

## 523 - OTIMIZAÇÃO DO CUSTO DE TRANSPORTE PARA USINAS DE BENEFICIAMENTO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO: DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO MATEMÁTICO

### Renato Ribeiro Siman<sup>(1)</sup>

Engenheiro Químico pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Mestre e Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP. Chefe do Laboratório de Gestão do Saneamento Ambiental (LAGESA) e Professor Associado do curso de Engenharia Ambiental da UFES.

### Isabelle Barcelos Cariman<sup>(1)</sup>

Engenheira Ambiental pelo Instituto Federal Fluminense (IFF). Mestranda em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

### Renato Meira De Sousa Dutra<sup>(1)</sup>

Engenheiro Ambiental, Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável e Doutorando em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

### Luciana Harue Yamane<sup>(1)</sup>

Graduada em Ciências Biológicas pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e em Tecnologia em Saneamento Ambiental pelo Instituto Federal do Espírito Santo (IFES). Mestrado em Ciências em Engenharia Ambiental pela UFES. Doutora em Ciências pela Universidade de São Paulo (USP). Bolsista PROFIX da CAPES no Departamento de Engenharia Ambiental da UFES.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** LAGESA - UFES. Sala 20, CT IV (Castelinho). Universidade Federal do Espírito Santo. Av. Fernando Ferrari, 514, Vitória - ES, Brasil. CEP 29075-91

## RESUMO

O desenvolvimento urbano está associado a contínua geração de Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Apesar de ser um processo tecnologicamente conhecido e gerador de benefícios ambientais, a produção de Agregado Reciclado (AR) e reciclagem de RCD apresentam alguns entraves em questões técnicas e econômicas. Sendo as a viabilidade técnica assegurada através de normas legais vigentes a questão econômica se torna um fator limitante. Dessa forma, este artigo propôs-se a avaliar a viabilidade econômica a partir da implementação de um modelo matemático de localização das usinas de beneficiamento no estado do Espírito Santo (ES) - Brasil, no solver CPLEX 12.8. A viabilidade econômica analisada a partir do modelo matemático, verificou-se que o cenário que apresenta os custos mais reduzidos acontece com a alocação de sete usinas de beneficiamento e nenhum centro de consolidação. Funcionando assim, como uma ferramenta que contribui para tomada de decisão da reciclagem do RCD no ES e outras regiões.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Usinas de Beneficiamento. Modelo Matemático. Alocação.

## INTRODUÇÃO

A construção e a demolição são processos essenciais para o desenvolvimento dos centros urbanos. Entretanto, a má gestão dos materiais utilizados na construção civil, a necessidade de reformas e atualizações na paisagem urbana e o acontecimento de eventos extremos como terremotos e acidentes geram Resíduos de Construção e Demolição (RCD) (AKHTAR; SARMAH, 2018).

Estima-se que de 25% a 30% dos materiais de construção são desperdiçados se transformando em resíduo (CHILESHE et al., 2018). A China, maior gerador de RCD no mundo, em 2014 gerou cerca de 1 bilhão de toneladas de RCD, desviando apenas 6,14% para reciclagem em 2015 (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018), já no Brasil, 40% do RCD gerado foi aterrado (MENEGAKI; DAMIGOS, 2018).

O processo de beneficiamento do RCD consiste na reciclagem e transformação desse resíduo em um produto principal, o agregado reciclado (AR). Esse processo apresenta benefícios ao meio ambiente, tais como:

redução do uso dos recursos naturais e no consumo energético na produção do agregado, além da redução da destinação dos RCD em aterros sanitários ou em locais inadequados (COELHO; DE BRITO, 2013).

Na produção de material da construção civil, o uso do AR em substituição ou em composição ao agregado natural (AN), forma um produto que difere em suas propriedades físicas, químicas e mecânicas (SORATO, 2016). A produção do agregado natural, por proceder de uma fonte homogênea (a partir de uma rocha), produz um concreto de melhor qualidade. A fonte caracteristicamente heterogênea do AR apresenta-se como um fator limitante para o estabelecimento de um padrão de qualidade e segurança técnica (KUMAR, 2017). Porém, faz-se serem seguidas a parâmetros técnicos legais principal entrave, os aspectos normativos, visto que, a utilização do AR na construção civil depende do atendimento de padrões pré-estabelecidos, conforme projeto de especialistas, normativas, análises e adequações físico-químicas (DIMITRIOU; SAVVA; PETROU, 2018).

Apesar de ser um processo tecnicamente viável, o beneficiamento pode ser insustentável econômica e ambientalmente (SILVA; DE BRITO; DHIR, 2017). A implantação das usinas de beneficiamento demanda um considerável investimento financeiro que em muitos casos podem inviabilizar economicamente a reciclagem do RCD e produção do AR (COELHO; BRITO, 2013).

O processo de beneficiamento apresenta inúmeros benefícios ao meio ambiente, sendo os principais: a redução do uso dos recursos naturais; diminuição do transporte dos locais de extração do agregado natural; redução no consumo energético na produção do agregado e; redução da destinação dos RCD em aterros ou em locais inadequados (SILVA; DE BRITO; DHIR, 2017; COELHO; BRITO, 2013). No entanto, seu uso e incorporação provocam alterações nas propriedades do concreto, de maneira positiva e negativa (AKHTAR; SARMAH, 2018; BRAVO et al., 2018), influenciando na viabilidade técnica de seu uso. Diretrizes governamentais que estipulem características, básicas, necessárias de qualidade do agregado reciclado para uso estrutural e não estrutural, são essenciais para assegurar a segurança técnica de uso do agregado reciclado (SORATO, 2016).

Em muitos países o beneficiamento do RCD é insustentável, econômica e ambientalmente (SILVA; DE BRITO; DHIR, 2017). A implantação das usinas de beneficiamento demanda um considerável investimento financeiro que em muitos casos podem inviabilizar a reutilização do agregado, sendo mais econômico consumir o agregado extraído diretamente da natureza (COELHO; BRITO, 2013). Dentre os custos que decorrem da operação da usina, a demanda dispendiosa do transporte viário pode inviabilizar a distribuição do agregado reciclado em função dos custos logísticos (CHILESHE et al., 2018; DURAN; LENIHAN; O'REGAN, 2006; XU; SHI; ZHAO, 2019). O elemento "custo de transporte" de uma usina de beneficiamento de RCD, apenas para o carregamento de resíduos gerados pela usina, pode representar cerca de 70% de todos os custos operacionais e 9% das despesas totais no período de 60 anos (COELHO; DE BRITO, 2013).

Nesse sentido, a gestão sustentável dos RCD é dependente da solução dos obstáculos financeiros que decorrem sobre os custos, dentre eles o de transporte. Para buscar estratégias otimizadas visando a redução de custos operacionais de transporte, modelos matemáticos têm sido explorados, como observado nos estudos de Rahimi e Ghezavati (2017) e Xu, Shi e Zhao (2019).

Este artigo tem como objetivo elaborar um modelo matemático de programação linear inteira mista para tomada de decisão na alocação de usinas de beneficiamento de resíduos de construção e demolição e centros de consolidação visando a otimização do custo de transporte permitindo o estabelecimento de uma rede logística para reciclagem de RCD.

Adicionalmente, realizar a aplicação piloto do modelo matemático utilizando dados do estado Espírito Santo (ES) - Brasil.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental foi realizado em 2 etapas, sendo que na Etapa 1 foi elaborado o modelo matemático; e na Etapa 2 foi aplicado o modelo piloto.

### **Etapa1: Elaboração do modelo matemático para tomada de decisão na alocação de elementos em um sistema de logística de reciclagem de RCD.**

Nessa etapa foi realizada a revisão bibliográfica para levantamento de técnicas utilizadas na determinação da localização da alocação instrumentos necessários para essa rede de logística de reciclagem de RCD. Além da elaboração do próprio modelo matemático utilizando programação linear interia mista desenvolvido no solver IBM ILOG CPLEX 12.8 (IBM, 2019).

### **Etapa 2: Aplicação do modelo matemático, de alocação, em um sistema de logística de reciclagem de RCD no estado Espírito Santo/Brasil.**

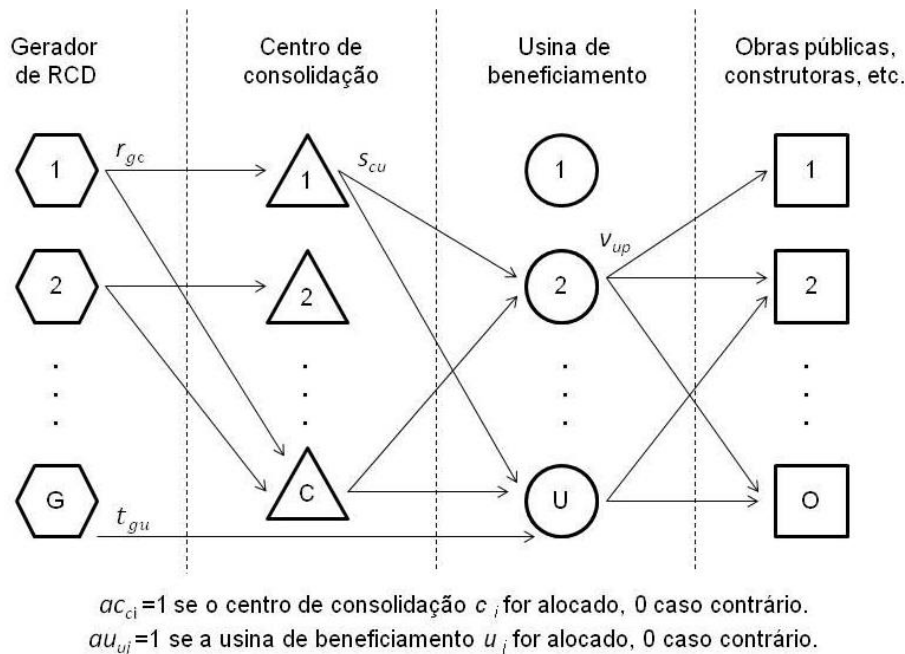
A partir de uma revisão bibliográfica, essa etapa consta no levantamento de dados que compreendem a um Estudo de Viabilidade Financeira (EVF) de instalação de usinas de beneficiamento e estações de transbordo, tais como: custos de investimento inicial, custo fixo e variável, valor de aquisição do agregado bruto, valor de venda do agregado processado e impostos sobre a venda do produto. Ainda, foram coletados dados quanto a estimativa de oferta de RCD e demanda por AR para um sistema de reciclagem de RCD estado Espírito Santo (ES) - Brasil. A partir da aplicação dos dados levantados, o modelo foi executado no solver CPLEX e os resultados foram analisado

## **RESULTADOS OBTIDOS COM A PRIMEIRA ETAPA**

A viabilidade econômica de uma usina de beneficiamento é o fator determinante para tomada de decisão do local de instalação. Considerando a viabilidade técnica dos AR, os custos de produção das usinas de beneficiamento devem ser menores que os custo dos agregados obtidos a partir da extração de fontes naturais. Ao avaliar a distribuição percentual média das despesas, nota-se que alguns componentes de custo tem mais influência que outros na viabilidade econômica da usina (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; MAHLER, 2020; OLIVEIRA NETO; CORREIA, 2019; TAM, 2008; WILBURN; GONNAN, 1998; ZHAO; LEEFTINK; ROTTER, 2010):

- Dentre os custos pré-operacionais as despesas mais representativas são: aquisição de equipamentos (54%); aquisição do terreno (27%); e custos com obras civis (18%) de construção dos prédios de uso administrativo, comum e a da guarita, e instalação mecânica e elétrica dos equipamentos. Outros custos (1%) com o projeto de engenharia, registros e licenças ambientais também foram observados nos estudos avaliados, no entanto, apresentam menor significância.
- Para os custos operacionais as despesas mais significantes são: mão de obra (30%), despejo de rejeito (27%); energia e água (17%), diesel (14%) e manutenção de equipamentos (7%). Despesas com seguro (3%) e outros (2%) (medidas de avaliação ambiental, telefone, internet e a depreciação sobre o ativo), apresentaram menor significância.
- No entanto, os custos com transporte foram desconsiderados e calculados, apenas, em conjunto com o "despejo de rejeito", uma vez que, na aquisição de RCD e/ou na venda de AR o custo é debitado pelo construtor/demolidor. Os custos com transporte representa cerca de 70% de todos os custos operacionais e 9% das despesas totais no período de 60 anos (COELHO; DE BRITO, 2013).

A problemática dos custos atribuídos ao beneficiamento de RCD tem sido observada em diversos estudos (CHILESHE et al., 2018; RAHIMI; GHEZAVATI, 2018; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2017; XU; SHI; ZHAO, 2019). Uma vez que, o custos com o transporte em longas distâncias podem acrescentar cerca de 60% em cima do valor do produto final (KURDA; DE BRITO; SILVESTRE, 2018). Nesse sentido, modelos matemáticos vêm sendo utilizados no planejamento estratégico do processo de beneficiamento, a fim de alcançar soluções otimizadas para redução dos custos que contemplam o sistema (RAHIMI; GHEZAVATI, 2017; XU; SHI; ZHAO, 2019). Dessa forma, desenvolveu-se um modelo matemático composto por uma cadeia logística de quatro nós (Figura 1).



**Figura 1 - Modelo proposto para logística dos RCD no Espírito Santo.**

Onde é possível observar (Figura 1) a interação entre os nós: municípios geradores de RCD; os centros de consolidação, candidatos, responsáveis por agregar os RCD de várias regiões em busca da redução de custos; as usinas candidatas de trituração/beneficiamento e; as construtoras e obras públicas, compradoras do agregado reciclado.

No modelo proposto tanto as usinas beneficiadoras, quanto os modelos de caminhões utilizados no transporte apresentam níveis estratificados entre, pequeno, médio e grande porte, o que lhes permite maior variação de custos e capacidades. Ressalta-se ainda, que apenas os geradores de RCD não é caracterizado como gerador de receita, a medida que deve pagar para destinar seus detritos. Assim, os centros de consolidação, usinas de beneficiamento, recebem pelo serviço de destinação, e pela venda de agregado reciclado para as obras públicas e construtoras. Assim, com base no estudo de Rodrigues e Filho (2019), propõe-se o modelo composto pelos seguintes conjuntos, parâmetros, variáveis, objetivos e restrições:

- **Conjuntos:**

$G$ : conjunto de municípios geradores de RCD;  
 $C$ : conjunto de centros de consolidação de RCD candidatos;  
 $U$ : conjunto de usinas beneficiadoras de RCD candidatas;  
 $O$ : conjunto de compradores de agregado reciclado;  
 $FT$ : conjunto de porte de caminhões;  
 $FC$ : conjunto de porte de centro de consolidação;  
 $FU$ : conjunto de porte de usinas de beneficiamento.

- **Parâmetros:**

$re_g$ : geração de RCD reaproveitável do município  $g \in G$ ;  
 $de_o$ : demanda de agregado reciclado do comprador  $o \in O$ ;  
 $da_{gc}$ : distância entre o gerador de RCD  $g \in G$  e o centro de consolidação candidato  $c \in C$ ;  
 $db_{cu}$ : distância entre, o candidato, centro de consolidação  $c \in C$  e usina beneficiadora  $u \in U$ ;  
 $dc_{gu}$ : distância entre o gerador de RCD  $g \in G$  e a usina beneficiadora candidata  $u \in U$ ;  
 $dd_{uo}$ : distância entre a usina candidata  $u \in U$  e o comprador de agregado reciclado  $o \in O$ ;  
 $ic_{ci}$ : custo fixo de implementação do centro de consolidação candidato  $c \in C$  de porte  $i \in FC$ ;  
 $iu_{uj}$ : custo fixo de implementação da usina beneficiadora candidata  $u \in U$  de porte  $j \in FU$ ;  
 $oc_i$ : custo de operação do centro de consolidação de porte  $i \in FC$ ;

$ou_j$ : custo operação da usina beneficiadora de porte  $j \in FU$ ;  
 $kc_i$ : capacidade do centro de consolidação de porte  $i \in FC$ ;  
 $ku_j$ : capacidade da usina beneficiadora de porte  $j \in FU$ ;  
 $kt_k$ : capacidade de transporte do caminhão de porte  $k \in FT$ ;  
 $ta_{gc}$ : custo de transporte entre o gerador de RCD  $g \in G$  e o centro de consolidação  $c \in C$ ;  
 $tb_{cu}$ : custo de transporte entre o centro de consolidação  $c \in C$  e a usina beneficiadora  $u \in U$ ;  
 $tc_{gu}$ : custo de transporte entre o gerador de RCD  $g \in G$  e usina beneficiadora candidata  $u \in U$ ;  
 $td_{uo}$ : custo de transporte entre a usina beneficiadora  $u \in U$  e o comprador de AC  $o \in O$ ;  
 $vr$ : valor pago pela entrega do RCD ao centro de consolidação ou à usina beneficiadora;  
 $vv$ : valor pago pela compra do agregado reciclado.

• **Variáveis de decisão:**

$ac_{ci}$ : variável binária que assume valor 1, caso o centro de consolidação  $c \in C$  de porte  $i \in FC$  seja alocado, e 0 caso contrário;  
 $au_{uj}$ : variável binária que assume valor 1, caso a usina beneficiadora  $u \in U$  de porte  $j \in FU$  seja alocada, e 0 caso contrário;  
 $r_{gc}$ : quantidade de RCD enviado do gerador de RCD  $g \in G$  para o centro de consolidação  $c \in C$ ;  
 $s_{cu}$ : quantidade de RCD enviado do centro de consolidação  $c \in C$  a usina beneficiadora  $u \in U$ ;  
 $t_{gu}$ : quantidade de RCD enviado do gerador de RCD  $g \in G$  para a usina beneficiadora  $u \in U$ ;  
 $v_{uo}$ : quantidade de AC enviado da usina beneficiadora  $u \in U$  para o comprador  $o \in O$ ;  
 $na_{kgc}$ : número de caminhões de porte  $k \in FT$  utilizados para o transporte do RCD do município gerador de RCD  $g \in G$  para o centro de consolidação  $c \in C$ ;  
 $nb_{kcu}$ : número de caminhões de porte  $k \in FT$  utilizados para o transporte do RCD do centro de consolidação  $c \in C$  para a usina beneficiadora  $u \in U$ ;  
 $nc_{kgu}$ : número de caminhões de porte  $k \in FT$  utilizados para o transporte do RCD do município gerador de RCD  $g \in G$  para a usina beneficiadora  $u \in U$ ;  
 $nd_{kco}$ : número de caminhões de porte  $k \in FT$  utilizados para o transporte do agregado reciclado da usina beneficiadora  $u \in U$  para o comprador  $o \in O$ .

• **Função objetivo:**

Minimizar

$$\sum_{c \in C} \sum_{i \in FC} (oc_i + ic_{ci}) ac_{ci} \quad (a)$$

$$+ \sum_{c \in C} \sum_{i \in FC} (ou_j + iu_{uj}) au_{uj} \quad (b)$$

$$+ \sum_{g \in G} \sum_{c \in C} \sum_{k \in FT} na_{kgc} kt_k da_{gc} ta_{gc} \quad (c)$$

$$+ \sum_{c \in C} \sum_{u \in U} \sum_{k \in FT} nb_{kcu} kt_k db_{cu} tb_{cu} \quad (d)$$

$$+ \sum_{g \in G} \sum_{u \in U} \sum_{k \in FT} nc_{kgu} kt_k dc_{gu} tc_{gu} \quad (e)$$

$$+ \sum_{u \in U} \sum_{o \in O} \sum_{k \in FT} nd_{kco} kt_k dc_{uo} tc_{uo} \quad (f)$$

$$- \sum_{g \in G} \sum_{c \in C} vr r_{gc} \quad (g)$$

$$- \sum_{g \in G} \sum_{u \in U} vr t_{gu} \quad (h)$$

$$- \sum_{u \in U} \sum_{o \in O} vv v_{uo} \quad (i)$$

A função objetivo relaciona termos de custos e receitas dos processos de instalação e operação de beneficiamento visando, a redução e maximização, respectivamente. Na equação (a) da função, são somados os custos de implementação e operação dos centros de consolidação designados; em (b) os mesmos custos são somados, contudo, agora referem-se às usinas de beneficiamento; da parcela (c) até (f) são somados os custos gerados pelo transporte das interações de cada nó, considerando ainda informações de número e capacidade de caminhões; nas equações (g) à (h) é subtraído dessas despesas, citadas anteriormente, a receita gerada nos centros e usinas; assim como, em (i) onde é subtraído os ganhos gerados pela venda do agregado reciclado. A análise realizada pela função objetivo faz parte do Estudo de Viabilidade Financeira (EVF), avaliando o indicador de Valor Presente Líquido (VPL) (SEBRAE, 2019). O VPL de um projeto é igual ao valor presente de suas entradas futuras menos o valor do investimento inicial e as saídas futuras. Sendo assim, essencial para avaliação de viabilidade de um projeto de reciclagem (OGUNJUYIGBE; AYODELE; ALAO, 2017).

Contudo, o modelo está sujeito a restrições que delimitam sua atuação:

• **Sujeito à:**

$$re_g \geq \sum_{c \in C} r_{gc} + \sum_{u \in U} t_{gu} \quad \forall g \in G \quad (2)$$

$$\sum_{g \in G} r_{gc} = \sum_{u \in U} s_{cu} \quad \forall c \in C \quad (3)$$

$$\sum_{g \in G} t_{gu} + \sum_{c \in C} s_{cu} = \sum_{o \in O} v_{uo} \quad \forall u \in U \quad (4)$$

$$\sum_{u \in U} v_{uo} = de_o \quad \forall o \in O \quad (5)$$

$$\sum_{g \in G} r_{gc} \leq \sum_{i \in FC} ac_{ci} kc_i \quad \forall c \in C \quad (6)$$

$$\sum_{g \in G} t_{gu} + \sum_{c \in C} s_{cu} \leq \sum_{j \in FU} au_{uj} ku_j \quad \forall u \in U \quad (7)$$

$$r_{gc} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall g \in G, c \in C \quad (8)$$

$$s_{cu} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall c \in C, u \in U \quad (9)$$

$$t_{gu} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall g \in G, u \in U \quad (10)$$

$$v_{uo} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall u \in U, o \in O \quad (11)$$

Fluxo de RCD: Inicialmente, na equação (2) certifica-se que todo material transportado dos geradores para os centros de consolidação e usinas de beneficiamento, seja menor ou apresente o mesmo volume de RCD gerado no estado; a equação (3) por sua vez, assegura que todo fluxo de RCD que chega aos centros de consolidação seja encaminhado para as usinas de beneficiamento; (4) garante que todo o volume de detritos recebidos nas usinas sejam transformados em agregado reciclado e distribuídos para os centros de venda; assim como, a equação (5) ratifica que todo agregado reciclado produzido nas usinas, seja igual a demanda requerida por cada comprador, garantindo um fluxo que beneficie todo resíduo gerado; as restrições (6) e (7) asseguram que o fluxo de RCD, esteja limitado a capacidade dos centros de consolidação e das usinas de beneficiamento, respectivamente; por último, quanto ao fluxo, as restrições de (8) a (11) certificam que haja apenas fluxo positivo entre os nós.

$$ac_{ci} \in \{0,1\} \quad \forall c \in C, i \in FC \quad (12)$$

$$au_{uj} \in \{0,1\} \quad \forall u \in U, j \in FU \quad (13)$$

$$\sum_{i \in FC} ac_{ci} \leq 1 \quad \forall c \in C \quad (14)$$

$$\sum_{j \in FU} au_{uj} \leq 1 \quad \forall u \in U \quad (15)$$

Alocação de centros e usinas: as restrições (12) e (13) atribuem a característica binária as variáveis  $ac$  e  $au$ , assim permitindo que os valores incumbidos a estas, variem apenas entre 0 e 1. Dessa forma, é possível identificar se há ou não, a necessidade da alocação de centros de consolidação e usinas de beneficiamento, respectivamente; as equações (14) e (15), certificam que para cada município, haverá apenas um centro de consolidação e usina.

$$\sum_{k \in FT} na_{kgc} kt_k \geq r_{gc} \quad \forall g \in G, c \in C \quad (16)$$

$$\sum_{k \in FT} nb_{kcu} kt_k \geq s_{cu} \quad \forall c \in C, u \in U \quad (17)$$

$$\sum_{k \in FT} nc_{kgu} kt_k \geq t_{gu} \quad \forall g \in G, u \in U \quad (18)$$

$$\sum_{k \in FT} nd_{kuo} kt_k \geq v_{uo} \quad \forall u \in U, o \in O \quad (19)$$

Atribuições do transporte: cada restrição listada da equação (16) a (19), é responsável por garantir que a quantidade e a capacidade dos caminhões, disponíveis para o transporte, seja sempre adequada ao volume de fluxo resíduo, considerando cada nível, do gerador para o centro de consolidação (16), dos centros para as usinas (17), dos geradores para as usinas (18), e das usinas para os compradores (19).

$$na_{kgc} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall g \in G, c \in C, k \in FT \quad (20)$$

$$nb_{kcu} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall c \in C, u \in U, k \in FT \quad (21)$$

$$nc_{kgu} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall g \in G, u \in U, k \in FT \quad (22)$$

$$nd_{kuo} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall u \in U, o \in O, k \in FT \quad (23)$$

Números positivos: as últimas restrições que correspondem as equações (20), (21), (22) e (23), caracterizam o domínio das variáveis de decisão, atribuindo a elas apenas valores positivos inteiros.

A avaliação da viabilidade econômica por meio do modelo, buscando a localização da usina de beneficiamento que mais reduz custos, considerou os elementos que compõe custos de Investimento Inicial, Custo Fixo, Custo Variável, Valor de aquisição do agregado bruto, Valor de venda do agregado processado (SEBRAE, 2019). O custo de investimento é composto por valores utilizados para a implantação da usina de beneficiamento, considerando valores de aquisição de terreno e compra equipamentos. O custo fixo não varia em virtude do volume de produção. O custo variável é decorrente da operação da planta. Fazem parte desse custo itens como mão de obra operacional, energia, água, suprimentos para produção (COELHO; BRITO, 2012).

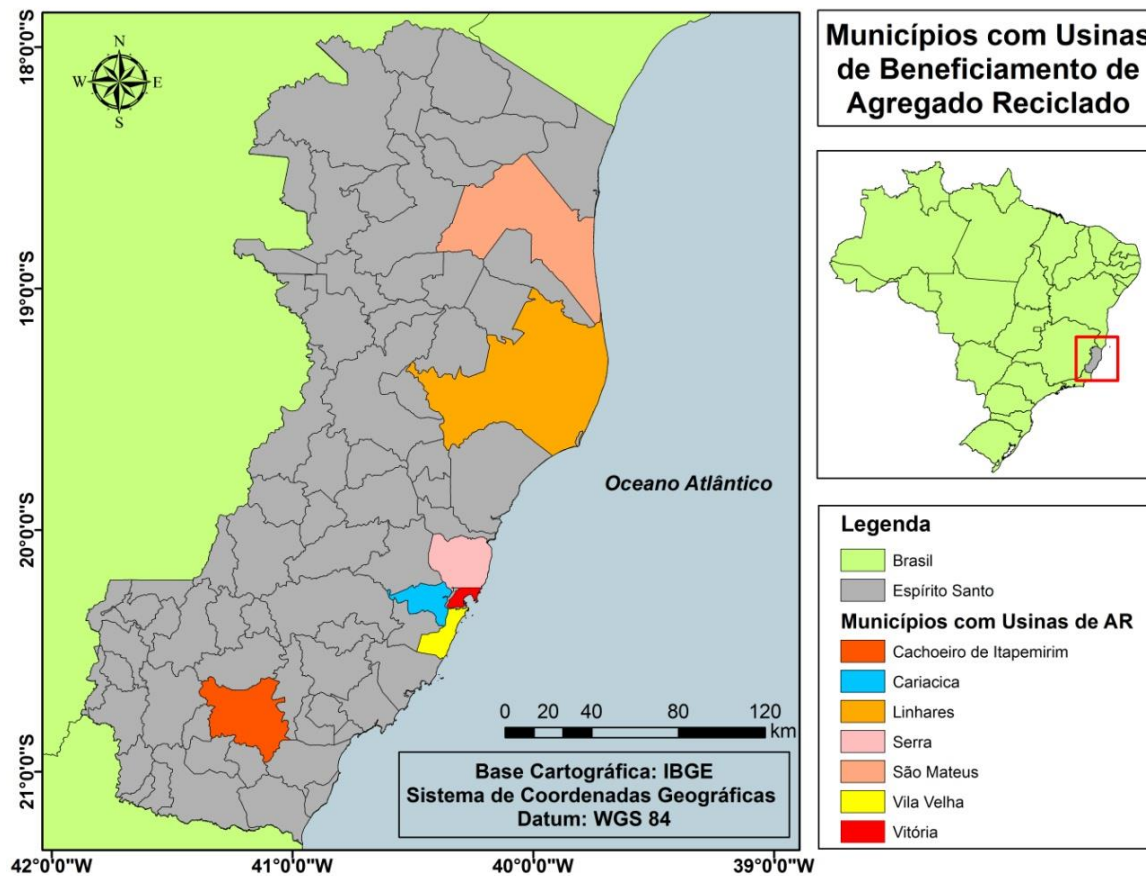
A implementação do modelo matemático, o levantamento de dados buscou utilizar as informações mais próximas da realidade, a fim de implementar um cenário capaz de verificar a atual viabilidade econômica do beneficiamento de RCD no estado do Espírito Santo. Os dados quanto a oferta de RCD no Espírito Santo foram traçados a partir da geração per capita desse resíduo por número de habitantes, quanto a demanda de AR essa foi estabelecida pelo portal estadual GEOBRAS.

## RESULTADOS OBTIDOS COM A SEGUNDA ETAPA

No Espírito Santo, o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do estado estimou uma geração de 2.819.510ton de RCD em 2017 (ESPÍRITO SANTO, 2019). Considerando a análise da composição gravimétrica dos RCD de Vitória/ES realizado por Ramos (2007), cerca de 79,23% desses resíduos seriam classificados como Classe A (BRASIL, 2002), resíduos passíveis de beneficiamento, calcula-se que o estado ofertou 2.233.897,77ton de RCD - Classe A, em 2017.

A partir da implementação do modelo foi possível observar que a configuração ótima, visando a localização ideal de usinas de beneficiamento de RCD e centros de consolidação no estado do Espírito Santo e a redução dos custos, se deu por usinas localizadas nos municípios de Cachoeiro de Itapemirim, Cariacica, Linhares, São

Mateus, Serra, Vila Velha e Vitória. Além da não alocação de centros de consolidação, assim como observada na situação real indicada pelo Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Espírito Santo (ESPÍRITO SANTO, 2019), conforme exibe a Figura 2.



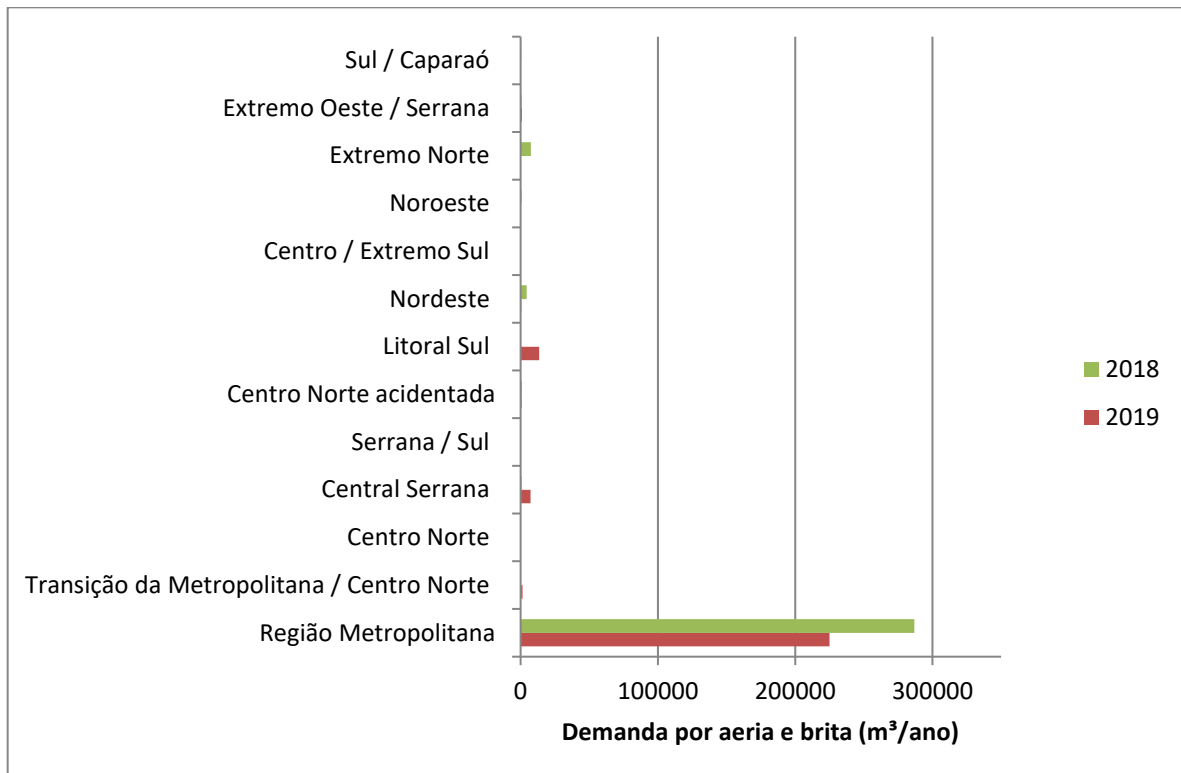
**Figura 2 - Municípios do ES com as usinas alocadas segundo a implementação do modelo.**

A partir desse resultado, como exibido na Figura 2, nota-se que a alocação ideal de uma usina de beneficiamento, com o objetivo de reduzir custos com o transporte, está diretamente associada às taxas de demanda e oferta por material. Um vez que, a partir dessas taxas determinadas, nota-se que a região metropolitana do estado apresentou a necessidade de uma usina em 4 municípios. Já os outros municípios também são considerados polos urbanos da região sul e norte do estado. Sendo até, desnecessária a instalação dos centros de consolidação nesse caso específico.

No Espírito Santo, atualmente, existem 4 usinas de beneficiamento de RCD localizadas nos municípios: Vila Velha, Cariacica, Serra e Anchieta. A demais, existem 41 unidades de transbordo no estado, destinadas a proporcionar apoio logístico ao sistema de coleta e transporte. Dessa forma, essas instalações funcionam como pontos de consolidação, já que buscam a redução de custos de transporte até a destinação final. Contudo, todas essas unidades estão voltadas apenas para o transbordo de resíduos sólidos urbanos. Assim, no estado não foram encontrados pontos de consolidação para os RCD (ESPÍRITO SANTO, 2019).

Ainda, o posicionamento das usinas corroboram com uma análise do banco de dados estadual do GEO-OBRAS ES no período de 2008 a 2019 foi possível traçar um perfil da taxa de oferta e demanda por agregado para construção civil para o Espírito Santo. Contudo, a região Metropolitana da Grande Vitória, composta pelos municípios Cariacica, Guarapari, Serra, Viana, Vila Velha e Vitória, é a região que mais adquire esses produtos (Apêndice A), sendo responsável por aproximadamente 90,1% de toda a demanda do estado por agregados (areia e brita/bica corrida) em 2019, e 94,88% em 2018. Já o volume de areia e brita/bica corrida demandado por obras públicas no Espírito Santo é exibido na Figura 3.





**Figura 3: Demanda total por agregado (areia e brita/bica corrida) (ton/ano), em obras públicas, nas regiões do Espírito Santo/Brasil, em 2018 e 2019.**

**Fonte: Adaptado a partir dos dados de GEO-OBRA ES (2021).**

Ainda, quanto a demanda por agregado exibida na Figura 3, calcula-se que em média a demanda de 154,96ton/h de areia e brita em obras públicas no ES. Com relação as frações granulométricas, um total de 87.003,07m³ de areia (25%) e de 263.730,07m³ de brita (75%) foram demandados para obras públicas na região metropolitana do estado, entre 2008 e 2020 (GEO-OBRA ES; 2021). Assim, a média demandada como areia e brita, em toneladas por ano, representa cerca de 14,65% de toda a massa de resíduo passível de ser beneficiada no estado (ESPÍRITO SANTO, 2019; GEO-OBRA ES; 2021).

Kurda, de Brito e Silvestre (2018) avaliaram os custos com agregados naturais e recicláveis, com e sem os custos do transporte. Os autores observaram que os agregados produzidos em usinas distantes do local de demanda apresentaram um acréscimo de 60% no valor final de venda do agregado devido ao custo de transporte.

Duran, Lenihan e O'Regan (2006) corroboram essa afirmação indicando que a tomada de decisão do posicionamento de usinas de beneficiamento deve levar em consideração a proximidade dos centros urbanos, uma vez que esses fornecem a matéria-prima (RCD) e demandam agregados. Sendo assim, fica claro que o modelo matemático colabora para tomada de decisão de forma exata e analítica podendo ser aplicado em outras regiões do Brasil e fora dele.

## CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

Os custos relacionados ao transporte dos RCD e agregados reciclados e da instalação das usinas, representam os fatores mais agravantes para viabilização econômica do beneficiamento. usinas desse porte estão sujeitas a altos custos (pré) operacionais, as quais então se tornam dependentes do 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 se tornar os mais significantes.

A partir da implementação do modelo matemático de localização/alocação em Espírito Santo/Brasil, embasado em um Estudo de Viabilidade Financeira, foi possível observar que cenário mais favorável economicamente é observado com três nós: os municípios geradores de RCD; as usinas de beneficiamento, alocadas em Cachoeiro de Itapemirim, Cariacica, Linhares, São Mateus, Serra, Vila Velha e Vitória; e as construtoras e obras públicas, compradoras do agregado reciclado. Com base nessas condições, acredita-se que esse modelo pode facilitar a tomada de decisão promovendo a reciclagem de RCD de forma mais econômica e eficiente no Espírito Santo. Bem como, ser utilizado em outras regiões com o mesmo intuito.

A geração de RCD no Espírito Santo/Brasil se mostrou em ambas maior em 70% que a demanda por agregado, sendo ainda 0,05% de tudo que é gerado no Brasil encaminhado para aproveitamento e reciclagem. Dessa forma, uma vez que sabemos que as reservas minerais são finitas e que apenas para obras públicas existem demandas estaduais por agregado de 290.130,49ton/ano, existe grande potencial para aproveitamento comercial desses resíduos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, v. 186, p. 262–281, 2018.
2. 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.
3. 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.
4. 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. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais – Número*, v. 31, p. 1–10, 2014.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. ESPÍRITO SANTO. Prognósticos e proposição de cenários. In: PERS-ES: Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Espírito Santo. Vitória. p. 326–421.
10. FONSECA JUNIOR, C. A. F.; FERREIRA, G. E. Estudo econômico para instalação de uma usina de RCD. 21ª JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA - CETEM/MCTI, 2013.
11. GEO-OBRES ES. Departamento de estradas e rodagem do Espírito Santo - Acesso ao Convento da Penha. Nº Obra: CEGOV024/2013-1. Situação: Concluída e recebida definitivamente - 22/09/2015.
12. GULARTE, L. C. P.; DE LIMA, J. D.; OLIVEIRA, G. A.; BARICHELLO, R.; PINTO, M. A. N. Modelo de avaliação da viabilidade econômico-financeira da implantação de usinas de reciclagem de resíduos da construção civil em municípios brasileiros. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, n. 2, p. 281–291, 2020.
13. INTERNATIONAL BUSINESS MACHINES CORPORATION - IBM. IBM ILOG CPLEX Optimization Studio V12.8.0. 2019
14. JADOVSKI, I.; MASUERO, B. Estudo dos custos de implantação, operação e manutenção de usinas

- de reciclagem de resíduos de construção e demolição. XI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. p. 1842–1851, 2006.
15. 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.
  16. 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.
  17. LIMA, F. A formação da mineração urbana no Brasil: reciclagem de rcd e a produção de agregados. Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mineral, p. 178, 2013.
  18. 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.
  19. 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.
  20. 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.
  21. 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.
  22. RAMOS, B. F. Indicadores de qualidade dos resíduos da construção civil do município de Vitória-ES. Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, 2007.
  23. RODRIGUES, A. J. F.; FILHO, P. E. G. Modelo matemático para planejamento da logística reversa de resíduos de construção civil considerando a definição das usinas de beneficiamento. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Produção do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, 2019.
  24. 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.
  25. SORATO, R. Recycled aggregate concrete; an overview. 2016. Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, Finlândia, 2016.
  26. 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.
  27. 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.
  28. WILBURN, D. R.; GONNAN, T. G. Aggregates from Natural and Recycled Sources Economic Assessments for Construction Applications — A Materials Flow Analysis. 1998.
  29. 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.
  30. 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.