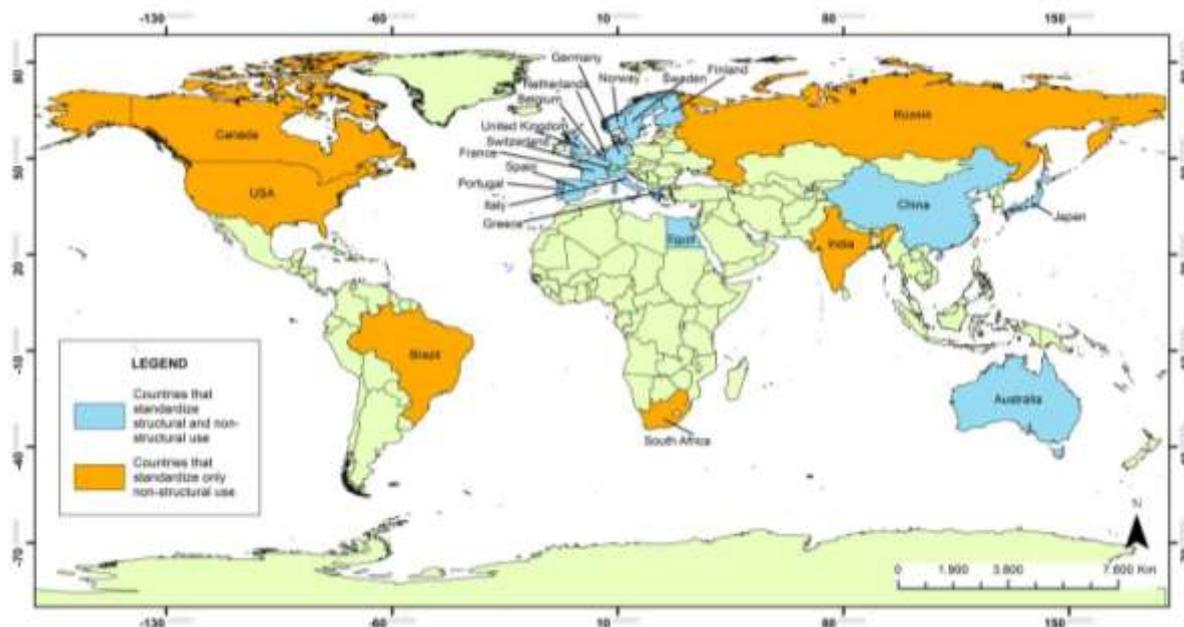
Apesar de serem observadas reduções significativas na resistência à abrasão desse tipo de concreto, o mesmo ainda assim pode ser usado na pavimentação (KUMAR, 2017) e na composição de camadas de base em vias pavimentadas (de médio volume de tráfego). O uso de AR é indicado nas concentrações de 10-20% (OSSA; GARCÍA; BOTERO, 2016), apesar de ser comprovado o uso com as características ideais na proporção de 25% de AR (RODRÍGUEZ *et al.*, 2016).

De maneira geral, todos os estudos supracitados demonstram que, apesar do uso do AR impactar nas propriedades físicas e mecânicas do concreto reduzindo alguns parâmetros, seu uso não é impeditivo já que o CAR atende aos requisitos mínimos e há ainda alternativas de tratamento, como a mistura de outros produtos, de forma a melhorar a performance, e, portanto, deve ser considerado como um produto tecnicamente viável, além dos benefícios ambientais inerentes e já discutidos.

2.3.3. Aspectos normativos: uso do agregado reciclado na produção de concreto

A regulamentação do uso do AR na produção de CAR não é uniformizada e a viabilidade do uso estrutural e não estrutural dos concretos produzidos com AR difere entre países havendo usos mais ou menos restritivos, conforme pode ser verificado na Figura 4.

Figura 4: Países que apresentam normas para uso estrutural e não estrutural do concreto de agregado reciclado.



Fonte: Construído a partir de ABNT (2004c), África do Sul (2018), Austrália (2008), Europa (2008), Gonçalves e De Brito (2010), Índia (2019), Kamel (2007), Ontário (2016), Tam, Soomro e Evangelista (2018).

A partir da Figura 4 é possível observar que, dentre os países avaliados quanto a existência de normativas para uso do concreto produzido com AR, a regulamentação do uso não estrutural do AR ainda é restrita. Se desconsiderar os países que compõem a União Europeia, que compartilham as mesmas normas, apenas 40% dos países permitem o uso estrutural do concreto de AR. Ainda assim, no continente europeu, 80% dos AR são usados na construção civil em obras de edifícios e infraestrutura e somente 20% em obras de pavimentação (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018).

A África do Sul estabelece o uso mais restrito, uma vez que normatiza o uso do agregado não estrutural apenas para pavimentação (ÁFRICA DO SUL, 2018). Assim como, nos Estados Unidos, onde mais de 60% dos AR são utilizados na formação de base na pavimentação, 9% na produção de concreto não estrutural para pavimento e 6% para produção de concreto de uso estrutural ou não estrutural (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018).

Quando o uso é menos restritivo e permite a utilização na produção de concreto estrutural são apresentados requisitos rígidos para garantir segurança técnica do produto. No caso da normativa europeia, o uso estrutural é restrito apenas para concreto armado, ou seja, com

sustentação de vigas metálicas (DE BRITO; AGRELA; SILVA, 2019). Nota-se que 25% do que é usado para aplicações não estruturais é utilizado em usos estruturais em países que não tem como aplicação comum a alvenaria (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018).

Conforme já exposto anteriormente, no Brasil, o uso dos AR em obras de pavimentação e na produção de concreto de uso não estrutural é regulamentado pelas normas da ABNT, NBR 15.115:2004 e NBR 15.116:2004, respectivamente (ABNT, 2005c, d). A NBR 15.115 estabelece procedimentos de execução de camadas em obras de pavimentação (ABNT, 2004d). Já a norma NBR 15116:2004, além de normatizar os requisitos de uso dos AR para a formação de camadas de pavimentação de reforço de subleito, revestimento primário e sub-base e base de pavimento, através da descrição de parâmetros de capacidade suporte, expansibilidade e energia de compactação necessária para execução das camadas, também estabelece os requisitos mínimos para produção de concreto de uso não estrutural com AR (ABNT, 2004c).

Diante do exposto, o desafio de consolidar o uso do AR, de forma geral, na construção civil, começa pelo concreto (principalmente de uso não estrutural em 80% dos países analisados) que já possui embasamento técnico consistente, mas depende da uniformização das especificações técnicas para uso estrutural e não estrutural, além de incentivos legais e governamentais que fomentem esse processo (MORESCO, 2017; TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018).

2.3.4. Estudo de caso - Avaliação do potencial da oferta e demanda por AR: cenário prospectivo no Espírito Santo

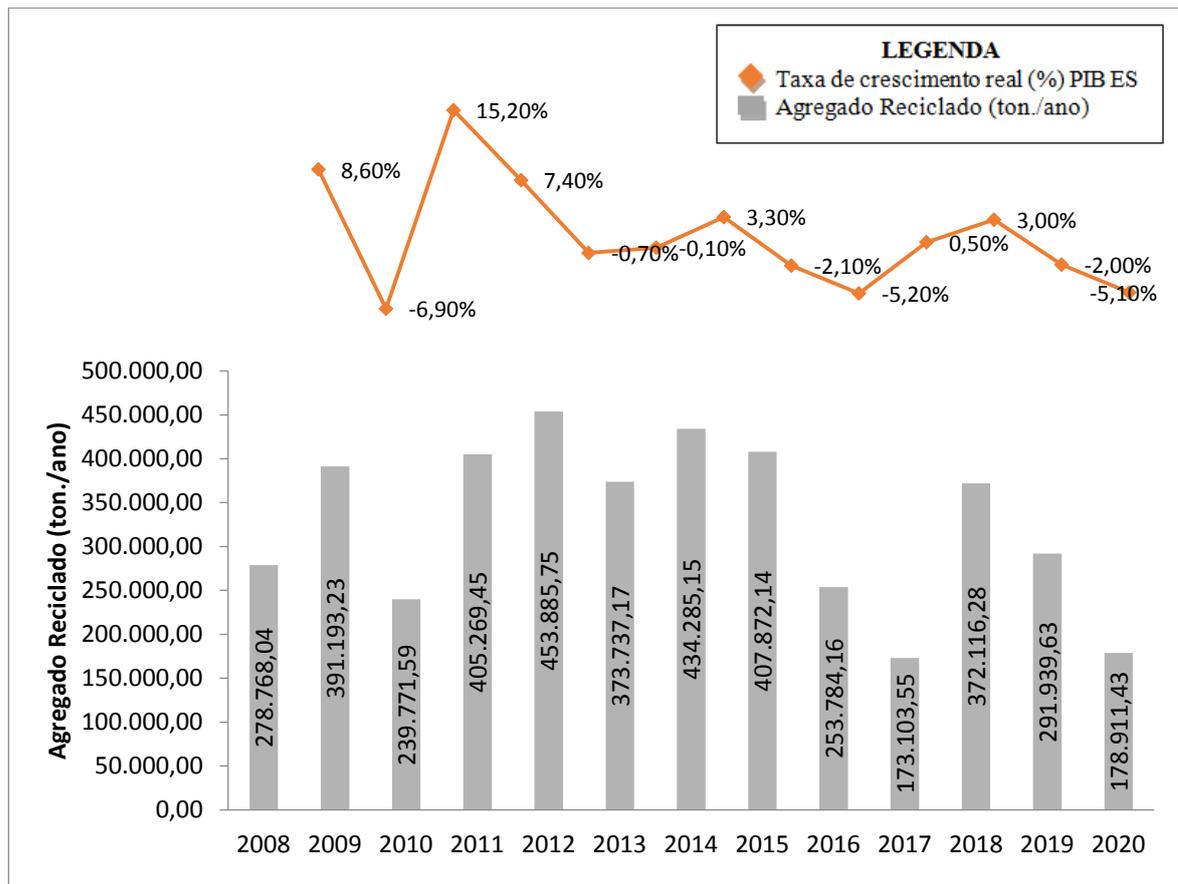
O Brasil gerou, em 2018, uma média em 64,75 milhões ton. de RCD, tendo sido coletadas pelos municípios brasileiros apenas 0,05% deste total (44.534,38 ton.) (MMA; SECRETARIA DE QUALIDADE AMBIENTAL, 2020) o que infere que no país ainda há vários pontos utilizados para a disposição irregular de RCD. Da Paz *et al.* (2020) chegaram a descrever uma média de 3,5 locais de disposição irregular por km² em estudo realizado em 7 municípios no estado de Pernambuco/Brasil.

Usinas de beneficiamento no Brasil operam, em média, com apenas 35% da sua capacidade produtiva, isso porque, problemas mecânicos e logísticos, com relação a aquisição de matéria-prima ou com a venda de AR, estão relacionados a interrupções no sistema produtivo (NUNES; MAHLER, 2020). Assim sendo, do quantitativo de RCD coletado (44.534,38 ton.) (MMA; SECRETARIA DE QUALIDADE AMBIENTAL, 2020), até 82,8% (36,9 mil ton./ano) pode ser beneficiado como AR (REZENDE; SANTANA, 2018; FERREIRA;

MOREIRA, 2013), demonstrando que o potencial comercial brasileiro está subutilizado. Dessa forma, exibe-se a importância de elementos regulatórios e logísticos que forneçam aporte no equilíbrio entre a oferta de RCD e demanda de AR.

No Espírito Santo/Brasil, o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do estado (PERS-ES) estimou para 2017 uma geração de 2.819.510 ton. de RCD (ESPÍRITO SANTO, 2019). Considerando a análise da composição gravimétrica dos RCD de Vitória/ES realizado por Ramos (2007), cerca de 79,23% desses resíduos estariam classificados com potencial reciclável como AR, resultando em uma oferta para o Estado de 2.233.897,77 ton. desse tipo de RCD para o ano da pesquisa. Já o peso de areia e brita/bica corrida demandado por obras públicas no Espírito Santo é exibido na Figura 5.

Figura 5: Demanda total por agregado natural (areia e brita/bica corrida) (ton./ano) em obras públicas na Região Metropolitana da Grande Vitória, Espírito Santo, Brasil, e taxa de crescimento do PIB no estado (2008-2020).



Fonte: Construído a partir de GEO-OBRAS ES (2021).

Em relação a demanda por AN exibida na Figura 5, calcula-se que, em média, há demanda de 327.279,81 ton./ano de areia e brita em obras públicas no ES por ano, considerando um desvio-padrão de 96.070,87 ton./ano. Nota-se que há heterogeneidade, porém, constância na

demanda dos AR, sendo possível acompanhar essa tendência através da taxa de crescimento da economia, medida através da taxa à qual cresce o PIB estadual medido em termos reais e sua relação com a construção civil (IDEIES; FINDES, 2019).

Ainda com relação a Figura 5, a respeito das frações granulométricas, um total de 87.003,07 m³ de areia (25%) e de 263.730,07 m³ de brita (75%) foram demandados para obras públicas na RMGV entre 2008 e 2020 (GEO-OBRAS ES; 2021). Assim, a média de AN demandada como areia e brita representou cerca de 14,65% de toda a massa de RCD passível de ser beneficiada no Estado (ESPÍRITO SANTO, 2019; GEO-OBRAS ES; 2021).

Percebe-se, dessa forma, que a demanda média anual por AN em obras públicas municipais ou estadual quando seu uso já encontra amparo normativo (na pavimentação e uso para concreto não estrutural) foi menor que a oferta de AR proveniente de empreendimentos geradores de RCD consultados no Espírito Santo (GEO-OBRAS ES; 2021).

Mesmo assim, embora as fontes de AN sejam finitas (JOCHEM *et al.*, 2019), o emprego do AR em sua substituição para uso não estrutural (uso na formação de base e sub-base para obras de infraestrutura) ainda são inexpressivas. Nunes e Mahler (2020) descrevem como possíveis motivos para esse fato: a ausência de padrões para produção do AR que possam promover a ampliação de suas aplicações em nas obras públicas. Como resultado dessa ausência de esclarecimento, apenas 39% dos Estados brasileiros têm metas de desvio de RCD para reciclagem em seus instrumentos de planejamento (MMA, 2020).

Sendo assim, fica claro que os entraves que se apresentam na viabilização da reciclagem de RCD estão pautadas nas questões políticas e financeiras, uma vez que, as questões técnicas apresentam suporte em pesquisas e normas que garantem a segurança técnica do uso do AR.

2.4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Em nível mundial, a utilização de RCD reciclados, sobretudo os agregados como solo e cimento visando o retorno à cadeia produtiva da construção, já é normatizada para diferentes usos, tais como reutilização nos próprios canteiros de obra, na correção de acidez do solo, na produção de argamassa, na formação de camadas de base e sub-base de pavimento e na produção de concreto. No entanto, o uso de RCD reciclado pode acarretar alterações na estrutura, no aumento de porosidade e na composição dos elementos produzidos com AR como consequência da alteração de parâmetros como densidade e absorção de água. As alterações destes parâmetros podem reduzir a resistência e a durabilidade do material

influenciando diretamente na viabilidade e segurança técnica do uso do material produzido, principalmente quanto ao uso estrutural do agregado.

A exemplo disso, identificou-se que na produção de concreto estruturais e não estruturais com AR, os produtos mais resistentes utilizaram materiais de composição mista (com até 50% de AR), homogeneizados e classificados, evitando agregados miúdos e principalmente aqueles contendo minerais argilosos. Porém, no Brasil e no mundo, o uso do AR na pavimentação e na produção de concreto não estrutural possui mais amparo normativo tanto nacional quanto internacional, o que não acontece para o emprego de AR na produção de concreto estrutural e na produção de argamassa.

Sendo o uso não estrutural do AR, na produção de concreto e na pavimentação, normatizado na maioria das nações (80%), a análise da demanda do AR para estes usos é fundamental para verificação da viabilidade técnica do uso do AR.

Com relação aos aspectos da oferta de RCD, em nível estadual, mostraram-se cerca de 70% que a demanda por agregado passível de substituição direta em uso não estrutural. No entanto, quando calculada a oferta de RCD passível para beneficiamento sob o quantitativo de RCD coletado, a taxa de demanda por agregado passível de uso não estrutural é 6 a 18 vezes maior que a oferta. Dessa forma, conclui-se que há oferta de RCD suficiente para suprir a demanda por AR, para fabricação de concreto não estrutural e na pavimentação em nível estadual.

Desse modo, os resultados suscitam novas discussões e estudos, uma vez que apontam que a viabilidade técnica não é o principal fator limitante, deixando como lacuna e sugestão de pesquisa, a avaliação dos fatores limitantes que podem inviabilizar a reciclagem de RCD, tais como econômico, ambiental, social e cultural, além da necessidade de padronizar as normas técnicas. Principalmente, identificar qual desses fatores mais influenciam na viabilidade dessas usinas.

CAPÍTULO 3: VIABILIDADE FINANCEIRA DE USINAS DE BENEFICIAMENTO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Resumo

A viabilidade financeira de usinas de beneficiamento de reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) interpassa por questões normativas e técnicas. Assim, se consideradas vencidas e viáveis os elementos técnicos, pode-se facilmente não só descrever, como também analisar os elementos que compõem os custos nas usinas de beneficiamento, dando atenção especial às modalidades de captação de recursos e de subsídio na viabilidade financeira dessas usinas. Dessa forma, a partir de ampla revisão bibliográfica e documental, além da análise de diferentes cenários, verificou-se que o custo com transporte pode ser cerca de 50% dos custos operacionais, sendo, no entanto, custos necessários. Diferentemente, as taxas juros de financiamento, que variam entre $i = 0\%$ e $i = 62,54\%$ a.a, podem impactar em até 95% no Valor Presente Líquido (VPL) do empreendimento. A análise de diferentes cenários demonstrou que os impactos da alteração da venda de AR e a taxa de venda de RCD, pode impactar em 100% e 60% no VPL, respectivamente. Conclui-se que onde estão presentes políticas subsidiárias, há expansão do mercado de reciclagem e desenvolvimento de usinas de beneficiamento de RCD.

Palavras Chaves: Resíduos de Construção e Demolição. Agregado reciclado. Viabilidade financeira. Usinas de beneficiamento.

3.1. INTRODUÇÃO

As usinas de beneficiamento são os locais onde os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) são transformados e classificados em produtos aplicáveis à construção civil, como é o caso do agregado reciclado (AR), podendo ser móveis ou fixas (BRASIL, 2002).

Usinas móveis demandam volumes de RCD superiores a 5.000 ton. por área de obra a que está vinculada, porém sua estrutura para classificação do RCD é limitada, o que pode acarretar num AR de menor qualidade (KUMBHAR; GUPTA; DESAI, 2013). As usinas fixas permitem a produção de AR de melhor qualidade, uma vez que apresentam esteiras de triagem manual e um triturador extra (KUMBHAR; GUPTA; DESAI, 2013; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2017).

Embora o custo de investimento inicial para usinas fixas seja maior que para as móveis, o custo operacional final, é menor para as usinas fixas, destacando-as por esse motivo em unidades instaladas ao redor do mundo (BILSEN *et al.*, 2018; ZHAO; LEEFTINK; ROTTER, 2010). Na Bélgica, por exemplo, 80% das usinas são fixas e apenas 20% são móveis (BILSEN *et al.*, 2018).

Nas usinas fixas, inicialmente, os RCD passam por um pré-tratamento para redução de tamanho, antes de seguir para o classificador vibratório, no qual são retirados solos e partículas de gesso (BARBUDO *et al.*, 2020). O RCD considerado “limpo”, classificado com potencial para ser transformado em AR, segue para a trituração. Após passar pelos britadores, os agregados triturados passam por peneiras vibratórias onde são classificados de acordo com o tamanho da partícula. A intensidade aplicada ao processo de trituração está atrelada a demanda pelo agregado na região, além daqueles usos previstos em normas técnicas (GULARTE *et al.*, 2020; ULUBEYLI; KAZAZ; ARSLAN, 2017).

Em função da heterogeneidade característica dos RCD, em usinas fixas, após passar pelo alimentador vibratório, o resíduo segue para a esteira de triagem para retirada de materiais com potencial reciclável (plástico, metal, vidro, papel/papelão, madeira ou gesso), que possam danificar o britador ou ainda, que impeçam que o AR produzido atenda às especificações segundo a NBR n°15.116/2004 (ABNT, 2004c). Os resíduos perigosos ou material sem potencial recicláveis são encaminhados para disposição final ambientalmente correta (BARBUDO *et al.*, 2020; KUMBHAR; GUPTA; DESAI, 2013)

Apesar de existirem alterações na estrutura química e física do AR se comparado ao agregado natural, o processo de beneficiamento e classificação é realizado respeitando os critérios técnicos, vinculando a utilização dos AR às características do concreto que se deseja obter (ZHENG *et al.*, 2017; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2019).

Sendo assim, uma vez eleitos as aplicações cuja viabilidade técnica já seja comprovada, a viabilidade financeira das usinas de beneficiamento de RCD se torna o fator decisivo para a implantação do empreendimento, dependendo decisivamente de custos relativos à instalação, operação, transporte de agregado beneficiado, da disponibilidade e custos de RCD, bem como da demanda de AR (GHISELLINI; ULGIATI, 2020; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2017).

Em relação a perspectiva do mercado nacional e estadual para o agregado reciclado, no Brasil entre 2015 e 2018, aumentou em 16% o número de centros de reciclagem de RCD chegando ao número de 360 unidades em todo território nacional (NUNES; MAHLER, 2020). Sendo assim, é essencial na tomada de decisão do investidor uma vez que o investimento de capital é

remunerado pelos juros e a comparação dos valores monetários só é possível em um mesmo período de tempo (MAGNI; MARCHIONI, 2020).

As despesas para produção devem ser inferiores ao valor de venda de AR para que finalmente esse material possa ser economicamente competitivo ao agregado natural (AN) (ULUBEYLI; KAZAZ; ARSLAN, 2017). A falta de planejamento na instalação ou expansão de um empreendimento é a razão mais comum para o fracasso de um investimento, principalmente, no que se refere a busca por fontes de financiamento que a decisão que mais carece ser planejada (SEBRAE, 2015a).

Os custos de implantação e operação são definidos conforme a capacidade de processamento da usina. As taxas de financiamento, essenciais ao processo de instalação de usinas desse porte (COELHO; BRITO, 2013), por sua vez, variam conforme a modalidade de crédito escolhida (SEBRAE, 2015a). Sendo assim, é necessário avaliar o impacto dessas variações na viabilidade desse tipo de empreendimento. Dessa forma, a viabilidade financeira desse tipo de empreendimento tem forte dependência de incentivos fiscais ou outros subsídios econômicos (NUNES; MAHLER, 2020).

Operação de crédito por meio de financiamento e capital de giro para indústria caracteriza 42% de todo crédito concedido em 2019 (BACEN, 2019). Essas modalidades de crédito podem ser concedidas por empresas financeiras, bancos e agências governamentais. Ao financiado é cobrado uma taxa de juros, com exceção do crédito concedido a Fundo Perdido/Subvenção.

Fundo Perdido são projetos financiados por meio de editais de fomento à pesquisa e inovação (SEBRAE, 2015a). Os instrumentos de incentivo ao mercado da reciclagem dispõem de políticas de taxa ou impostos incidentes sobre a destinação de RCD em aterros sanitários para incentivo de desvio para reciclagem, sendo as políticas que mais influenciam no desenvolvimento da reciclagem de RCD (84,6%) (LI *et al.*, 2020).

No Brasil, as taxas de desvio de RCD para aterro sanitário são os principais instrumentos de fomento a reciclagem presente em 38,89% dos estados brasileiros (MMA; SECRETARIA DE QUALIDADE AMBIENTAL, 2020). Ainda, existem políticas subsidiárias como editais para concessão de crédito a fundo perdido (BETARELLI JÚNIOR *et al.*, 2020) e instrumentos para isenção de impostos sobre circulação de mercadoria reciclada (RIO DE JANEIRO, 2015).

Assim, a análise da dimensão financeira dentro da gestão do RCD desses empreendimentos é imprescindível em um cenário onde as restrições financeiras das empresas para um investimento dispendioso são impactantes, como é o caso do cenário brasileiro (COELHO;

BRITO, 2013; KANNEBLEY JÚNIOR; DE PRINCE, 2015; FU et al., 2017; GHISELLINI; ULGIATI, 2020). A análise da dimensão financeira considera, apenas, custos que são imprescindíveis para instalação e operação da empresa: transporte, diesel, terreno, despesas com aquisição, instalação e manutenção de equipamentos, entre outros (GULARTE, 2020; NUNES; MAHLER, 2020; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2017). E apesar de o financiamento ser imprescindível, as taxas de juros atreladas a esse não, quando considerando modalidades de financiamento com juros de 0% a.a. No entanto, não são encontrados estudos que analisem o impacto das taxas de juros na viabilidade financeira do empreendimento.

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo descrever os elementos que compõem os custos bem como suas respectivas magnitudes para a implementação de uma usina de beneficiamento de RCD fixa. O trabalho também buscou analisar a dimensão financeira dentro da gestão de RCD para incentivo ao uso do AR e para a viabilização do seu uso e do empreendimento. Para isso, a avaliação do efeito de captação de recursos financeiros será realizada por meio do VPL (Valor Presente Líquido), aplicando dados brasileiros e do estado de Espírito Santo/Brasil.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Etapa I - Revisão sistemática

A metodologia adotada foi uma pesquisa sistematizada baseada na técnica de leitura e análise de fontes bibliográficas e documentais, conforme se observa no Quadro 4.

Quadro 4: Etapas metodológicas para desenvolvimento da etapa de revisão sistemática para coleta de dados secundários.

OBJETIVOS	FERRAMENTA	BASE DE DADOS	PERÍODO	TERMOS DE BUSCA
Levantamento bibliográfico: dimensionamento da usina				
Identificar os elementos formadores de custos em usinas de beneficiamento de RCD	Pesquisa bibliográfica, usou a ferramenta de código aberto, bibliometrix e mapeamento bibliométrico empregando programação em linguagem R (ARIA; CUCCURULLO, 2017).	SCOPUS e Web of Science	2016 a 2021	("construction and demolition waste" OR "recycled aggregate"). AND ("economic feasibility" OR "cost*")
Mensurar a magnitude de cada elemento formador de custo, foi utilizado o método de Valor Presente Líquido (VPL)				
Estudo de caso: Modelagem de uma usina de beneficiamento de RCD na RMGV				

Elaboração dos cenários para avaliação das diferentes modalidades de captação de recursos para financiamento de uma usina de beneficiamento	Pesquisas documental e bibliográfica. Elaboração dos cenários com base no levantamento dos custos necessários para análise, orientado segundo o método de VPL.	Arquivos e documentos de empresas ou governamentais e publicações nacionais e internacionais.	2019 a 2021	"Análise de viabilidade financeira de usinas de beneficiamento de RCD"
Identificação das taxas de juros aplicadas as modalidades de financiamento brasileiras, bem como, análise dos efeitos dessa aplicação na viabilidade financeira				"Juros", "Crédito", "Financiamento"
Levantamento e análise de taxaço de RCD em aterro sanitário	Pesquisa documental	Leis e normas.	Não se aplica	("Subsídio" OR "Regulamentações") AND "RCD"

Fonte: Autoria própria.

3.2.2. Etapa II - Estudo de viabilidade financeira em empreendimento hipotético

O estudo de viabilidade financeira foi pautado sobre a análise do Valor Presente Líquido (VPL) em um estudo de caso de um empreendimento hipotético (usina de beneficiamento de RCD fixa) dimensionado para a Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV), estado Espírito Santo.

A escolha pelo método VPL se deu devido ser o método mais robusto e mais utilizado na prática de análise financeira, capaz de analisar e correlacionar diferentes cenários. O método VPL analisa o impacto do fluxo de caixa e estima o valor adicionado ao empreendimento/empresa com a execução do projeto (MAGNI; MARCHIONI, 2020). O VPL é calculado por meio da Equação 1, no qual o empreendimento é viável se $VPL \geq 0$, e inviável se $VPL < 0$ (CURY, 2011).

$$VPL(\$) = \sum_{t=0}^n \frac{FLC_t}{(1+i)^t} \quad (Eq. 1)$$

Onde:

FLC = Fluxo Líquido de Caixa - FLC (R\$/ano);

n = Horizonte de planejamento ou avaliação (em anos);

t = Período de tempo (ano);

i = Taxa de juros aplicada ou Custo do capital (%/ano).

Essa análise conta com o FLC, calculado pela diferença entre as receitas e as despesas em cada período de tempo determinado, geralmente, ao ano (PENEDO, 2005). Composto por elementos que compõem custos em uma análise de viabilidade, ainda são considerados tributos incidentes sobre receitas e renda, taxas de depreciação e amortização (CURY, 2011).

Dessa forma, tem-se para esse trabalho as Despesas Pré-Operacionais (DPO), calculadas conforme a Equação 2, e as Despesa Operacional (DO), calculada conforme a Equação 3.

$$DPO (\$) = T_e + O + I + E \quad (\text{Eq. 2})$$

Na qual:

T_e = Custos de aquisição do terreno (R\$);

O = Custos com obras (R\$);

I = Custos de instalação de equipamentos (R\$);

E = Custos com aquisição de equipamentos (R\$).

$$DO (\$/ano) = A + M_o + C + M_a + D_i + R + T + D_e + t \quad (\text{Eq. 3})$$

Na qual:

A = Amortização dos custos (R\$/ano);

M_o = Custo de mão de obra (R\$/ano);

C = Custos com consumo de água e energia (R\$/ano);

M_a = Custos com a manutenção de equipamentos (R\$/ano);

D_i = Custo com diesel para maquinários (R\$/ano);

R = Dispêndios com rejeito: transporte e taxa de aterro (R\$/ano);

T = Custos de frete com o transporte de RCD e AR ($\frac{R\$}{km/ano}$);

D_e = Depreciação (R\$/ano);

t = Custos com tributos (R\$/ano);

A escolha da RMGV para essa simulação se fundamenta pela proximidade existente entre os principais geradores de RCD, podendo assumir desprezíveis os custos de transporte do material vendido, conforme indicam os autores Duran, Lenihan e O'regan (2006). No Espírito Santo existem 4 usinas que beneficiam os RCD, localizadas nos municípios de Vila Velha, Cariacica, Serra e Anchieta. Apesar de terem como principais clientes órgãos públicos, empresas de pavimentação e construtoras, o mercado de AR enfrenta desafios, como: a falta de conhecimento sobre o uso do produto AR, à tributação equivalente ao agregado natural e à baixa adesão dos órgãos públicos (ESPÍRITO SANTO, 2019).

O dimensionamento da usina considerou a demanda regional por agregado, conforme apresentando no Capítulo 2. Dessa forma, o Espírito Santo gerou em 2017 aproximadamente 2.233.897,77 ton. de RCD, passível de ser beneficiado como AR. A RMGV, composta pelos municípios de Cariacica, Guarapari, Fundão, Serra, Viana, Vila Velha e Vitória, é responsável por, em média, 92% da demanda de todo AN para construção civil do estado, considerando

dados de 2018 e 2019 (GEO-OBRA S ES, 2021). Ainda, em média a RMGV demanda cerca de 290.130,49 ton./ano de areia e brita, que representa 13% do total de AN demandado pelo estado e equivale a demanda de 154,96 ton./hora de agregado, conforme especificado no Capítulo 2).

As DPO e DO são calculados a partir da capacidade máxima produtiva de 130 ton./hora. Uma vez que, se aproxima da demanda por AN calculada para RMGV, ainda, está conforme a usina projetada pela SIMPLEX (2018). As DPO da usina estão apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5: Despesas pré-operacionais da usina hipotética instalada na RMGV.

Despesas pré-operacionais		Unidade		Fonte:
T_e	(Metropolitana - R\$ 36.681/ha)	2 ha		[2][5]
O	CUB-ES dez/2020 (R\$ 1837,54/m ²)	100m ²		[7]
I	Instalação mecânica	5% E		[4]
	Instalação elétrica	10% E		
E	Retroescavadeira 580 M (89hp - 0,79 m ³)	1		[1]
	Cabine de Separação Manual	1		[3]
	Alimentador vibratório	11,03kWh	1	[6]
	Britador de Mandíbulas	73,55kWh	1	
	Britador Cone Hidráulico	147,10kWh	1	
	Peneira Vibratória (10m ² de peneiramento)	18,39kWh	1	
	Esteira Transportadora 1 - 30" x 29m	18,39kWh	1	
	Esteira Transportadora 2 - 24" x 17m	7,35kWh	1	
	Esteira Transportadora 3 - 20" x 18m	5,52kWh	3	
	Outros: Quando elétrico e estrutura	1		

Fonte: [1] CASE (2021); [2] CEDAGRO (2017); [3] Coelho e De Brito (2013); [4] Jadovski e Masuero (2006); [5] Moresco (2017); [6] SIMPLEX (2018); [7] SINDUSCON-ES (2020).

Quanto aos custos necessários para implantação da usina apresentados na Quadro 5, a tomada de decisão quanto a localização do terreno considerou a proximidade dos centros urbanos (DURAN; LENIHAN; O'REGAN, 2006) visto que a maior geração de RCD e demanda por AR estão localizadas na RMGV do Espírito Santo, como apresentado no Capítulo 2. Considerou-se ainda os custos para aquisição de um terreno de 2 hectares, espaço tido como necessário para instalação de uma usina com capacidade produtiva de 130 ton./hora (MORESCO, 2017) a R\$ 36.681/ha (CEDAGRO; 2017).

Ainda, para esse tipo de empreendimento, determina-se em 10 anos o tempo de depreciação (RECEITA FEDERAL DO BRASIL, 2017), sendo assim, em busca de calcular o VPL, o estudo de viabilidade financeira compreendeu a aplicação de 3 cenários que simulam a evolução produtiva da usina: (Cenário A) 30% da capacidade produtiva, com 3 anos; (Cenário B) 60% da capacidade produtiva, com 3 anos; e (Cenário C) 100% da capacidade produtiva, com 4 anos de operação (Quadro 6).

Os valores em R\$/ano para cada cenário produtivo, apresentados no Quadro 6, referem-se a todos os valores pagos para se manter a usina de beneficiamento de RCD em operação, considerando uma escala de trabalho de 8 h/dia e 22 dias úteis por mês.

Quadro 6: Dimensionamento das despesas operacionais da usina de beneficiamento - três cenários produtivos.

Despesas operacionais		(A) 30% (39ton./hora)	(B) 60% (78ton./hora)	(C) 100% (130ton./hora)	Fonte:
M_o	Encarregado (R\$7.775,49)	1 funcionário	1 funcionário	2 funcionários	[3][8]
	Operador de Equip. (R\$1.734,81)	1 funcionário	2 funcionários	3 funcionários	
	Auxiliar de Produção (R\$1.349,82)	4 funcionários	8 funcionários	12 funcionários	
C	Energia TUSD = R\$0,06182/kWh TE = R\$0,24983/kWh	281,34 kWh	281,34 kWh	281,34 kWh	[7]
	Água – Tarifa R\$10,22/m ³	33.696 m ³ /ano	67.392 m ³ /ano	112.320 m ³ /ano	[4][9]
D_i	Retroescavadeira - consumo 8 L/h	528 h/ano	792 h/ano	1.056 h/ano	[1][15]
	Caminhão (Cap.14,6t) - 2,8 km/L	2 un./h	5 un./h	9 un./h	[1][2][7]
R	1,61% do RCD, Taxa R\$ 80,00/ton.	0,63 ton./hora	1,26 ton./hora	2,09 ton./hora	[13]
	Transporte rejeito (Frete + D_i)	0,04 un./h	0,09 un./h	0,14 un./h	[1][2][7]
T	Transporte: RCD, AR e rejeito. Valor total em frete para coleta nos municípios: R\$ 235.467,05/dia	2 rotas	5 rotas	9 rotas	[2]
D_e	10% em 10 anos	0	1/7 do Equip./ano	1/7 do Equip./ano	[13][10]
t	15% sobre Lucro Total	15%	25%	25%	[11][14]

Fonte: [1]ANP (2020); [2]Brasil e DNIT (2020); [3]CAGED/MTE (2019); [4]CESAN (2019); [5]Coelho e De Brito (2013); [6]EDP (2020); [7]FORD (2013); [8]Jadovski e Masuero (2006); [9]Lima (2013); [10]Moresco (2017); [11]Nunes e Mahler (2020); [12]Ramos (2007); [13,14]Receita Federal (2017, 2020); [15]USAID (2005).

Quanto aos custos com energia, destaca-se que esses valores foram calculados com base no consumo energético de cada equipamento e as taxas de consumo foram classificadas através da forma de consumo em: "Fora de Ponta (horário comercial)", "Azul" e Grupo A2 (EDP, 2020). A manutenção dos equipamentos foi orientada segundo Coelho e De Brito (2013), com os valores corrigidos segundo a taxa de inflação. Os dispêndios com diesel foram calculados com base na cotação média no Espírito Santo, R\$ 3,307/L (cotação de 16/08/2020 a 22/08/2020) (ANP, 2020) e utilizados na aplicação dos cenários de estudo de caso. Contudo, os impactos com os dispêndios de transporte devem ser monitorados, uma vez que, mostraram-se em trajetória ascendente estando, atualmente, 51% maior que no ano anterior (R\$ 4,997/L cotação de 24/10/2021 a 30/10/2021) (ANP, 2021).

O custo para descarte de rejeito foi calculado sobre a porção 1,61% de RCD classificada como rejeito (RAMOS, 2007) pelo valor da taxa cobrada (R\$ 80,00/ton.) para descarte de resíduo sólido urbano em aterro sanitário licenciado localizado em Cariacica/ES.

O custo com transporte decorreu segundo cálculo para piso mínimo de frete (BRASIL; DNIT, 2020). Considerou-se a quilometragem rodada, através do Google Maps de Cariacica/ES - onde será situada a usina de beneficiamento em razão da proximidade do aterro sanitário -

para os outros municípios da região Metropolitana. Para o cálculo do frete foi considerado um consumo de diesel de 2,8 km/L no valor de R\$ 3,307/L de diesel (ANP, 2020). O Quadro 7 representa o valor total de frete para transporte de 14,6 ton. de RCD por viagem, conforme considerado para um caminhão basculante viável para atividade.

Quadro 7: Custo calculado para valor de frete para transporte de RCD

Distância	km	Piso mín. frete (R\$)	Diesel (L)	Custo Diesel (R\$)
Cariacica (Aterro Sanitário Licenciado) X Vitória	28,3	R\$ 18.240,07	20,2	R\$ 66,85
Cariacica (Aterro Sanitário Licenciado) X Vila Velha	34,3	R\$ 22.107,22	24,5	R\$ 81,02
Cariacica (Aterro Sanitário Licenciado) X Serra	33,6	R\$ 21.656,05	24,0	R\$ 79,37
Cariacica (Aterro Sanitário Licenciado) X Cariacica	7,3	R\$ 4.705,04	5,2	R\$ 17,24
Cariacica (Aterro Sanitário Licenciado) X Guarapari	60,3	R\$ 38.864,88	43,1	R\$ 142,44
Cariacica (Aterro Sanitário Licenciado) X Viana	18,2	R\$ 11.730,36	13,0	R\$ 42,99
SOMA	182	R\$ 117.303,62	130	R\$ 429,91
SOMA TOTAL IDA E VOLTA		R\$ 235.467,05		

O tributo incidente sobre a receita das pessoas jurídicas compreende a 15% da receita sobre o lucro, com adicional de 10% se caso exceder R\$ 20.000,00/mês (RECEITA FEDERAL, 2020).

Com relação às taxas de juros aplicadas, quanto à indústria de beneficiamento de RCD, há consenso da necessidade de subsídios governamentais para viabilidade financeira das usinas (FU *et al.*, 2017; GULARTE *et al.*, 2020; NUNES *et al.*, 2007) e, uma vez que existem modalidades de crédito, o planejamento e análise das modalidades de captação de recursos de terceiros bem como das taxas de juros que incidem sobre esse financiamento, além de benefícios fiscais, são necessários para viabilizar sua implementação (COELHO; DE BRITO, 2013; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2017). O Quadro 8 apresenta a variação juros aplicadas às diferentes modalidades de crédito e suas determinadas taxas de juros que serão para análise de sensibilidade do Valor Presente Líquido (VPL).

Quadro 8: Taxas de juros aplicadas para modalidades de crédito nacional e internacionais.

Modalidade de captação de recursos	i	i (%/ano)	Fonte
Subvenções/Fundo Perdido	i_0	0	SEBRAE, 2015a
Capital de Giro - Na China em 2019	i_1	4,35	WORLD BANK, 2019
BNDES	i_2	13,09	BNDES, 2020
CG - Bancos, superior 365 dias (em 2020)	i_3	16,37	BACEN, 2020 - Cotação: 22 a 28/07/2020
Pessoa Física - Banco (em 2020)	i_4	29,56	
CG - Financeiras, superior 365 dias (em 2020)	i_5	30,63	
Capital de Giro - No Brasil em 2019	i_6	37,46	WORLD BANK, 2019
Pessoa Física - Financeira (em 2020)	i_7	62,54	BACEN, 2020 - Cotação: 22 a 28/07/2020

Legenda: CG - Capital de Giro; i - Taxa de juros aplicada.

Fonte: Autoria própria.

A variação das taxas, observadas entre as modalidades de crédito apresentadas no Quadro 8, se dá devido aos diferentes graus de risco e incerteza a quem se destinam os créditos, definidos a partir da tomada de decisão dos portadores do crédito. A determinação da taxa de juro prefixada inicialmente considera alterações inflacionárias futuras, já a pós-fixada acompanha os riscos do setor econômico, dessa forma é inicialmente fixada de forma menos onerosa (BACEN, 2019).

3.2.3. Elaboração dos cenários para Análise de Sensibilidade do VPL

A elaboração dos cenários se deu por meio de aplicação de 2 cenários base referências, denominados A (onde, será calculado o VPL com relação a variação da taxa de juros e valor venda de agregado reciclado e B (onde, será calculado o VPL com relação a variação da taxa de juros e da taxa de recebimento de RCD).

Dentre os valores aplicados para venda de AR, aplicam-se valores que variam de cenários onde são 100% igual ao valor de venda de AN (DER-ES, 2020; SINDUSCON/ES, 2019). Ao aplicado para venda de AR no ES, 77% menor que o valor de venda da brita natural, e 81,4% menor que o valor da areia, conforme dados fornecidos em 2021 por uma empresa local da RMGV e apresentados no Quadro 9. Ainda, considerou-se o percentual de demanda por brita (75%) e areia (25%) na RMGV (CAPÍTULO 2), a fim de calcular o valor de venda AR para todo RCD recebido, exceto da porção de rejeito de 1,61% (RAMOS, 2007).

Quadro 9: Valores aplicados aos cenários para venda de AR.

AREIA	R\$/ton.	BRITA	R\$/ton.	Fonte:
100%	78,77	100%	90,85	DER-ES (2020)
90%	70,89	90%	81,77	Autoria própria
80%	63,02	80%	72,68	
75%	59,08	75%	68,14	
70%	55,14	70%	63,6	
60%	47,26	60%	54,51	
50%	39,39	50%	45,43	
49%	38,60	27%	24,53	Nunes e Mahler (2020)
25%	19,69	25%	22,71	Autoria própria
22,85%	18,00	18,60%	16,9	Dados fornecidos em 2021 por uma empresa local da RMGV

Fonte: Autoria própria.

Desse modo, o Quadro 10 apresenta os cenários trabalhados para análise de sensibilidade do VPL para os cenários de Base A. Manteve-se como valor fixo a taxa de cobrança para recebimento de RCD por R\$ 10,00/ton. RCD separado e R\$ 20,00/ton. para o RCD misturado, conforme dados fornecidos em 2021 por uma empresa local na RMGV. Com relação aos valores de juros, variou-se com base no Quadro 8, assim como para valores de venda de AR, variam com base no Quadro 10.

Quadro 10: Cenário Base A - VPL com relação a variação da taxa de juros e valor venda de agregado reciclado.

Valores fixados para cálculo do VPL: taxa para recebimento de RCD separado R\$ 10,00/ton. RCD misturado R\$20,00/ton.								
	$i = 0\%$	$i = 4,35\%$	$i = 13,09\%$	$i = 16,37\%$	$i = 29,56\%$	$i = 30,63\%$	$i = 37,46\%$	$i = 62,54\%$
Areia R\$ 78,77/ton. Brita R\$ 90,85/ton.	VPL _{A1}	VPL _{A11}	VPL _{A21}	VPL _{A31}	VPL _{A41}	VPL _{A51}	VPL _{A61}	VPL _{A71}
Areia R\$ 70,89/ton. Brita R\$ 81,77/ton.	VPL _{A2}	VPL _{A12}	VPL _{A22}	VPL _{A32}	VPL _{A42}	VPL _{A52}	VPL _{A62}	VPL _{A72}
Areia R\$ 63,02/ton. Brita R\$ 72,68/ton.	VPL _{A3}	VPL _{A13}	VPL _{A23}	VPL _{A33}	VPL _{A43}	VPL _{A53}	VPL _{A63}	VPL _{A73}
Areia R\$ 59,08/ton. Brita R\$ 68,14/ton.	VPL _{A4}	VPL _{A14}	VPL _{A24}	VPL _{A34}	VPL _{A44}	VPL _{A54}	VPL _{A64}	VPL _{A74}
Areia R\$ 55,14/ton. Brita R\$ 63,60/ton.	VPL _{A5}	VPL _{A15}	VPL _{A25}	VPL _{A35}	VPL _{A45}	VPL _{A55}	VPL _{A65}	VPL _{A75}
Areia R\$ 47,26/ton. Brita R\$ 54,51/ton.	VPL _{A6}	VPL _{A16}	VPL _{A26}	VPL _{A36}	VPL _{A46}	VPL _{A56}	VPL _{A66}	VPL _{A76}
Areia R\$ 39,39/ton. Brita R\$ 45,43/ton.	VPL _{A7}	VPL _{A17}	VPL _{A27}	VPL _{A37}	VPL _{A47}	VPL _{A57}	VPL _{A67}	VPL _{A77}
Areia R\$ 38,60/ton. Brita R\$ 24,53/ton.	VPL _{A8}	VPL _{A18}	VPL _{A28}	VPL _{A38}	VPL _{A48}	VPL _{A58}	VPL _{A68}	VPL _{A78}
Areia R\$ 19,69/ton. Brita R\$ 22,71/ton.	VPL _{A9}	VPL _{A19}	VPL _{A29}	VPL _{A39}	VPL _{A49}	VPL _{A59}	VPL _{A69}	VPL _{A79}
Areia R\$ 18,00/ton. Brita R\$ 16,90/ton.	VPL _{A10}	VPL _{A20}	VPL _{A30}	VPL _{A40}	VPL _{A50}	VPL _{A60}	VPL _{A70}	VPL _{A80}

Para aplicação do Cenário Base B, variaram-se cenários de R\$ 10,00/ton. de RCD separado e R\$ 20,00/ton. para os RCD misturados, segundo dados fornecidos em 2021 por uma empresa local da RMGV, até o valor de taxaço para recebimento de RCD misturado na Alemanha de cerca de R\$ 87,41/ton.². (NUNES; MAHLER, 2020) e 50% desse valor para recebimento de RCD separado (Quadro 11).

Quadro 11: Valores aplicados a taxa de recebimento de RCD.

RCD separado (R\$/ton.)		RCD misturado (R\$/ton.)		Fonte:
R\$	10,00	R\$	20,00	Dados fornecidos em 2021 por uma empresa local da RMGV
R\$	15,00	R\$	30,00	Autoria própria
R\$	20,00	R\$	40,00	
R\$	25,00	R\$	50,00	
R\$	30,00	R\$	60,00	
R\$	35,00	R\$	70,00	
R\$	40,00	R\$	80,00	
R\$	43,71	R\$	87,41	Nunes e Mahler (2020)

Fonte: Autoria própria.

Com relação taxa de resíduo recebida a qual o valor será aplicado, considera-se que 38% dos RCD recebidos são separados e 62% misturados, uma vez que, 38% dos RCD são destinados a estações de destinação/tratamento de RCD que podem ser beneficiados como AR no estado do ES (ESPÍRITO SANTO, 2019).

Atualmente, no aterro sanitário localizado na RMGV é praticada a taxa para aterramento de rejeito é de R\$ 80,00/ton, segundo dados fornecidos em 2021 por uma empresa local da RMGV. Sabe-se que a sobretaxação de resíduos recicláveis em aterro sanitário é fundamental para fomentar o desvio destes para centros de beneficiamento e reciclagem (PANZONE *et al.*, 2021; SASAO, 2014). Cabe ressaltar que os valores aplicados na RMGV para recebimento em aterro sanitário já são 6 a 7 vezes maiores que o valor cobrado para recebimento de RCD em usina de beneficiamento, conforme dados da mesma empresa citados anteriormente.

Sendo assim, o Quadro 12 apresenta os cenários trabalhados para análise de sensibilidade do VPL para os Cenários de Base B. Para esses cenários se manteve como valor fixo o valor de venda de Areia reciclada a R\$ 18,00/ton. e da Brita reciclada por R\$ 16,00/ton., segundo dados fornecidos em 2021 por uma empresa local da RMGV. Assim como os Cenários de Base A, com relação aos valores de juros, variou-se com base no Quadro 8, assim como para valores de venda de AR.

² Conversão dólar à R\$4,01.

Quadro 12: Cenário Base B - VPL com relação a variação da taxa de juros e da taxa de recebimento de RCD.

Valores fixados para cálculo do VPL: venda de Areia reciclada a R\$ 18,00 /ton. e da Brita reciclada por R\$ 16,00/ton.								
	i = 0%	i = 4,35%	i = 13,09%	i = 16,37%	i = 29,56%	i = 30,63%	i = 37,46%	i = 62,54%
RCD/s. R\$ 10,00/ton. RCD/m R\$ 20,00/ton.	VPL _{B1}	VPL _{B9}	VPL _{B17}	VPL _{B25}	VPL _{B33}	VPL _{B41}	VPL _{B49}	VPL _{B57}
RCD/s. R\$ 15,00/ton. RCD/m R\$ 30,00/ton.	VPL _{B2}	VPL _{B10}	VPL _{B18}	VPL _{B26}	VPL _{B34}	VPL _{B42}	VPL _{B50}	VPL _{B58}
RCD/s. R\$ 20,00/ton. RCD/m R\$ 40,00/ton.	VPL _{B3}	VPL _{B11}	VPL _{B19}	VPL _{B27}	VPL _{B35}	VPL _{B43}	VPL _{B51}	VPL _{B59}
RCD/s. R\$ 25,00/ton. RCD/m R\$ 50,00/ton.	VPL _{B4}	VPL _{B12}	VPL _{B20}	VPL _{B28}	VPL _{B36}	VPL _{B44}	VPL _{B52}	VPL _{B60}
RCD/s. R\$ 30,00/ton. RCD/m R\$ 60,00/ton.	VPL _{B5}	VPL _{B13}	VPL _{B21}	VPL _{B29}	VPL _{B37}	VPL _{B45}	VPL _{B53}	VPL _{B61}
RCD/s. R\$ 35,00/ton. RCD/m R\$ 70,00/ton.	VPL _{B6}	VPL _{B14}	VPL _{B22}	VPL _{B30}	VPL _{B38}	VPL _{B46}	VPL _{B54}	VPL _{B62}
RCD/s. R\$ 40,00/ton. RCD/m R\$ 80,00/ton.	VPL _{B7}	VPL _{B15}	VPL _{B23}	VPL _{B31}	VPL _{B39}	VPL _{B47}	VPL _{B55}	VPL _{B63}
RCD/s. R\$ 43,71/ton. RCD/m R\$ 87,41/ton.	VPL _{B8}	VPL _{B16}	VPL _{B24}	VPL _{B32}	VPL _{B40}	VPL _{B48}	VPL _{B56}	VPL _{B64}

Legenda: RCD/s: RCD separado; RCD/m: RCD misturado.

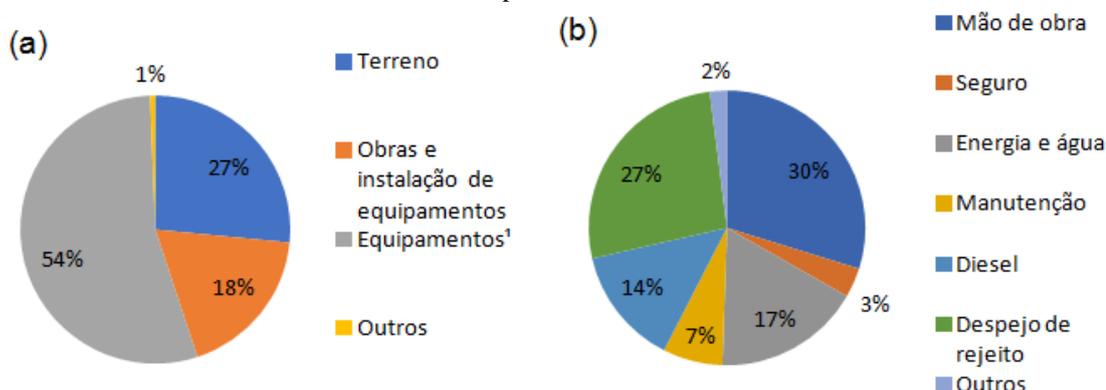
Fonte: Autoria própria.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1. Descrição da composição de custos para usinas fixas de beneficiamento de resíduos de construção e demolição no Brasil

A partir do levantamento dos custos de investimento e operação de usinas fixas de beneficiamento de RCD exibidos no Apêndice B, a distribuição percentual média das despesas pré-operacionais (DPO) e operacionais (DO) é exibida na Figura 6. Ainda, as DO representam apenas 18% dos custos totais das DPO, ainda sem considerar os custos com transporte, amortização do financiamento e juros aplicados sobre as receitas adquiridas.

Figura 6: Distribuição percentual média dos elementos que compõem custos (a) pré-operacionais e (b) operacionais



Fonte: Construído a partir de Cardoso, Galatto e Guadagnin (2014); Coelho e De Brito (2013); Duran, Lenihan e O'rgan (2006); Fonseca Junior e Ferreira (2013); Gularte *et al.* (2020); Jadovski e Masuero (2006); Lima (2013); Moresco (2017); Nunes *et al.* (2007); Oliveira Neto *et al.* (2017); Tam (2008); Wilburn e Gonnar, (1998) e Zhao, Leefink e Rotter (2010).

Com relação ao custo operacional, considerando as despesas anuais de uma usina de beneficiamento de RCD, a mão de obra mostrou-se como o custo mais significativo para o cenário brasileiro. Entretanto, em uma análise internacional, há que se verificar o regime trabalhista da região da implantação ou capacidade produtiva irão definir a magnitude desses gastos (JADOVSKI; MASUERO, 2006).

No Brasil encargos trabalhistas podem comprometer 68,53% no custeio com mão de obra (CARDOSO; GALATTO; GUADAGNIN, 2014), contrapondo-se aos 5,46% dispêndios na China, cuja diferença pode ser apresentada como facilitadora de uma capacidade produtiva 4 vezes maior (ZHAO; LEEFTINK; ROTTER, 2010).

Nota-se que, o elemento de custo transporte não foi considerado como significativo dentre as DO (Figura 6) a partir dos estudos compilados. Isso porque os estudos consideraram que na aquisição de RCD e/ou na venda de AR esse custo foi debitado pelo gerador do RCD ou comprador do AR (PENTEADO; ROSADO, 2016). Apesar disso, pode significar um

acréscimo de 60% no valor final de venda do agregado (KURDA; DE BRITO; SILVESTRE, 2018) e deve ser localmente aferido para não inviabilizar o empreendimento. Duran, Lenihan e O'regan (2006) alegam que a decisão sobre o posicionamento da usina deve considerar a proximidade dos centros urbanos.

O Quadro 13 descreve as configurações técnicas e a quantidade unitária necessária para cada equipamento, bem como os custos necessários para implantação de uma unidade comercial típica com capacidade máxima de até 130ton./hora.

Quadro 13: Custos de implantação para uma usina de beneficiamento de RCD com capacidade máx. instalada de 130ton./hora.

Despesas pré-operacionais		Custo de aquisição (R\$)
T_e	(Metropolitana - R\$ 36.681/ha)	73.362,00
O	CUB-ES dez/2020 (R\$1837,54/m ²)	183.754,00
I	Instalação mecânica	114.613,32
	Instalação elétrica	229.226,64
E	Retroescavadeira 580M (89hp - 0,79 m ³)	270.000,00
	Cabine de Separação Manual	28.296,43
	Alimentador vibratório	142.260,00
	Britador de Mandíbulas	400.000,00
	Britador Cone Hidráulico	580.000,00
	Peneira Vibratória (10m ² de peneiramento)	139.105,00
	Esteira Transportadora 1 - 30" x 29m	142.010,00
	Esteira Transportadora 2 - 24" x 17m	56.925,00
	Esteira Transportadora 3 - 20" x 18m	153.045,00
	Outros: Quando elétrico e estrutura	380.625,00
SOMA		2.893.222,39

Legenda: E - Custos com aquisição de equipamento; I - Custos com a instalação de equipamentos; O - Custos com obras; T_e - Custos de aquisição do terreno.

Ainda, entre os custos de investimento inicial, a aquisição de equipamentos é o custo mais significativo (54%). Pode-se optar pela aquisição de equipamentos usados, que de forma geral custam 10% menos que equipamentos novos (ZHAO; LEEFTINK; ROTTER, 2010). Entretanto, caso essa estratégia seja empregada, há que se rever o impacto dos custos de manutenção com esse tipo de equipamento, os quais, segundo os autores, gira em torno de 1,2 vezes maior do que com equipamentos novos.

Já os custos necessários para operação anual da usina, disponíveis no Quadro 14, consideram três níveis de escalonamento produtivo: 30% (39 ton./hora), 60% (78 ton./hora) e 100% (130ton./hora).

Quadro 14: Custos de operação anual para usina de beneficiamento de capacidade máxima instalada de 130ton./hora considerando o funcionamento de 30%, 60% e 100% da capacidade máxima instalada.

Despesas operacionais		30%	60%	100%
		(39ton./hora)	(78ton./hora)	(130ton./hora)
		R\$/ano	R\$/ano	R\$/ano
M_o	Encarregado (R\$7.775,49)	135.226,66	135.226,66	236.308,03
	Operador de Equip. (R\$1.734,81)	30.170,77	52.723,30	75.275,83
	Auxiliar de Produção (R\$1.349,82)	76.118,24	146.308,88	216.499,52
C	Energia [kWh] - TUSD = R\$0,06182/kWh, TE = R\$0,24983/kWh	15.430,97	15.430,97	15.430,97
	Água [m ³ /ano] – Tarifa R\$10,22/m ³	344.373,12	688.746,24	1.147.910,40
M_a	Retroescavadeira	17.508,60	17.508,60	17.508,60
	Cabine de Separação Manual	198,26	198,26	198,26
	Alimentador vibratório	4.359,61	4.359,61	4.359,61
	Britador de Mandíbulas	4.617,20	4.617,20	4.617,20
	Britador Cone Hidráulico	4.617,20	4.617,20	4.617,20
	Peneira Vibratória	4.047,36	4.047,36	4.047,36
	Esteira Transportadora 1	10.096,10	10.096,10	10.096,10
	Esteira Transportadora 2	5.918,44	5.918,44	5.918,44
	Esteira Transportadora 3	6.266,59	6.266,59	6.266,59
D_i	Retroescavadeira [h/ano] - 8 L/h	13.968,77	20.953,15	27.937,54
	Caminhão [un./h] (Cap.14,6t) - 2,8 km/L	1.815.939,84	4.539.849,60	8.171.729,28
R	1,61% do RCD[ton./hora] - R\$ 80,00/ton.	106.089,98	212.179,97	353.633,28
	Transporte rejeito [un./h] (Frete + D_i)	796.419,48	1.791.943,84	2.787.468,19
T	Transporte: RCD, AR e rejeito	470.934,10	1.177.335,26	2.119.203,47
D_e	10% em 10 anos	22.922,66	22.922,66	22.922,66
t	15% sobre Lucro Total	340.922,91	1.136.409,69	1.894.016,16
SOMA		4.226.146,88	9.997.659,59	17.125.964,708

Legenda: A - Amortização dos custos; C = Custos com consumo de água e energia; Cap. = Capacidade; D_e - Depreciação; D_i - Custo com diesel para maquinários; i - Taxa de juros ou custo do capital; M_a = Custos com a manutenção de equipamentos; M_o = Refere-se ao custo de mão de obra; R - Dispêndios com rejeito: transporte e taxa de aterro; t - Custos com tributos; T - Custos de frete com o transporte de RCD e AR; TE = Tarifa de energia; TUSD = Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição; Un. = Unidade.

Os custos com mão de obra são mais baixos em operações de reciclagem estacionária (com separação magnética) representando cerca de 20 a 30% do custo operacional total, sendo que comumente são exigidos menos de 10 funcionários com baixo grau de especialização (WILBURN; GONNAN, 1998).

Os custos das operações são insignificantes em comparação com os custos de transporte e aterramento. Apesar de apenas cerca de 20% de toda massa de RCD que entra na usina ser destinada para descarte em aterro sanitário (DAHLBO *et al.*, 2015; NUNES *et al.*, 2007; ZHAO; LEEFTINK; ROTTER, 2010), as despesas com o transporte e aterramento desses resíduos representam 30% e 55% dos custos gerais (DAHLBO *et al.*, 2015).

Quanto às escalas produtivas observadas no Quadro 14, não foram observadas variações nos valores calculados para custo energético e manutenção de equipamentos, isso porque esses custos estão atrelados às máquinas instaladas, assim com os custos com a depreciação também não sofreram alterações, pois são calculados sobre o valor fixo aplicado na aquisição

de equipamentos. Contudo, para todos os custos que variaram com o aumento das escalas produtivas, as alterações foram positivas, uma vez que, conforme descrevem JADOVSKI; MASUERO (2006) e LIMA (2013), para se processar mais resíduos são necessários mais insumos, assim como aumento no número de funcionários, custo com transporte, descarte de rejeito, diesel e consumo de água que foram os custos que apresentaram alterações médias de 119% entre as escalas de 30-60% e 60% entre a escala de 60-100%.

Dentre os aspectos que devem ser destacados para o processo de comercialização de produtos, recicláveis ou não, estão a aquisição de novos clientes e a preservação dos interesses desses, tais como a redução dos custos do processo, principalmente aos que tangem carregamento (SIMAN *et al.*, 2020). Portanto, quanto às questões de mercado, o preço do AR deve ser pelo menos 30% menor que o preço do produto convencional para que a comercialização seja atrativa e viável financeiramente (NUNES *et al.*, 2007).

Na análise de mercado, a média de preço no Estado para areia e brita foi de R\$68,50/m³ e R\$79,00/m³, respectivamente (DER-ES, 2020; SINDUSCON/ES, 2019). Contudo, no Brasil, o preço aplicado à brita reciclada costuma ser cerca de 73% menor que o valor da brita natural, enquanto para a areia esse valor é de 51%. Já na Alemanha essa diferença de valor para areia reciclada chega a 98% menor que o valor aplicado ao AN (NUNES; MAHLER, 2020). O Quadro 15 apresenta então como seriam as receitas da empresa simulada se fossem aplicados os valores iguais ao aplicado para AN.

Quadro 15: Receita aferida para a venda de agregado reciclado (AR) calculada com base no nível produtivo (valores aplicados em AN).

Receitas	30% - 39ton./hora		60% - 78ton./hora		100% - 130ton./hora	
	ton./hora	R\$/ano	ton./hora	R\$/ano	ton./hora	R\$/ano
Areia - R\$78,77/ton.	9,59	1.595.917,13	19,19	3.191.834,25	31,98	5.319.723,76
Brita - R\$90,85/ton.	28,78	5.521.990,77	57,56	11.043.981,54	95,93	18.406.635,90
SOMA	38,3721	7.117.907,90	76,74	14.235.815,80	127,91	23.726.359,66

Fonte: Elaborado com base em CAPÍTULO 2; DER-ES (2020); Nunes e Mahler (2020) e SINDUSCON-ES (2019).

Apesar de nesse cenário ser aplicado o mesmo valor de venda do AN sobre o AR, esses valores não são aplicados na realidade devido à baixa atratividade do produto reciclado e a insegurança técnica devido à falta de conhecimento, sendo que o AR deve ser pelo menos 30% que o AN (NUNES *et al.*, 2007; SU *et al.*, 2020).

O valor de venda para AR pode ser até 98% menor que o valor aplicado ao AN no país (NUNES; MAHLER, 2020), mesmo com o custo de trituração/operação em usina de beneficiamento de RCD se mostrando superior ao beneficiamento aos recursos minerais (GHANBARI; MONIR ABBASI; RAVANSHADNIA, 2017). Contudo, devido à localização

das usinas de beneficiamento do AN serem mais afastadas dos centros urbanos, representando acréscimo de 60% nos custos de transporte (KURDA; DE BRITO; SILVESTRE, 2018).

Uma empresa capixaba, situada na RMGV, apresenta uma porção de comercialização anual de 500 ton./ano de areia reciclada (a R\$ 18,00/ton.), e 3000 ton./ano de brita reciclada (a R\$ 16,90/ton.), além de outros agregados como, pó de brita e rachão, atua no mercado capixaba desde 2016. Com valores aplicados a brita reciclada 77,15% menor que o valor da brita natural, e para a areia natural, 81,40%, conforme dados fornecidos por essa empresa em 2021, as receitas calculadas reduzem cerca de 80,45%, quando comparados aos valores calculados com o preço 100% igual ao AN, assim como, observado na Quadro 16.

Quadro 16: Receita aferida para a venda de agregado reciclado (AR) calculada com base no nível produtivo (valores aplicados para AR brasileiros)

Receitas	30% - 39ton./hora		60% - 78ton./hora		100% - 130ton./hora	
	ton./hora	R\$/ano	ton./hora	R\$/ano	ton./hora	R\$/ano
Areia - R\$18,00/ton.	9,59	364.688,44	19,19	729.376,88	31,98	1.215.628,13
Brita - R\$16,90/ton.	28,78	1.027.205,77	57,56	2.054.411,54	95,93	3.424.019,23
SOMA	38,3721	1.391.894,21	76,74	2.783.788,41	127,91	4.639.647,35

Fonte: Elaborado com base em CAPÍTULO 2; DER-ES (2020); SINDUSCON-ES (2019); e dados de uma empresa local RMGV (2021)

A viabilidade financeira desse tipo de empreendimento conta também com a taxa de entrada de RCD, além dos benefícios fiscais ou outros subsídios públicos (NUNES *et al.*, 2007). No Espírito Santo, usinas de RCD cobram uma taxa de cerca de R\$20,00/ton. resíduo recebida quando o mesmo está misturado e de R\$10,00/ton. quando recebido já segregado, valor até 87,5% menor do que o cobrado para recebimento da tonelada rejeito no aterro sanitário situado no mesmo local.

Ainda quanto ao perfil desse resíduo, apenas 38% dos RCD destinados nas estações de destinação/tratamento RCD podem ser classificados como resíduo passível de ser beneficiado em AR (ESPÍRITO SANTO, 2019), sendo assim, o Quadro 17 prevê a receita adquirida com dos resíduos sendo 38% deles já separados e 62% misturados.

Quadro 17: Receita aferida para a venda de agregado reciclado (AR) calculada com base no nível produtivo (valores aplicados para AR brasileiros)

Receitas	30% - 39ton./hora		60% - 78ton./hora		100% - 130ton./hora	
	ton./hora	R\$/ano	ton./hora	R\$/ano	ton./hora	R\$/ano
RCD separado (38%) - R\$10,00/ton.	14,82	312.998,40	29,64	625.996,80	49,4	1.043.328,00
RCD misturado (62%.) - R\$20,00/ton.	24,18	1.021.363,20	48,36	2.042.726,40	80,6	3.404.544,00
SOMA	39	1.334.361,60	78	2.668.723,20	130	4.447.872,00

Fonte: Elaborado com base em CAPÍTULO 2; ESPÍRITO SANTO (2019) e dados fornecidos pela empresa capixaba local (2021).

A taxaço para recebimento de RCD misturado na Alemanha, por sua vez,   até nove vezes mais caro que no Brasil, com valores de venda atingindo cerca de R\$ 87,41/ton. (NUNES; MAHLER, 2020)

3.3.2. Efeito da modalidade de capta o de recursos financeiros

Ao setor industrial, em 2019, foi concedido cerca de 42% de todo saldo em opera es de crédito no Brasil (BACEN, 2019). A restri o financeira das empresas para um grande investimento   um dos fatores para a elabora o de políticas públicas sob a dimensão financeira na gestão de RCD, para fornecimento de subsídios e crédito para financiamento (COELHO; BRITO, 2013; KANNEBLEY JÚNIOR; DE PRINCE, 2015). Dessa forma, as modalidades de capta o de recursos para financiamento são diversas, assim como as modalidades de juros aplicados, que variam conforme o prazo, estratégia governamental ou fonte dos recursos (SEBRAE, 2015a).

Existem duas modalidades de capta o de recursos financeiros: empréstimo e financiamento. Usualmente, financiamentos a curto prazo são concedidos por institui es financeiras bancárias para empresas de até médio porte (AYYAGARI; DEMIRGÜÇ-KUNT; MAKSIMOVIC, 2011). Empresas de grande porte analisam a possibilidade de captar recursos nessa modalidade apenas quando já estão em fase de opera o. Mesmo assim, devido   baixos níveis de inadimplência, até 5 vezes menos inadimplentes no Brasil (BACEN, 2019), optam por outras modalidades com juros mais baixos (HUANG; YANG; TU, 2019).

O financiamento a longo prazo   concedido para investimentos fixos, ou seja, as despesas pré-operacionais de custo para investimento inicial ou para amplia o de empreendimentos já em opera o. Para esse tipo de financiamento, além de serem estabelecidos prazos mais prolongados, são fornecidos maiores limites de crédito e menores taxas. No entanto, há mais rigor para aprova o (SEBRAE, 2015a), sendo que os critérios mais relevantes na tomada de decisão são os critérios inova o (AYYAGARI; DEMIRGÜÇ-KUNT; MAKSIMOVIC, 2011) e restri o financeira (KANNEBLEY JÚNIOR; DE PRINCE, 2015). As principais fontes para o financiamento a longo prazo são: BNDES e Subven es (SEBRAE, 2015a).

Há, ainda, a modalidade de financiamento através de subven es ou Fundo Perdido são linhas de créditos concedidas por edital e financiadas por institui es de fomento   pesquisa e inova o como subsídio onde não há necessidade de devolver o capital, dessa forma, as taxas de juros também não são cobradas (SEBRAE, 2015a).

Políticas públicas de financiamento à pesquisa e desenvolvimento de aportes por subvenções ou Fundo Perdido existem no Brasil desde 1990 (KANNEBLEY JÚNIOR; DE PRINCE, 2015). Em 2016, cerca de 30% dos fundos de investimento públicos foram destinados para empresa de médio-grande e grande porte, além de fomentar o desenvolvimento industrial, e os impactos positivos se estendem ao PIB brasileiro, no entanto, o setor privado ainda tem menor parte das concessões de crédito (35% em 2016) (BETARELLI JÚNIOR et al., 2020).

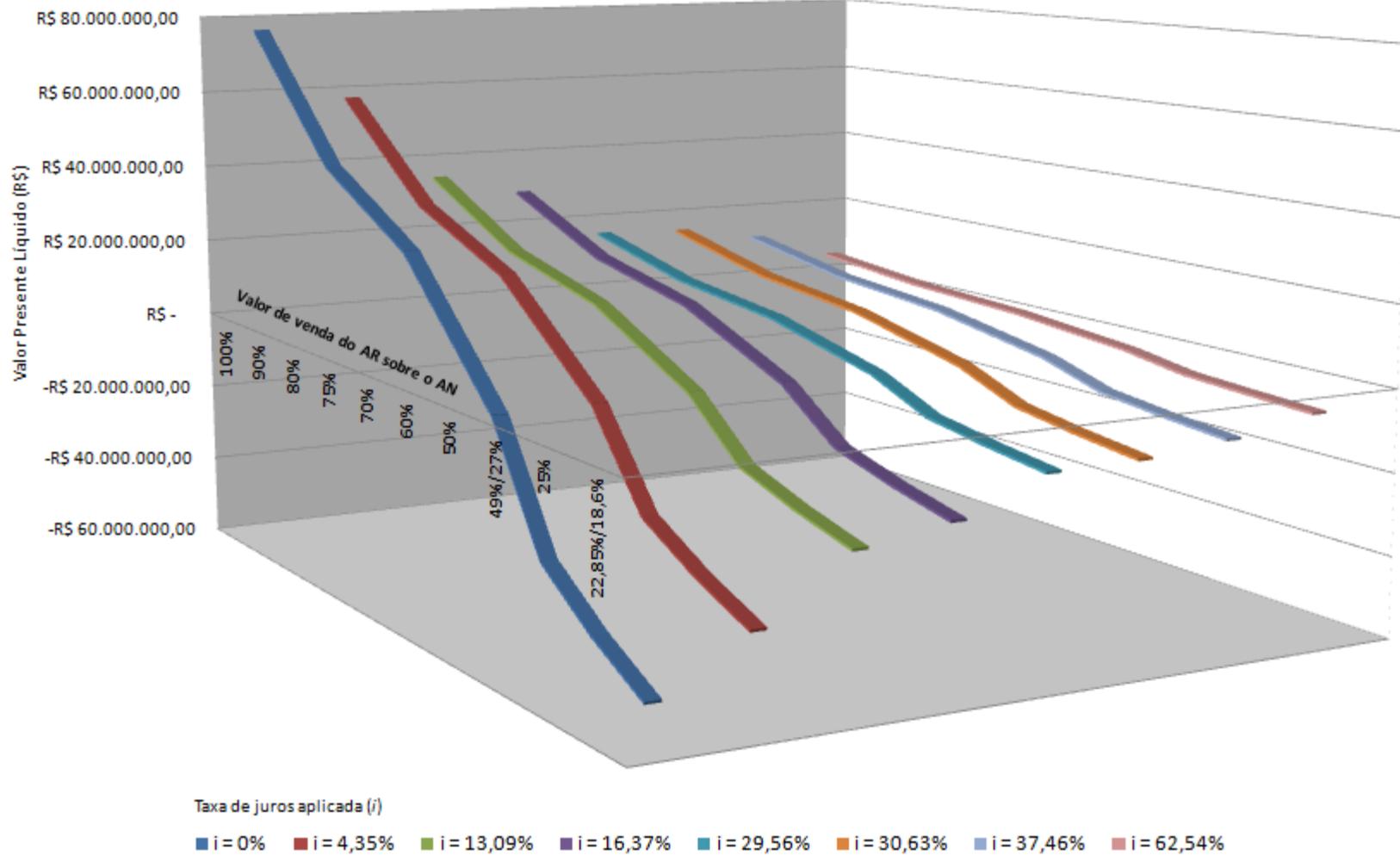
A partir da aplicação dos cenários propostos no Quadro 18 e as informações levantadas na seção anterior foi possível realizar a análise de sensibilidade do VPL. A análise dessas variações sobre o VPL e diferentes taxas de juros estão apresentadas na Figura 7.

Quadro 18: VPL calculado a partir do Cenário A

Valores fixados para calculo do VPL: taxa para recebimento de RCD separado R\$ 10,00/ton. RCD misturado R\$20,00/ton.									
Valor de venda AR	%	i = 0%	i = 4,35%	i = 13,09%	i = 16,37%	i = 29,56%	i = 30,63%	i = 37,46%	i = 62,54%
Areia R\$ 78,77/ton. Brita R\$ 90,85/ton.	100	VPL _{A1} = R\$ 76.611.620,54	VPL _{A11} = R\$ 57.673.695,19	VPL _{A21} = R\$ 34.735.752,24	VPL _{A31} = R\$ 29.274.593,96	VPL _{A41} = R\$ 16.031.168,28	VPL _{A51} = R\$ 15.345.248,03	VPL _{A61} = R\$ 11.779.679,13	VPL _{A71} = R\$ 5.208.556,75
Areia R\$ 70,89/ton. Brita R\$ 81,77/ton.	90	VPL _{A2} = R\$ 60.715.087,56	VPL _{A12} = R\$ 45.641.721,59	VPL _{A22} = R\$ 27.370.052,43	VPL _{A32} = R\$ 23.015.418,26	VPL _{A42} = R\$ 12.439.579,73	VPL _{A52} = R\$ 11.890.819,47	VPL _{A62} = R\$ 9.035.489,77	VPL _{A72} = R\$ 3.752.625,88
Areia R\$ 63,02/ton. Brita R\$ 72,68/ton.	80	VPL _{A3} = R\$ 44.818.554,58	VPL _{A13} = R\$ 33.609.748,00	VPL _{A23} = R\$ 20.004.352,61	VPL _{A33} = R\$ 16.756.242,56	VPL _{A43} = R\$ 8.847.991,17	VPL _{A53} = R\$ 8.436.390,92	VPL _{A63} = R\$ 6.291.300,41	VPL _{A73} = R\$ 2.296.695,00
Areia R\$ 59,08/ton. Brita R\$ 68,14/ton.	75	VPL _{A4} = R\$ 36.870.288,09	VPL _{A14} = R\$ 27.593.761,20	VPL _{A24} = R\$ 16.321.502,71	VPL _{A34} = R\$ 13.626.654,70	VPL _{A44} = R\$ 7.052.196,90	VPL _{A54} = R\$ 6.709.176,65	VPL _{A64} = R\$ 4.919.205,73	VPL _{A74} = R\$ 1.568.729,56
Areia R\$ 55,14/ton. Brita R\$ 63,60/ton.	70	VPL _{A5} = R\$ 28.922.021,60	VPL _{A15} = R\$ 21.577.774,40	VPL _{A25} = R\$ 12.638.652,80	VPL _{A35} = R\$ 10.497.066,85	VPL _{A45} = R\$ 5.256.402,62	VPL _{A55} = R\$ 4.981.962,37	VPL _{A65} = R\$ 3.547.111,05	VPL _{A75} = R\$ 840.764,12
Areia R\$ 47,26/ton. Brita R\$ 54,51/ton.	60	VPL _{A6} = R\$ 13.025.488,62	VPL _{A16} = R\$ 9.545.800,80	VPL _{A26} = R\$ 5.272.952,99	VPL _{A36} = R\$ 4.237.891,15	VPL _{A46} = R\$ 1.664.814,06	VPL _{A56} = R\$ 1.527.533,82	VPL _{A66} = R\$ 802.921,68	VPL _{A76} = -R\$ 615.166,76
Areia R\$ 39,39/ton. Brita R\$ 45,43/ton.	50	VPL _{A7} = -R\$ 2.871.044,36	VPL _{A17} = -R\$ 2.486.172,79	VPL _{A27} = -R\$ 2.092.746,82	VPL _{A37} = -R\$ 2.021.284,55	VPL _{A47} = -R\$ 1.926.774,49	VPL _{A57} = -R\$ 1.926.894,73	VPL _{A67} = -R\$ 1.941.267,68	VPL _{A77} = R\$ 2.071.097,64
Areia R\$ 38,60/ton. Brita R\$ 24,53/ton.	49/27	VPL _{A8} = -R\$ 31.591.860,54	VPL _{A18} = -R\$ 24.224.755,81	VPL _{A28} = -R\$15.400.611,53	VPL _{A38} = -R\$ 13.329.953,86	VPL _{A48} = -R\$ 8.415.821,81	VPL _{A58} = -R\$ 8.168.130,33	VPL _{A68} = -R\$ 6.899.289,55	VPL _{A78} = -R\$4.701.578,33
Areia R\$ 19,69/ton. Brita R\$ 22,71/ton.	25	VPL _{A9} = -R\$ 42.612.376,82	VPL _{A19} = -R\$ 32.566.106,78	VPL _{A29} = -\$ 20.506.996,35	VPL _{A39} = -R\$ 17.669.223,81	VPL _{A49} = -R\$ 10.905.745,88	VPL _{A59} = -R\$ 10.562.966,12	VPL _{A69} = -R\$ 8.801.741,08	VPL _{A79} = -R\$5.710.924,84
Areia R\$ 18,00/ton. Brita R\$ 16,90/ton.	22/18	VPL _{A10} = -R\$ 51.268.322,28	VPL _{A20} = -R\$ 39.117.730,80	VPL _{A30} = -R\$24.517.751,14	VPL _{A40} = -R\$ 21.077.456,50	VPL _{A50} = -R\$ 12.861.429,84	VPL _{A60} = -R\$ 12.443.964,01	VPL _{A70} = -R\$10.296.001,09	VPL _{A80} = -R\$6.503.705,14

Fonte: Autoria própria.

Figura 7: Análise de sensibilidade do Valor Presente Líquido (VPL) em razão da variação da modalidade de captação de recursos e da taxa de financiamento e do valor aplicado na venda do agregado reciclado (AR).



Legenda: i - taxa de juros; VPL - Valor presente líquido.

Fonte: Autoria própria.

A análise da Figura 7 e Quadro 18 indicam que, apesar do valor do AR ser um fator essencial para viabilidade financeira de projetos de usina de beneficiamento de RCD, o aumento da taxa de financiamento também é um fator decisivo na viabilidade financeira. Isso porque, o VPL mais positivo é encontrado no cenário VPL_{A1} , onde se considera o maior valor de venda para AR, 100% do valor aplicado ao AN, além da menor taxa de financiamento (0%). Entre a taxa de, entre $i=0\%$ e $i=62,54\%$ essa diferença chega a 93% do VPL.

A partir do valor de venda do AR a 60% do valor para venda de AN (Areia R\$ 47,26/ton. e brita R\$ 54,51/ton.) o VPL passa a ser viável. Para esses termos, o beneficiamento passa a ser impraticável, uma vez que, o preço do AR precisa ser competitivo ao AN (NUNES *et al.*, 2007). Sugere-se que para viabilizar essa competitividade sobre os termos de aplicação é preciso o aumento de custo de 50% sobre os AN (GHISELLINI; ULGIATI, 2020). No entanto, usinas de beneficiamento brasileiras reais já operam com valores aplicados ao AR entre 51% (NUNES; MAHLER, 2020) a 80% menor que valor aplicado a venda AN, conforme dados fornecidos pela empresa capixaba em 2021.

Com relação às taxas aplicadas em $i=13,09\%$ e $i=29,56\%$, essas representam a maior significância na redução do potencial de viabilidade financeira do empreendimento, uma vez que, reduz em cerca 30% o retorno financeiro do empreendimento se comparados a outras taxas de juros aplicadas.

Sendo assim, mesmo que com uma taxa de 13% de juros, aplicado, reduza a viabilidade do empreendimento em 50% do VPL, o valor de venda do AR apresenta maior magnitude na viabilização desse tipo de empreendimento. Impactando em uma queda de até 122% do VPL quando o preço de venda do AR é reduzido 10%.

Ademais, conforme mostra a Figura 7, é necessário considerar que os custos com financiamento representam menos de 2% dentre todos os custos operacionais, sem mesmo considerar o custo de transporte que pode ser considerado como cerca de 70% de todos os custos operacionais e 9% das despesas totais no período de 60 anos (COELHO; DE BRITO, 2013).

3.3.3. Impacto da dimensão financeira dentro da gestão de RCD de incentivo: sobretaxação de RCD em aterro

O apoio governamental para incentivo a reciclagem do RCD e, principalmente, o uso do AR, a fim de estabelecer o equilíbrio entre a oferta do RCD e a demanda por agregado reciclado, são medidas essenciais para viabilidade financeira das usinas de beneficiamento RCD

(MORESCO, 2017; TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018). Existem diversos instrumentos econômicos que são aplicados no incentivo à reciclagem, assim como indicado no Quadro 19.

Quadro 19: Tipos de instrumentos econômicos utilizados por países da Europeus, EUA, Canadá e Bélgica.

Instrumentos econômicos	Bélgica	Canadá	Estados Unidos	Alemanha	Austrália	Turquia	Espanha	Dinamarca	Áustria	Coreia	Finlândia	França	Holanda	Irlanda	Itália	Noruega	Reino Unido	Suécia
Cobrança pela disposição em aterro	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X			X
Cobrança sobre a geração de resíduos	X	X	X	X		X		X		X		X	X					
Imposto sobre o produto	X	X						X			X		X		X	X		X
Sistema de depósito - retorno	X		X	X	X			X			X		X			X		X
Crédito para reciclagem			X														X	

Fonte: Campos, 2012 (apud. Azevedo, 2004).

Assim como indicado no Quadro 19, o instrumento de cobrança sobre destinação de recicláveis para disposição em aterro sanitário é o método usado em 83% dos países apresentados, sendo o instrumento mais aplicado. O que corrobora com os estudos de Sasao (2014), que comprova que a taxação na destinação de resíduos no Japão reduziu significativamente o descarte de resíduos inadequadamente classificados como rejeito, apesar de uma taxa menor de desvio ter sido observada quando comparado a dados Europeus, uma vez que, os impostos japoneses já são naturalmente maiores.

Sendo assim, é possível observar que a taxação é flexível e eficaz na taxa de desvio de resíduos para a reciclagem ou outras formas de destinação corretas, porém, os impostos são fixos, inerentes ao processo e situação financeira nacional/regional e tem influência na reciclagem (PANZONE *et al.*, 2021; SASAO, 2014).

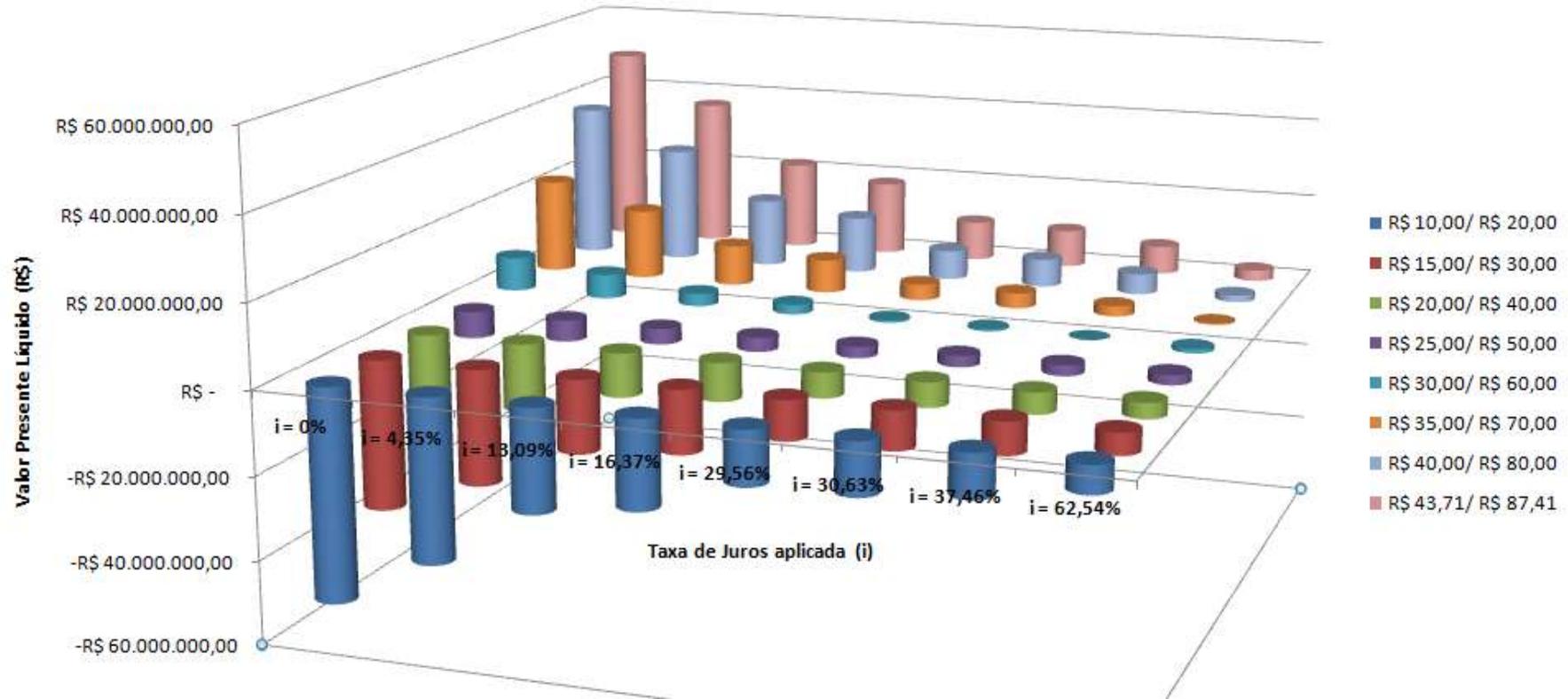
Com relação a taxação dos aterros sanitários, trabalhou-se com cenários a fim de verificar a viabilidade financeira da usina, conforme variação da taxa de recebimento de RCD e as taxas de juros aplicadas ao financiamento. Para isso, foram testados os cenários B apresentados no Quadro 20, os resultados estão apresentados na Figura 8.

Quadro 20: VPL calculado a partir do Cenário B.

Valores fixados para calculo do VPL: venda de Areia reciclada a R\$ 18,00 /ton. e da Brita reciclada por R\$ 16,00/ton.								
	i = 0%	i = 4,35%	i = 13,09%	i = 16,37%	i = 29,56%	i = 30,63%	i = 37,46%	i = 62,54%
RCD/s. R\$ 10,00/ton. RCD/m R\$ 20,00/ton.	VPL _{B1} = -R\$ 51.268.322,28	VPL _{B9} = -R\$ 39.117.730,80	VPL _{B17} = -R\$ 24.517.751,14	VPL _{B25} = -R\$ 21.077.456,50	VPL _{B33} = -R\$ 12.861.429,84	VPL _{B41} = -R\$ 12.443.964,01	VPL _{B49} = -R\$ 10.296.001,09	VPL _{B57} = -R\$ 6.503.705,14
RCD/s. R\$ 15,00/ton. RCD/m R\$ 30,00/ton.	VPL _{B2} = -R\$ 36.367.951,08	VPL _{B10} = -R\$ 27.839.703,45	VPL _{B18} = -R\$ 17.613.549,98	VPL _{B26} = -R\$ 15.210.434,85	VPL _{B34} = -R\$ 9.494.832,52	VPL _{B42} = -R\$ 9.205.932,30	VPL _{B50} = -R\$ 7.723.706,78	VPL _{B58} = -R\$ 5.138.959,89
RCD/s. R\$ 20,00/ton. RCD/m R\$ 40,00/ton.	VPL _{B3} = -R\$ 21.467.579,88	VPL _{B11} = -R\$ 16.561.676,10	VPL _{B19} = -R\$ 10.709.348,82	VPL _{B27} = -R\$ 9.343.413,20	VPL _{B35} = -R\$ 6.128.235,21	VPL _{B43} = -R\$ 5.967.900,59	VPL _{B51} = -R\$ 5.151.412,47	VPL _{B59} = -R\$ 3.774.214,65
RCD/s. R\$ 25,00/ton. RCD/m R\$ 50,00/ton.	VPL _{B4} = R\$ 6.567.208,68	VPL _{B12} = -R\$ 5.283.648,74	VPL _{B20} = -R\$ 3.805.147,66	VPL _{B28} = -R\$ 3.476.391,55	VPL _{B36} = -R\$ 2.761.637,89	VPL _{B44} = -R\$ 2.729.868,88	VPL _{B52} = -R\$ 2.579.118,15	VPL _{B60} = -R\$ 2.409.469,40
RCD/s. R\$ 30,00/ton. RCD/m R\$ 60,00/ton.	VPL _{B5} = R\$ 8.333.162,52	VPL _{B13} = R\$ 5.994.378,61	VPL _{B21} = R\$ 3.099.053,50	VPL _{B29} = R\$ 2.390.630,10	VPL _{B37} = R\$ 604.959,43	VPL _{B45} = R\$ 508.162,83	VPL _{B53} = -R\$ 6.823,84	VPL _{B61} = -R\$ 1.044.724,15
RCD/s. R\$ 35,00/ton. RCD/m R\$ 70,00/ton.	VPL _{B6} = R\$ 23.233.533,72	VPL _{B14} = R\$ 17.272.405,96	VPL _{B22} = R\$ 10.003.254,66	VPL _{B30} = R\$ 8.257.651,75	VPL _{B38} = R\$ 3.971.556,75	VPL _{B46} = R\$ 3.746.194,55	VPL _{B54} = R\$ 2.565.470,47	VPL _{B62} = R\$ 320.021,09
RCD/s. R\$ 40,00/ton. RCD/m R\$ 80,00/ton.	VPL _{B7} = R\$ 38.133.904,92	VPL _{B15} = R\$ 28.550.433,31	VPL _{B23} = R\$ 16.907.455,82	VPL _{B31} = R\$ 14.124.673,40	VPL _{B39} = R\$ 7.338.154,07	VPL _{B47} = R\$ 6.984.226,26	VPL _{B55} = R\$ 5.137.764,78	VPL _{B63} = R\$ 1.684.766,34
RCD/s. R\$ 43,71/ton. RCD/m R\$ 87,41/ton.	VPL _{B8} = R\$ 49.178.575,13	VPL _{B16} = R\$ 36.910.097,04	VPL _{B24} = R\$ 22.025.088,39	VPL _{B32} = R\$ 18.473.512,66	VPL _{B40} = R\$ 9.833.592,38	VPL _{B48} = R\$ 9.384.367,30	VPL _{B56} = R\$ 7.044.438,24	VPL _{B64} = R\$ 2.696.362,69

Fonte: Autoria própria.

Figura 8: Análise de sensibilidade de VPL com base na taxa de recebimento de RCD separado e misturado.



Fonte: Autoria própria.

É possível observar, no Quadro 20 e Figura 8, que assim como nos cenários de variação do valor de venda do AR, a variação da taxa de recebimento de RCD na usina é mais significativa para a viabilidade financeira do empreendimento, quando comparado a variação da taxa de juros. Isso porque a redução do VPL, no Quadro 20, mantendo fixo o valor de recebimento de RCD e alterando o valor de juros pode reduzir cerca de 60%. No entanto, quando mantemos fixo o valor de i e alteramos o valor de recebimento de RCD o VPL pode subir em até 200%. Sendo assim, nota-se que a taxação do resíduo que entra na usina é fator determinante para a viabilidade financeira da usina. Por isso, sugere-se para fomento o desvio de RCD um aumento de 53% na taxa de aterramento do RCD (GHISELLINI; ULGIATI, 2020)

Porém, sabe-se que a taxação de resíduos é um fator importante na taxa de desvio de RCD para reciclagem, mas também que essa deve ser competitiva a aplicada para destinação de RCD em aterro sanitário, para garantir a viabilidade financeira de usinas de beneficiamento (PANZONE *et al.*, 2021; SASAO, 2014).

Sendo assim, é possível identificar os cenários nos quais há viabilidade, segundo o VPL, para usinas de beneficiamento de RCD desse porte, sendo indicados no Quadro 21.

Quadro 21: Indicação dos cenários viáveis segundo o VPL calculado.

Cenário viável	Condição mínima de viabilidade	Taxas de juros aplicadas
VPL _{A7} - VPL _{A10} , VPL _{A17} - VPL _{A20} , VPL _{A27} - VPL _{A30} , VPL _{A37} - VPL _{A40} , VPL _{A47} - VPL _{A50} , VPL _{A67} - VPL _{A70} , VPL _{A76} - VPL _{A80}	Com o valor no mínimo 60% igual tabelado para o AN, sendo a Areia a R\$ 47,26/ton. e a Brita a R\$ 54,51/ton.	$i=0\%$ à $i=37,64\%$
VPL _{B4} - VPL _{B8} , VPL _{B13} - VPL _{B16} , VPL _{B21} - VPL _{B24} , VPL _{B29} - VPL _{B32} , VPL _{B37} - VPL _{B40} , VPL _{B45} - VPL _{B48} , VPL _{B54} - VPL _{B56} , VPL _{B62} - VPL _{B64} .	Com a taxação para recebimento de RCD separado sendo no mínimo R\$ 30,00/ton. e do RCD misturado a R\$ 60,00/ton.	$i=0\%$ à $i=30,63\%$

Fonte: Autoria própria.

Desse modo, é possível concluir, que as taxas de juros representam menor significância quando comparado a outras despesas e receitas, quanto a sua influência para viabilidade financeira de usinas desse porte, corroborando com a prerrogativa de esses representarem menos de 2% das DO (CARDOSO; GALATTO; GUADAGNIN, 2014; COELHO; DE BRITO, 2013; DURAN; LENIHAN, O'REGAN, 2006; FONSECA JUNIOR; FERREIRA, 2013; GULARTE *et al.*, 2020; JADOVSKI; MASUERO 2006; LIMA, 2013; MORESCO,

2017; NUNES *et al.*, 2007; OLIVEIRA NETO *et al.*, 2017; TAM, 2008; WILBURN; GONNAN, 1998; ZHAO; LEEFTINK; ROTTER, 2010).

Ainda, com relação a outros países, na China, por exemplo, dentre os instrumentos de incentivo ao mercado de reciclagem de RCD, pode-se citar taxas ou impostos incidentes sobre a destinação final de RCD em aterros sanitários a fim de incentivar o desvio para reciclagem, sendo 84,6% das políticas compreendidas em ferramentas de controle e comando, no qual 71,2% delas na forma de leis e regulamentos e 36,5% de políticas que traçam metas (LI *et al.*, 2020).

Segundo Giorgi; Lavagna; Campioli (2018), regiões que não apresentam instrumentos normativos e/ou incentivos políticos como os supracitados apresentam taxas de reciclagem inferiores. Já países que possuem políticas ambientais que estabelecem impostos incidentes sobre a destinação final de RCD em aterros sanitários e metas de desvio para reciclagem se mostram como as políticas mais efetivas.

Em 2008, a União Europeia estabeleceu uma meta de alcançar a taxa de desvio para a reutilização/reciclagem de 70% do peso do RCD produzido até 2020 (EUROPA, 2008), contudo a Irlanda, Holanda e Dinamarca, que já apresentavam políticas mais exigentes, alcançaram a taxa de mais de 80% de reciclagem já em 2013. Ainda, o incentivo da reciclagem também ocorre através de taxações na disposição de rejeito em aterros sanitários alcançando cerca de R\$ 581,78³ por tonelada (LI *et al.*, 2020)

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelece como responsáveis pela elaboração de metas de desvio e de redução os estados e municípios, por meio de seus planos regionais, além das metas traçadas pelo plano nacional a cada quatro anos (BRASIL, 2010). Porém, dentre os 26 estados brasileiros, 69,23%, atualmente, dispõem de Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS) e desses Estados, apenas 38,89% apresentam metas de desvio de RCD para reciclagem.

No entanto, diferentemente de países desenvolvidos, a falta de fiscalização impede que haja a sobretaxação de RCD em aterros sanitários. Uma vez que, mesmo com preços iguais aos dos rejeitos, os RCD são descartados inadequadamente em áreas urbanas, próximos de corpos hídricos, estradas, bem como outros locais irregulares (SILVA; DE BRITO; DHIR, 2017; CONTRERAS *et al.*, 2016).

Conclui-se, então, que instrumentos de taxação refletem na reciclagem como a sobretaxação do aterramento de RCD e sobre a compra de AN, já aplicadas em regiões como a Europa

³ Taxa de conversão: 1 Libra = R\$ 7,02635 (Cotação 27/09/2020).

funcionam. Visto que a Europa, entre 2014 e 2016, reciclou 89% de todo RCD gerado, já o Brasil reciclou apenas 8% do total coletado, que compreende ao percentual coletado de 63% dos resíduos gerados em 2017 (NUNES; MAHLER, 2020).

Ainda, quanto ao suporte e incentivo de uso do AR, na Itália, uma taxa de incentivo do uso do AR em substituição ao AN determina que 15% em peso da matéria-prima seja composto por AR, sendo ainda apenas 5% dessa porcentagem destinada ao uso não estrutural (GIORGI; LAVAGNA; CAMPIOLI, 2018).

No Brasil, não existem políticas nacionais de incentivo à substituição de AN por AR (GOVERNO FEDERAL; MMA, 2012; MMA; SECRETARIA DE QUALIDADE AMBIENTAL, 2020). Em âmbito municipal, a cidade de São Paulo (SP) por meio do Decreto 48.075/2006, determina a obrigatoriedade da utilização de AR em obras de pavimentação das vias públicas, no entanto, a legislação não estabelece nenhuma taxa para essa utilização (SÃO PAULO, 2006).

3.4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este artigo traz informações a respeito do processo de análise de viabilidade financeira de projetos de usinas fixas de beneficiamento de RCD, uma vez que, sabe-se que usinas desse porte estão sujeitas a custos (pré) operacionais dispendiosos, as quais então se tornam dependentes de alternativas de financiamento e suas taxas. Sendo assim, dentre os custos mais significativos em todo processo produtivo e de implantação da usina, pode-se citar: a aquisição dos equipamentos (representando 54% dos custos pré-operacionais) e o transporte (77% dos custos operacionais). No entanto, desconsiderando o transporte dos custos operacionais (rateando-o nos custos de venda de AR), a mão de obra, custos com água e energia e despejo de rejeito passam a se tornar os custos mais significantes.

Entretanto, uma vez que, esses custos são intrínsecos ao funcionamento da usina, um custo se mostra variável e decisório para viabilidade da usina, a taxa de juros aplicada ao financiamento. As taxas de juros, que variam entre $i=0\%$ e $i=62,54\%$, influenciam em até 95% da viabilidade de um empreendimento. Contudo, pode ser observado uma forte relação entre essa viabilidade do empreendimento e os valores aplicado na venda dos AR e a taxa de entrada do RCD, e conseqüentemente a porção de lucro, sendo esse fator econômico 100% mais significativa para a viabilidade do empreendimento quando comparado a variação da taxa de juros.

Dessa forma, conclui-se que a sobretaxação de resíduos recicláveis em aterro sanitário é um fator fundamental para viabilidade das usinas de beneficiamento de RCD, que reflete em taxas

de reciclagem 80% maiores para países que já aplicam o método. Contudo, para o Brasil, a aplicação de sobretaxas para descarte de resíduos em aterro sanitário carece, além da redução dos impostos, de fiscalização para que não exista possibilidade de despejo inadequado.

Sendo assim, a principal contribuição deste trabalho é promover embasamento teórico capaz de facilitar posteriores análises de viabilidade financeira de usinas de beneficiamento de RCD fixas, uma vez que, identifica quais os aspectos econômicos mais relevantes na determinação da viabilidade. Ainda, busca compreender o papel que as taxas de financiamento apresentam sobre essa viabilidade financeira, considerando que, dentre os custos decorrentes do processo de beneficiamento, esse pode variar de 0% a mais de 60%. Sendo assim, deixa como lacuna a avaliação da real determinante de viabilidade, sendo essa: as questões políticas, a porção de receita recebida ou os custos aplicados ou processo.

CAPÍTULO 4: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

4.1. CONCLUSÕES

Em uma sociedade em constante transformação, construção e demolição, o processo de reciclagem de RCD mostra-se como a solução para redução dos passivos ambientais causados pela extração e comercialização de AN e geração de resíduos pela construção civil. No entanto, apesar de ser um processo conhecido, a reciclagem dos RCD não é de fato aplicada, isso porque, existem entraves no campo técnico e econômico do processo.

Quanto às questões técnicas, RCD reutilizados tem como aplicação o preenchimento de valas nos próprios canteiros de obra, e quando reciclados na correção de acidez do solo, produção de argamassa e na formação de camadas de base e sub-base de pavimento e na produção de concreto. Contudo, o uso de RCD reciclado pode acarretar alterações na estrutura promovendo o aumento de porosidade e como consequência redução da densidade e aumento na absorção de água, assim, reduzindo a resistência e a durabilidade. No entanto, ressalta-se que se conhecidas as propriedades físicas e químicas do AR e respeitando os critérios técnicos para determinado uso, esse é viável tecnicamente.

Como no Brasil e para outros países como a Índia, EUA, Rússia, apenas o uso para pavimentação e para concreto não estrutural é normatizado, sendo assim, são as aplicações em que há segurança técnica. Dessa forma, a constatação da viabilidade técnica se apoia sobre a disponibilidade RCD capaz de ser beneficiado e suprir a demanda por AR, que se dispõe a essas aplicações, como é o caso do estudo realizado sobre o Estado do Espírito Santo/Brasil.

Contudo, se a viabilidade técnica está descrita em normativas a viabilização do RCD é dependente da análise de questões de viabilidade financeira. A instalação de usinas fixas de beneficiamento demanda investimentos dispendiosos, sendo então, dependentes de subsídios governamentais e financiamento. Dentre os custos necessários para instalação e operação dessas usinas, a aquisição dos equipamentos (representando 54% dos custos pré-operacionais) e o transporte (77% dos custos operacionais), mostram-se como os mais significantes.

No entanto, uma vez que, custos como transporte, compra, instalação e manutenção de equipamentos, entre outras, são intrínsecos ao processo, a análise de viabilidade financeira considera taxas variáveis de juros para financiamento. No entanto, observa-se que a viabilidade da usina está diretamente associada a porção de receita adquirida através da venda de AR ou taxação no recebimento do RCD, uma vez que, uma usina pode ser 95% menos viável economicamente variando entre as taxas de juros entre $i = 0\%$ e $i = 62,54\%$.

Porém, quando comparado aos valores aplicado na venda dos AR e a taxação de entrada do RCD, e conseqüentemente a porção de lucro, esses são até 100% mais significante para a viabilidade do empreendimento quando comparado a variação da taxa de juros.

A respeito da sobretaxação de resíduos recicláveis em aterro sanitário é um fator fundamental para viabilidade das usinas de beneficiamento de RCD, que reflete em taxas de reciclagem 80% maiores para países que já aplicam o método. No entanto, para o Brasil, a aplicação de sobretaxas para descarte de resíduos em aterro sanitário carece, além da redução dos impostos, de fiscalização para que não exista possibilidade de despejo inadequado.

Desse modo, a principal contribuição deste trabalho é estimular o setor da reciclagem de RCD apresentando um denso embasamento com base na literatura que valida a segurança técnica e certifica a necessidade de suporte dentro da dimensão financeira na gestão do RCD para que o AR seja economicamente competitivo ao AN.

4.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados sugerem novas discussões e estudos, pois apontam que a viabilidade técnica, fatores ambientais e a oferta de resíduos de construção e demolição, não são os principais fatores limitantes, como sugerido por diversos autores. Sendo assim, deixa lacuna e recomendação de pesquisas para avaliar os fatores limitantes que podem inviabilizar a reciclagem dos RCD, como questões financeiras e socioculturais.

Sendo assim, é necessário investigar os fatores econômicos, no que tange aos itens de custo variáveis como: a taxa de financiamento para usinas desse porte, o valor de venda do AR e a sobretaxação dos RCD, variações no preço do diesel e do dólar que impactam sobre os custos de transporte, instalação e operação, a fim de, determinar quais fatores têm maior impacto na viabilidade dessas plantas.

Desse modo, existem lacunas para investigar haja visto que não há maior demanda pelo uso dos AR, mesmo havendo segurança técnica para os usos normatizados e alta oferta de matéria prima. Ainda, ficam lacunas quanto qual o impacto da dimensão financeira dentro da gestão do RCD na taxação de recicláveis e incentivo a demanda do AR na reciclagem de RCD.

Ainda, recomenda-se aplicar uma abordagem estocástica via Simulação de Monte Carlo

Recomenda-se aplica a teoria das opções reais para identificar o momento ótimo da realização do investimento.

CAPÍTULO 5: REFERÊNCIAS

ABNT. ABNT NBR 15112/2004 - Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Brasil, 2004a.

ABNT. ABNT NBR 15114/2004 - Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Resíduos sólidos da construção civil. Brasil, 2004b.

ABNT. ABNT NBR 15115/2004 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Brasil, 2004c.

ABNT. ABNT NBR 15116/2004 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Brasil, 2004d.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019, São Paulo: ABRELPE, 2019.

ÁFRICA DO SUL. **South Africa State of Waste Report: 2nd Draft**, Department: Environmental Affairs Republic of South Africa, 2018.

AGRELA, F. et al. Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 10, p. 3950–3955, 2011.

AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 186, p. 262–281, 2018.

ALEXANDRIDOU, C.; ANGELOPOULOS, G. N.; COUTELIERIS, F. A. Mechanical and durability performance of concrete produced with recycled aggregates from Greek construction and demolition waste plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 176, p. 745–757, 2018.

ALMEIDA, J. et al. Estudo de viabilidade financeira do uso do agregado de RCD em pavimentação de vias urbanas. **Revista de Engenharia Civil**, n. 54, p. 16–25, 2018.

ANM - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário Mineral Brasileiro (AMB) - Produção beneficiada**. 2020. Disponível em: <<https://dados.gov.br/dataset/anuario-mineral-brasileiro-amb/resource/3e993cb8-c74a-47ac-a804-bd31cf100b0f>>. Acesso em: 13 mar. 2021.

ANM - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Sistema de Levantamento de Preços: Síntese dos Preços Praticados - ESPÍRITO SANTO / Período: De 16/08/2020 a 22/08/2020**. Disponível em: <https://preco.anp.gov.br/include/Resumo_Por_Estado_Municipio.asp>.

ANM - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Sistema de Levantamento de Preços: Síntese dos Preços Praticados - ESPÍRITO SANTO / Período:**

De **24/10/2021** a **30/10/2021**. Disponível em: <https://preco.anp.gov.br/include/Resumo_Por_Estado_Municipio.asp>.

AYYAGARI, M.; DEMIRGÜÇ-KUNT, A.; MAKSIMOVIC, V. Firm innovation in emerging markets: The role of finance, governance, and competition. **Journal of Financial and Quantitative Analysis**, v. 46, n. 6, p. 1545–1580, 2011.

BACEN - Banco central. **Relatório de Economia Bancária 2019**, 2019.

BACEN - Banco central. **Taxas de Juros**. 2020. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/estatisticas/txjuros>>. Acesso em: 12 ago. 2020.

BARBUDO, A. et al. Recommendations for the management of construction and demolition waste in treatment plants. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 1, p. 125–132, 2020.

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Taxa de juros**. 2020. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/taxa-de-juros>>. Acesso em: 13 ago. 2020.

BRASIL. RESOLUÇÃO Nº 307, DE 5 DE JULHO DE 2002 - Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasil, 2002. p. 4–5.

BRASIL. LEI Nº 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. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasil, 2010. p. 1–25.

BRASIL; DNIT, D. N. de I. de T. RESOLUÇÃO Nº 1, DE 6 DE JANEIRO DE 2020. Regulamenta o uso de rodovias federais por veículos ou combinações de veículos e equipamentos, destinados ao transporte de cargas indivisíveis e excedentes em peso ou dimensões ao limite estabelecido nas legislações vigentes, para o conjunto de veículo e carga transportada, assim como por veículos especiais, fundamentado nos art. 21 e 101 da Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997, conhecido como Código de Trânsito Brasileiro - CTB e dá outras providências. Brasil, 2020.

BRAVO, M. et al. Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 357–369, 2015. a.

BRAVO, M. et al. Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 99, n. 2015, p. 59–74, 2015. b.

BRAVO, M. et al. Durability and shrinkage of concrete with CDW as recycled aggregates: Benefits from superplasticizer's incorporation and influence of CDW composition. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 818–830, 2018.

CAGED, C. G. de E. e D.; MTE, M. do T. e E. **CAGED Estatístico - dez/2019**. 2019. Disponível em: <<http://bi.mte.gov.br/bgcaged/>>. Acesso em: 13 ago. 2020.

CARDOSO, A. da C. F.; GALATTO, S. L.; GUADAGNIN, M. R. Estimativa de Geração de Resíduos da Construção Civil e Estudo de Viabilidade de Usina de Triagem e Reciclagem Quantification of the Construction and Demolition Waste and Study the Feasibility of Deploying Recycling Plant RESUMO. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais – Número*, v. 31, p. 1–10, 2014.

CAMPOS, H. K. T. Renda e evolução da geração per capita de resíduos sólidos no Brasil. *Eng. Sanit. Ambient*, v. 17, n. 2, 2012.

CASE. **Modelos anteriores Retroescavadeiras 580M 4X4**. 2021. Disponível em: <<https://www.casece.com/latam/pt-br/produtos/retroescavadeiras/retroescavadeiras/modelos/580m-4x4>>. Acesso em: 31 mar. 2021.

CEARÁ. Metas, programas, projetos e ações para a gestão dos resíduos sólidos. In: **Plano Estadual de Resíduos Sólidos**. Fortaleza. p. 108–113.

CEDAGRO, C. de desenvolvimento do A. **Valores de terra nua nas diferentes regiões do estado do Espírito Santo**, 2017.

CEMENT CONCRETE & AGGREGATES AUSTRALIA. **Use of Recycled Aggregates in Construction**, 2008.

CESAN. **Tabela de tarifas: Conforme Resoluções Arsp nº 029/2019 e Sedurb nº 001/2019 (Reajuste tarifário de 2019: 4,99%)**. 2019. Disponível em: <https://www.cesan.com.br/wp-content/uploads/2019/08/tabela_tarifas_2019.pdf>. Acesso em: 3 fev. 2021.

CHILESHE, N. et al. Factors driving the implementation of reverse logistics: A quantified model for the construction industry. *Waste Management*, v. 79, p. 48–57, 2018.

CHINA. Provisões para gerenciamento de classificação de resíduos. 2018. Disponível em: <<https://wenku.baidu.com/view/cbd728ecd0d233d4b14e69ad?from=singlemessage>>

COELHO, A.; DE BRITO, J. Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – part I: location, materials, technology and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, v. 39, n. 5, p. 338–352, 2013.

CONTRERAS, M. et al. Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). *Construction and Building Materials*, v. 123, p. 594–600, 2016.

CURY, M. V. Q. **Análise Viabilidade de Projetos**. 1. ed. Rio de Janeiro: FGV Management, 2011.

DA PAZ, D. H. F. et al. Assessment of environmental impact risks arising from the illegal dumping of construction waste in Brazil. *Environment, Development and Sustainability*, v. 22, n. 3, p. 2289–2304, 2020.

DAHLBO, H. et al. Construction and demolition waste management - A holistic evaluation of environmental performance. *Journal of Cleaner Production*, v. 107, p. 333–341, 2015.

DE BRITO, J.; AGRELA, F.; SILVA, R. V. Legal regulations of recycled aggregate concrete

in buildings and roads. **New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete**, p. 509–526, 2019.

DE OLIVEIRA, M. E. D.; CABRAL, A. E. B. Argamassas de revestimento produzidas com agregados reciclados de Fortaleza/CE, Brasil. **Engenharia Civil**, v. 41, p. 21–34, 2011.

DE VASCONCELOS, K. B.; DE LEMOS, C. F. Densidade Aparente Dos Resíduos Da Construção Civil Em Belo Horizonte – Mg. In: 2015, Porto Alegre/RS. Porto Alegre/RS: VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental - IBEAS, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. **Anuário Mineral Estadual - Espírito Santo** **Journal of Chemical Information and Modeling**. Brasília.

DER-ES. Insumos da Tabela de Custos Referenciais 2020. p. 1–28.

DEVI, S. V. et al. Utilization of recycled aggregate of construction and demolition waste as a sustainable material. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

DIMITRIOU, G.; SAVVA, P.; PETROU, M. F. Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 228–235, 2018.

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**, v. 46, n. 3, p. 302–320, 2006.

EDP. **Tarifas Aplicadas a clientes atendidos em Alta e Média Tensão (Grupo A)**. 2020. Disponível em: <[https://www.edp.com.br/distribuicao-es/saiba-mais/informativos/tarifas-aplicadas-a-clientes-atendidos-em-alta-e-media-tensao-\(grupo-a\)](https://www.edp.com.br/distribuicao-es/saiba-mais/informativos/tarifas-aplicadas-a-clientes-atendidos-em-alta-e-media-tensao-(grupo-a))>. Acesso em: 2 fev. 2021.

ESPÍRITO SANTO. Prognósticos e proposição de cenários. In: **PERS-ES: Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Espírito Santo**. Vitória. p. 326–421.

EUROPA. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives 2008. p. 1–26.

FONSECA JUNIOR, C. A. F.; FERREIRA, G. E. Estudo econômico para instalação de uma usina de RCD. In: 2013, Rio de Janeiro. **Anais.. Rio de Janeiro: 21ª Jornada De Iniciação Científica - CETEM/MCTI**, 2013.

FORD. **Cargo 2629 - Especificações técnicas**. 2013. Disponível em: <[https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/28995/33257/BlobServer\(6\).pdf](https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/28995/33257/BlobServer(6).pdf)>. Acesso em: 3 mar. 2021.

FU, P. et al. Multiobjective Location Model Design Based on Government Subsidy in the Recycling of CDW. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2017, 2017.

GHANBARI, M.; MONIR ABBASI, A.; RAVANSHADNIA, M. Economic and environmental evaluation and optimal ratio of natural and recycled aggregate production. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, 2017.

GHISELLINI, P.; ULGIATI, S. Economic assessment of circular patterns and business

models for reuse and recycling of construction and demolition waste. **Elsevier Ltd.**, 2020.

GIORGI, S.; LAVAGNA, M.; CAMPIOLI, A. Designing Sustainable Technologies, Products and Policies. **Designing Sustainable Technologies, Products and Policies**, p. 211–221, 2018.

GOMES, P. C. C. et al. Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 3, p. 31–46, 2015.

GÓMEZ-SOBERÓN, J. M. V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 8, p. 1301–1311, 2002.

GONÇALVES, P.; DE BRITO, J. Recycled aggregate concrete (RAC) - Comparative analysis of existing specifications. **Magazine of Concrete Research**, v. 62, n. 5, p. 339–346, 2010.

GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F. Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties. **Building and Environment**, v. 43, n. 4, p. 429–437, 2008.

GOVERNO FEDERAL; MMA, M. do M. A. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília - DF.

GULARTE, L. C. P. **Modelo de avaliação da viabilidade econômico-financeira da implantação de usinas de reciclagem de resíduos da construção civil em municípios brasileiros**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017.

GULARTE, L. C. P. et al. Economic and financial viability evaluation model for the implementation of waste recycling plants construction in Brazilian municipalities. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 25, n. 2, p. 281–291, 2020.

HUANG, J.; YANG, W.; TU, Y. Supplier credit guarantee loan in supply chain with financial constraint and bargaining. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 22, p. 7158–7173, 2019.

IDEIES; FINDES. **Fator Econômico Capixaba: O PIB do Espírito Santo e a Participação da Indústria**. Publicação Ideies ISSN 2595-9263, Ano 3, n. 28. 2019.

IEDI. **IEDI na Imprensa - Brasil Tem Juros Mais Altos Entre Emergentes**. 2004. Disponível em: <https://iedi.org.br/artigos/imprensa/2004/iedi_na_imprensa_brasil_tem_juros_mais_altos_entre_emergentes.html>. Acesso em: 17 ago. 2020.

ÍNDIA. **Strategy on resource efficiency in construction and demolition sector**.

JADOVSKI, I.; MASUERO, B. Manutenção de usinas de reciclagem de resíduos de Construção e Demolição, n. 1, p. 1842–1851, 2006.

JIN, R.; CHEN, Q. Overview of Concrete Recycling Legislation and Practice in the United States. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 145, n. 4, 2019.

KAMEL, A. **Guidelines for the Application of Recycled Concrete Aggregate in the Egyptian Construction Industry**. Mestrado em Engenharia de Construção. Cairo. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.840.8276&rep=rep1&type=pdf>.

KANNEBLEY JÚNIOR, S.; DE PRINCE, D. Restrição financeira e financiamento público à inovação no Brasil: Uma análise com base em microdados da PINTEC. **Nova Economia**, v. 25, n. 3, p. 553–574, 2015.

KOX, S. et al. Experimental evaluation of the high-grade properties of recycled concrete aggregates and their application in concrete road pavement construction. **Case Studies in Construction Materials**, v. 11, 2019.

KUMAR, R. Influence of recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste (CDW) on abrasion resistance of pavement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 142, p. 248–255, 2017.

KUMBHAR, S. A.; GUPTA, A.; DESAI, D. B. Recycling and Reuse of Construction and Demolition Waste for Sustainable Development. **OIDA, International Journal of Sustainable Development**, v. 6, n. 7, p. 83–92, 2013.

KURDA, R.; DE BRITO, J.; SILVESTRE, J. D. Combined economic and mechanical performance optimization of recycled aggregate concrete with high volume of fly ash. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 8, n. 7, 2018.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL - LNEC. Guia para a utilização de materiais reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em aterro e camada de leito de infra-estruturas de transportes. LNEC E474-20092009.

LASSO, P. R. O. et al. Avaliação do uso de resíduos de construção e demolição reciclados como corretivo da acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1659–1668, 2013.

LEITE, F. D. C. et al. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 6, p. 2972–2979, 2011.

LI, J. et al. Key policies to the development of construction and demolition waste recycling industry in China. **Waste Management**, v. 108, p. 137–143, 2020.

LIMA, F. A formação da mineração urbana no Brasil. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), p. 178, 2013.

MAGNI, C. A.; MARCHIONI, A. Average rates of return, working capital, and NPV-consistency in project appraisal: A sensitivity analysis approach. **International Journal of Production Economics**, v. 229, p. 107769, 2020.

MARANHÃO. Metas. In: **Plano Estadual de Gestão de Resíduos Sólidos do Maranhão - PEGRS MA**. São Luís. p. 52–68.

MATIAS, D. et al. Durability of concrete with recycled coarse aggregates: Influence of superplasticizers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 7, p. 1–5, 2014.

MEDINA, C. et al. Influence of mixed recycled aggregate on the physical-mechanical properties of recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 68, p. 216–225, 2014.

MENEGAKI, M.; DAMIGOS, D. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 13, p. 8–15, 2018.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. **Planos Estaduais de Resíduos Sólidos**. 2020. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/instrumentos-da-politica-de-residuos/item/10611>>. Acesso em: 18 ago. 2020.

MMA - Ministério do Meio Ambiente; SECRETARIA DE QUALIDADE AMBIENTAL. **Plano nacional de resíduos sólidos**. Brasília - DF, 2020.

MORESCO, J. M. **Análise de fatores que influenciam aspectos financeiros de implantação e operação de usinas de reciclagem de RCD**. 2017. Universidade Do Vale Do Rio Dos Sinos, São Leopoldo, 2017.

NAWAZ, M. A.; QURESHI, L. A.; ALI, B. Enhancing the Performance of Recycled Aggregate Mortars Using Alkali-Activated Fly Ash. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 25, n. 2, p. 552–560, 2021.

NOVÁKOVÁ, I.; MIKULICA, K. Properties of Concrete with Partial Replacement of Natural Aggregate by Recycled Concrete Aggregates from Precast Production. **Procedia Engineering**, v. 151, p. 360–367, 2016.

NUNES, K. R. A. et al. Evaluation of investments in recycling centres for construction and demolition wastes in Brazilian municipalities. **Waste Management**, v. 27, n. 11, p. 1531–1540, 2007.

NUNES, K. R. A.; MAHLER, C. F. Comparison of construction and demolition waste management between Brazil, European Union and USA. **Waste Management and Research**, v. 38, n. 4, p. 415–422, 2020.

OLIVEIRA NETO, G. C.; CORREIA, J. M. F. Environmental and economic advantages of adopting reverse logistics for recycling construction and demolition waste: A case study of Brazilian construction and recycling companies. **Waste Management and Research**, v. 37, n. 2, p. 176–185, 2019.

OLIVEIRA NETO, R. et al. An economic analysis of the processing technologies in CDW recycling platforms. **Waste Management**, v. 60, n. 2016, p. 277–289, 2017.

OMARY, S.; GHORBEL, E.; WARDEH, G. Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. **Construction and Building Materials**, v. 108, p. 163–174, 2016.

ONTÁRIO. Ontario Provincial Standard Specification Material Specification for Aggregates - Base , Subbase ,Canadá, 2016. p. 1–15.

OSSA, A.; GARCÍA, J. L.; BOTERO, E. Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 379–386, 2016.

PANZONE, L.; ULPH, A.; AREAL, F.; GRIPPO, V. A ridge regression approach to estimate the relationship between landfill taxation and waste collection and disposal in England. **Waste Management**, v. 129, p. 95-110, 2021.

PARAÍBA. Metas. In: **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado da Paraíba**. João Pessoa. p. 169–173.

PENEDO, R. da C. **A Taxa Interna de Retorno na Análise de Investimentos**. 1. ed. Brasília: Lettera Editora Ltda., 2005.

PENTEADO, C. S. G.; ROSADO, L. P. 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**, [s. l.], v. 34, n. 10, p. 1026–1035, 2016.

PEREIRA, P.; EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 722–729, 2012.

RAMEEZDEEN, R. et al. A qualitative examination of major barriers in implementation of reverse logistics within the South Australian construction sector. **International Journal of Construction Management**, v. 16, n. 3, p. 185–196, 2016.

RAMOS, B. F. Indicadores de qualidade dos resíduos da construção civil do município de Vitória-ES. Dissertação de Mestre em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), p. 190, 2007.

RECEITA FEDERAL. Instrução normativa RFB nº 1700, de 14 de março de 2017. Dispõe sobre a determinação e o pagamento do imposto sobre a renda e da contribuição social sobre o lucro líquido das pessoas jurídicas e disciplina o tratamento tributário da Contribuição para o PIS/Pasep e da Cofins no que se refere às alterações introduzidas pela Lei nº 12.973, de 13 de maio de 2014. 2017.

RECEITA FEDERAL. **IRPJ (Imposto sobre a renda das pessoas jurídicas)**, 2020. Disponível em: <<http://receita.economia.gov.br/aceso-rapido/tributos/IRPJ>>. Acesso em: 20 ago. 2020.

RIBEIRO SIMAN, R. et al. Governance tools: Improving the circular economy through the promotion of the economic sustainability of waste picker organizations. **Waste Management**, v. 105, p. 148–169, 2020.

RIO DE JANEIRO. Metas. In: **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro / Relatório Síntese - 2013**. Rio de Janeiro. p. 63–68.

RIO GRANDE DO SUL. Metas, programas, projetos e ações para a gestão dos resíduos sólidos. In: **PERS-RS: Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio Grande do Sul 2015-2034**. Natal: Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos - SEMARH, 2014. p. 402–433.

RODRÍGUEZ, C. et al. The incorporation of construction and demolition wastes as recycled mixed aggregates in non-structural concrete precast pieces. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 127, p. 152–161, 2016.

RONDÔNIA. Metas para gestão dos resíduos sólidos. In: **PERS: Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de Rondônia / Relatório Final / Produto 4: Elaboração das diretrizes e estratégias para a implementação do PERS/RO e Documetos Consolidados / Subproduto 4.4: Metas para a gestão dos resíduos sólidos**. Eunápolis. p. 16–30.

RUIZ, L. A. L.; RAMÓN, X. R.; DOMINGO, S. G. The circular economy in the construction and demolition waste sector e A review and an integrative model approach. [s. l.], v. 248, 2020.

SANTOS, M. H. S.; MARCHESINI, M. M. P. Logística reversa para a destinação ambientalmente sustentável dos resíduos de construção e demolição (RCD). **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, v. 8, n. 2, p. 67–85, 2018.

SÃO PAULO. Diretrizes, metas e ações. In: **Plano de resíduos sólidos do estado de São Paulo**. São Paulo: SMA, 2014. v. 1ª ed.p. 245–274.

SASAO, T. Does industrial waste taxation contribute to reduction of landfilled waste? Dynamic panel analysis considering industrial waste category in Japan. **Waste Management**, v. 34, p. 2239–2225, 2014.

SAYADI, A. A. et al. Effectiveness of foamed concrete density and locking patterns on bond strength of galvanized strip. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 115, p. 221–229, 2016.

SEBRAE, S. B. de A. às M. e P. E. **Como obter financiamento ?** Brasília-DF.

SERNA, H. A. de La; REZENDE, M. M. Agregados para a Construção Civil. In: BRASIL, D. N. de P. M. (DNPM) (Ed.). **Economia mineral do Brasil**. Brasília - DF: DNPM, 2009. p. 602–635.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS - SEBRAE. **Normas sindicais e encargos sociais e trabalhistas**.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 598–614, 2017.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 201–217, 2014.

SIMPLEX. **Proposta: Instalação de Britagem e Classificação Simplex**. Lagoa Santa MG - Brasil.

SINDUSCON-ES, S. da I. da C. C. no estado do E. S. **Tabela de Insumos – dezembro/2019**.

SINDUSCON-SP. **Gestão pelos Grandes Geradores**. São Paulo. Disponível em: <http://www.sindusconsp.com.br/wp-content/uploads/2016/01/folheto_sinduscon_2012_2.pdf>.

SORATO, R. **Recycled aggregate concrete; an overview**. 2016. Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, Finlândia, 2016.

SOUZA, C. Políticas públicas: uma revisão da literatura. **Dossiê Sociedade e Políticas Públicas**, v. Sociologias, n. 16, 2006.

TAM, V. W. Y. Economic comparison of concrete recycling: A case study approach. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 5, p. 821–828, 2008.

TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C. J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 272–292, 2018.

U.S, E. P. A. (EPA). Title 40 - Protection of Environment - PART 246 - Source separation for materials recovery guidelines. Environmental Protection Agency, Electronic Code of Federal Regulations. 2012a.

U.S - EPA. Title 40 - Protection of Environment - PART 257 - Criteria for classification of solid waste disposal facilities and practices, 2012b.

ULSEN, C. et al. High quality recycled sand from mixed CDW – is that possible? **Journal of Materials Research and Technology**, v. 12, p. 29–42, 2021.

ULUBEYLI, S.; KAZAZ, A.; ARSLAN, V. Construction and Demolition Waste Recycling Plants Revisited: Management Issues. **Procedia Engineering**, v. 172, p. 1190–1197, 2017.

USAID, A. de los E. U. para el D. I.-. **Manual de Diseño y Operación de Rellenos Sanitarios en Honduras**. Chico, California.

WEN, X. et al. Comparison research on waste classification between China and the EU, Japan, and the USA. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 16, n. 2, p. 321–334, 2014.

WILBURN, D. R.; GONNAN, T. G. Aggregates from Natural and Recycled Sources Economic Assessments for Construction Applications — A Materials Flow Analysis. [s. l.], v. First, 1998.

WORLD BANK. **Lending interest rate (%)**. 2019. Disponível em: <<https://data.worldbank.org/indicator/FR.INR.LEND>>. Acesso em: 13 ago. 2020.

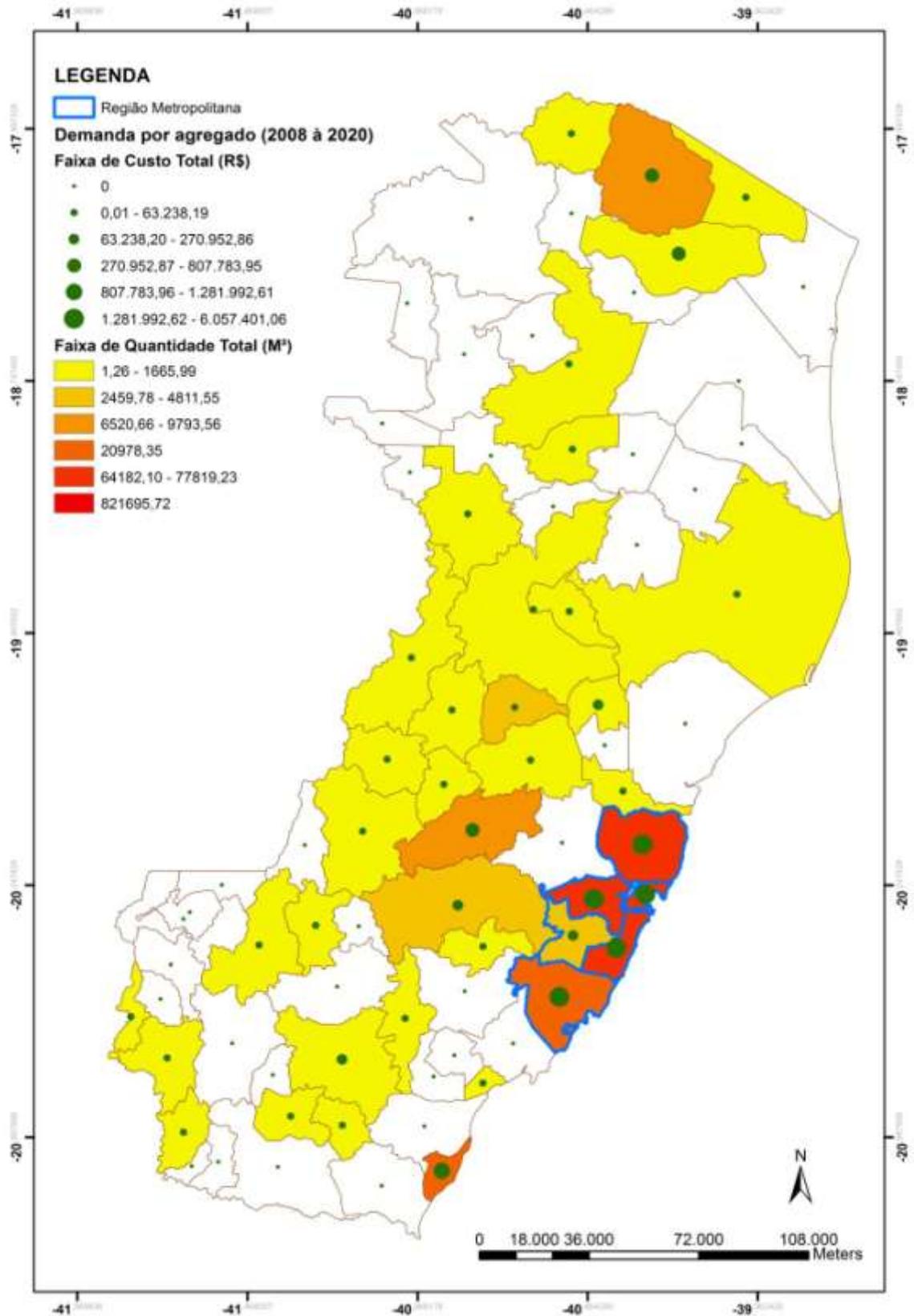
XU, J.; SHI, Y.; ZHAO, S. Reverse Logistics Network-Based Multiperiod Optimization for Construction and Demolition Waste Disposal. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 145, n. 2, p. 1–16, 2019.

ZHANG, L. W. et al. Effective utilization and recycling of mixed recycled aggregates for a greener environment. **Journal of Cleaner Production**, v. 236, p. 117600, 2019.

ZHAO, W.; LEEFTINK, R. B.; ROTTER, V. S. Evaluation of the economic feasibility for the recycling of construction and demolition waste in China-The case of Chongqing. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 6, p. 377–389, 2010.

ZHENG, L. et al. Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 405–413, 2017.

APÊNDICE A: DEMANDA POR AGREGADO NO ESPÍRITO SANTO (2008-2020)



Fonte: Autoria própria a partir dos dados de GEO-OBRAS ES.

APÊNDICE B: CUSTOS SIGNIFICANTES EM PROJETOS DE USINAS FIXAS DE BENEFICIAMENTO DE RCD

Quadro-1 - Custos significantes em projetos de usinas fixas de beneficiamento de resíduos de construção e demolição.

Referências	Wilburn e Goonan (1998)	Duran, Lenihan e O'Regan (2006)	Jadovski e Masuero (2006)	Nunes <i>et al.</i> (2007)	Tam (2008)	Zhao, Leeflink e Rotter (2010)	Coelho e De Brito (2013)	Fonseca Júnior e Ferreira (2013)	Lima (2013)	Cardoso, Galatto e Guadagnin (2014)	Oliveira Neto <i>et al.</i> (2017)	Moresco (2017)	Gularte <i>et al.</i> (2020)	
País referência para os dados apresentados	EUA	IRL	BRA	BRA	AUS	CHN	PRT	BRA	BRA	BRA	PRT e BRA	BRA	BRA	
Capacidade da usina (ton./hora)	45,83	140	100	100	45,83	100	300	50	50	25	208	62,5	15	
DESPESAS PRÉ-OPERACIONAIS														
Investimento inicial	Terreno	2,21%	-	31,13%	-	-	-	39,78%	32,59%	59,88%	-	7,61%	48,91%	12,61%
	Obras e instalação de equipamentos	34,23%	25,93%	11,48%	1,68%	25,93%	1,63%	1,86%	10,86%	19,96%	23,52%	22,46%	21,71%	30,23%
	Equipamentos*	63,57%	74,07%	57,39%	98,32%	74,07%	98,37%	54,48%	56,22%	18,96%	67,13%	69,78%	28,90%	56,15%
	Outros	-	-	-	-	-	-	3,88%	0,33%	-	9,35%	0,16%	0,48%	1,01%
DESPESAS OPERACIONAIS														
Custos Fixos	mão de obra	43,35%	60,11%	32,58%	12,37%	14,63%	5,46%	14,58%	27,57%	26,42%	68,53%	50,32%	31,46%	35,37%
	Seguro	-	-	-	67,22%	-	2,09%	3,49%	-	-	-	3,86%	-	-
Custos variáveis	Energia e água	-	-	-	4,50%	-	8,35%	61,82%	59,76%	22,26%	25,31%	14,12%	11,97%	
	Manutenção	45,89%	2,79%	5,85%	-	62,76%	12,53%	5,67%	-	10,16%	7,39%	6,14%	2,29%	31,91%
	Diesel	-	9,04%	56,67%	20,41%	18,12%	-	-	10,60%	-	-	1,02%	13,36%	15,96%
	Despejo de rejeito	10,76%	28,06%	-	-	-	77,98%	67,91%	-	3,66%	-	11,37%	36,52%	-
Outros	-	-	5,34%	-	-	1,95%	-	-	-	1,83%	1,98%	2,24%	4,79%	

* Em geral: Caminhões, retroescavadeira/pá carregadeira, um alimentador vibratório, cabine de separação manual, esteiras, triturador e peneira vibratória.
 Legenda: EUA - Estados Unidos da América; IRL - Irlanda; BRA - Brasil; AUS - Austrália; CHN - China; PRT - Portugal; ton./hora - toneladas por hora.

Fonte: Autoria própria, com base em Cardoso, Galatto e Guadagnin (2014), Coelho e de Brito (2013), Duran, Lenihan e O'regan (2006), Fonseca Júnior e Ferreira (2013), Gularte *et al.* (2020), Jadovski e Masuero (2006), Lima (2013), Moresco (2017), Nunes *et al.* (2007), Oliveira Neto *et al.* (2017), Tam (2008), Wilburn e Gonnán (1998) e Zhao, Leeflink e Rotter (2010).