

Avaliação da gestão de resíduos de construção e demolição baseada em dinâmica de sistemas: um estudo de caso em Serra/ES

Evaluation of construction and demolition waste management based on system dynamics: A case study of Serra/ES.

Dayane Valentina Brumatti¹

Universidade Federal do Espírito Santo,
Vitória, Brasil, dayane.brumatti@edu.ufes.br

Hendriigo Venes²

Universidade Federal do Espírito Santo,
Vitória, Brasil, h.venes@gmail.com

Tânia Galavote³

Universidade Federal do Espírito Santo,
Vitória, Brasil, tania.pinto@edu.ufes.br

Gisele de Lorena Diniz Chaves⁴

Universidade Federal de Santa Catarina,
Florianópolis, Brasil, gisele.chaves@ufsc.br

Renato Ribeiro Siman⁵

Universidade Federal do Espírito Santo,
Vitória, Brasil, renato.siman@ufes.br

RESUMO

A crescente geração de resíduos de construção e demolição (RCD) desencadeada pelo crescimento demográfico e índice de geração per capita (GPC), bem como pela urbanização das cidades, tem sido alvo de estudos para a gestão adequada destes resíduos. Assim, esse estudo apresenta o efeito de instrumentos econômicos para incentivar a reciclagem do RCD e para o desvio de aterros sanitários utilizando a ferramenta de Dinâmica de Sistemas e simulações de cenários (2020-2040), para o município de Serra, Espírito Santo. Como resultado, constatou-se que a política pública de imposto sobre aterro tem a capacidade de promover um aumento da reciclagem do agregado 124 vezes maior que o imposto mais alto (6%), quando comparado com o mais baixo (2%). Mesmo assim, no pior cenário, haveria um aumento do despejo ilegal de 76.000 toneladas e do custo da gestão do RCD para 55 milhões de reais (em 2040). Como estudos futuros, sugere-se que seja inserido no modelo, além do imposto aplicado ao destinador de resíduos ao aterro, penalidades e subsídios, para avaliar o impacto na gestão do RCD de forma abrangente.

Palavras-chave: Resíduo sólido; Simulação; Imposto sobre aterro.

ABSTRACT

The increase in the generation of construction and demolition waste (C&DW), due to the rise and development of the urban population and per capita generation index, has been the subject of many studies to develop mechanisms and strategies to increase and manage this waste. Thus, this paper presents the effect of economic instruments to incentive the recycling of C&DW using the System Dynamics tool and scenario simulations (2020-2040), in Serra, Espírito Santo. As a result, it was possible to verify that the public policy of landfill tax has the ability to promote an increase in aggregate recycling 124 times greater than the highest tax (6%) compared to the lowest tax (2%). Even so, in the worst case scenario, there would be an increase of 76,000 tons in the illegal dumping and the cost of managing the CDW of 55 million reais (until 2040). For future research, in addition to the tax applied to the destination of waste to the landfill, penalties and subsidies should be included in the model to assess the impact on the management of C&DW in a comprehensive way.

Keywords: Solid Waste; Simulation; Landfilling taxes.

Como citar:

BRUMATTI, D. V.; VENES, H.; GALAVOTE, T.; CHAVES, G. L. D.; SIMAN, R. R. Avaliação da gestão de resíduos de construção e demolição baseada em dinâmica de sistemas: um estudo de caso em Serra/ES. In: 2º CONGRESSO INTERNACIONAL DE SUSTENTABILIDADE URBANA, 2. 2022, Vitória. *Anais* [...]. Vitória: UFES, 2022. p. 785-794. ISBN: 978-989-53626-0-8

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil desempenha um papel importante no desenvolvimento urbano por tratar-se de um setor que influencia diretamente a economia de um país. Devido ao aumento populacional e do poder aquisitivo das pessoas, atualmente há um aumento da demanda por reformas e construção de novas moradias, resultando em mais atividades de construção e na geração de resíduos decorrentes destas obras (LIU et al., 2020).

A gestão inadequada dos resíduos de construção e demolição (RCD) causa impactos ambientais e econômicos devido ao descarte irregular e manutenção dos pontos viciados, locais inapropriados para descarte, respectivamente (LLATAS et al., 2021). Assim, estratégias para reduzir a geração, aumentar a reciclagem e o reaproveitamento devem ser incentivadas. Li et al. (2020) relataram que atos normativos regulamentadores são muito utilizados para impulsionar a reciclagem de RCD no mundo. Uma das abordagens de incentivo é a aplicação de taxas sobre a utilização de aterros sanitários, fundamentais para reduzir a quantidade de materiais enviados para aterros sanitários e incentivar a utilização de agregados reciclados da construção civil (DING et al., 2021). Para Rosado e Penteadó (2020) e Yuan e Wang (2014) a legislação e as políticas fiscais são os mecanismos mais utilizados para promover a minimização dos RCD, sendo a taxa de cobrança para a disposição final em aterros uma das práticas mais notáveis apontadas pela literatura. Ainda, as relações causais unilaterais estáticas revelaram as vantagens do imposto sobre o aterro na gestão dos RCD (MAK et al., 2019).

Sendo assim, a aplicação de um método dinâmico pode auxiliar na avaliação da influência da aplicação da política pública, como as descritas anteriormente no aumento da reciclagem. Nesse contexto, a Dinâmica de Sistemas (DS) é um método de análise para estudar sistemas complexos sob diferentes políticas, sendo capaz de representar temporalidades distintas por meio de mecanismos de feedback existentes ao longo do tempo (STERMAN, 2000). Essa ferramenta tem sido aplicada a uma grande variedade de problemas, como análises econômicas e socioambientais (CHAVES et al., 2021; GHISOLFI et al., 2017). O dinamismo desse método apresenta vantagens sobre as outras ferramentas e métodos estáticos de pesquisa operacional, quando se considera os sistemas de gerenciamento de resíduos, por sua natureza mutável e reconhecível dos elementos do mundo real. O uso da DS permite a simulação de cenários, facilitando uma análise abrangente, de resultados quantitativos e qualitativos, mais robustos e confiáveis (MAK et al., 2019) com vantagens distintas para analisar o gerenciamento de resíduos, relacionando as abordagens ambiental, social, política e econômica (POPLI et al., 2017).

Assim, esse estudo propõe a avaliação do efeito do crescimento populacional e do índice de geração per capita (GPC) sobre a geração do RCD ao longo dos anos e os efeitos do imposto sobre aterro que possibilite a reciclagem do agregado e de outros elementos componentes do RCD, visando o estímulo à reciclagem e diminuição da geração de RCD. Assim, foi desenvolvido um modelo de DS, para verificar cenários de implantação de imposto aplicado ao destinador de resíduos ao aterro, avaliando seu efeito na geração de RCD, a porcentagem depositada em aterro e o custo da gestão de, aplicado a um estudo de caso para uma cidade brasileira. O modelo contribui para avaliação dos impactos das políticas que incidem sobre a gestão de RCD, fornecendo orientações estratégicas para setores que atuam na gestão do RCD.

Como citar:

BRUMATTI, D. V.; VENES, H.; GALAVOTE, T.; CHAVES, G. L. D.; SIMAN, R. R. Avaliação da gestão de resíduos de construção e demolição baseada em dinâmica de sistemas: um estudo de caso em Serra/ES. In: 2º CONGRESSO INTERNACIONAL DE SUSTENTABILIDADE URBANA, 2. 2022, Vitória. *Anais* [...]. Vitória: UFES, 2022. p. 785-794. ISBN: 978-989-53626-0-8

2. METODOLOGIA

A metodologia desse artigo é composta por quatro etapas: (1) descrição do sistema; (2) formulação matemática do modelo; (3) verificação do modelo e (4) descrição dos cenários.

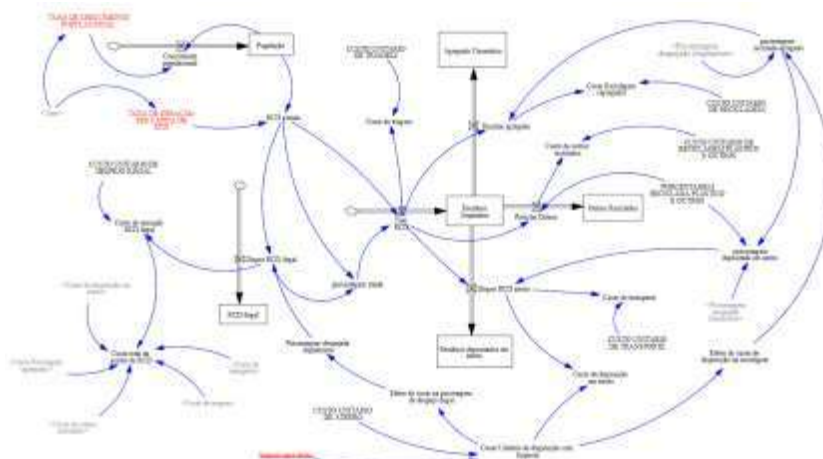
2.1 Descrição do sistema

Nesta etapa, estudou-se o sistema de gerenciamento de RCD por meio de revisão da literatura, a fim de identificar as relações causais entre as variáveis. Assim, foi possível identificar três subestruturas principais: projeção e crescimento populacional, gerenciamento de RCD e as políticas públicas para o incentivo a gestão de RCD. A previsão da geração de resíduos no modelo proposto é formulada com base na dinâmica de crescimento populacional e de geração de RCD per capita. Considerou-se que RCD gerado possui duas rotas possíveis: (1) Despejo ilegal que representa a parcela de RCD gerada que não foi coletada para triagem e/ou tratamento e que foram dispostos inadequadamente em locais públicos (2) Triagem que representa a parcela de resíduos coletada pelo sistema público e a destinada pelo gerador. Neste estudo, essa última parcela é composta por “Agregado cimentício”, “Outros Recicláveis” (papel, plástico e outros) e “Rejeitos” (resíduos sólidos que não apresentem outra possibilidade que não a disposição final em aterros sanitários) (MMA, 2012). Além disso, considerou-se também a influência do imposto para geradores de resíduos destinados em aterros incidindo de maneira proporcional na reciclagem do agregado e no despejo ilegal, e a influência desse imposto incidindo de forma inversamente proporcional na quantidade de resíduos dispostos em aterro sanitário (MAK et al., 2019).

2.2 Formulação matemática do modelo

Nesta etapa, desenvolveu-se um Diagrama de Estoque Fluxo (DEF) para o gerenciamento do RCD (**Figura 1**) envolvendo as etapas de geração, triagem, destinação/disposição final e custos, bem como a influência do imposto para aterro, no despejo ilegal, reciclagem do agregado e disposição em aterro sanitário. Entretanto, é importante ressaltar que neste trabalho não foi considerado o reuso de RCD, apenas a reciclagem de agregado cimentício e outros materiais passíveis de reciclagem.

Figura 1. Representação do modelo de Estoque e Fluxo para gerenciamento de RCD.



Fonte: Os autores, 2022.

Como citar:

BRUMATTI, D. V.; VENES, H.; GALAVOTE, T.; CHAVES, G. L. D.; SIMAN, R. R. Avaliação da gestão de resíduos de construção e demolição baseada em dinâmica de sistemas: um estudo de caso em Serra/ES. In: 2º CONGRESSO INTERNACIONAL DE SUSTENTABILIDADE URBANA, 2. 2022, Vitória. **Anais** [...]. Vitória: UFES, 2022. p. 785-794. ISBN: 978-989-53626-0-8

Para confecção do modelo utilizou-se o *software* Vensim® PLE da empresa Ventana Systems (VENTANA SYSTEMS, 2021) e são apresentadas as equações matemáticas do modelo no **Quadro 1**. As variáveis ‘Taxa de crescimento populacional’, ‘Taxa de geração de RCD’, ‘Efeito do custo de disposição na reciclagem’ e ‘Efeito do custo na porcentagem de despejo ilegal’ representadas por um gráfico, assumiram valores que variam anualmente conforme as fontes consultadas para cada uma (ESPÍRITO SANTO, 2019; MAK et al., 2019; AU, AHN, KIM, 2018).

Quadro 1. Equações de entrada no modelo para gerenciamento de RCD.

Variável	Equação	Unid.
Taxa de crescimento populacional ¹	With Lookup(Time, ([[0,0)-(3000,10)], (2020,0.0122), (2025,0.0114),(2030,0.0094), (2035,0.0065),(2040,0.0019))	ano ⁻¹
Taxa de geração de RCD ¹	With Lookup(Time, ([[2020,0)-(2040,10)],(2020,0.2201), (2025,0.2224),(2030, 0.2245),(2035,0.226),(2040,0.2264))	ano ⁻¹
Geração de RCD	População*Taxa de geração per capita de RCD	ton
Crescimento populacional	População*Taxa de crescimento populacional	hab.ano ⁻¹
População	População (t)=Crescimento populacional. dt + População (t ₀)	hab
Disponível RCD ilegal	RCD gerado*Porcentagem despejada ilegalmente	ton.ano ⁻¹
RCD ilegal	RCD ilegal (t) = (Disponível RCD ilegal) dt + RCD ilegal (t ₀)	ton
Porcentagem triada	1 - (Disponível RCD ilegal/RCD gerado)	dmnl
Triar RCD	RCD gerado*porcentagem triada	ton.ano ⁻¹
Custo de triagem	Custo unitário de triagem*Triar RCD	reais.ano ⁻¹
Resíduos Separados	Resíduos Separados (t) = (Triar RCD-Disponível RCD aterro-Reciclar agregado-Reciclar Outros) dt + Resíduos Separados(t ₀)	ton
Reciclar agregado	Triar RCD*porcentagem reciclada agregado	ton.ano ⁻¹
Agregado Cimentício	Agregado Cimentício (t) = (Reciclar agregado) dt + Agregado Cimentício(t ₀)	ton
Custo Reciclagem	Reciclar agregado*Custo unitário de reciclagem	reais.ano ⁻¹
Reciclar Outros	Triar RCD*Porcentagem reciclada plástico e outros	ton.ano ⁻¹
Outros Reciclados	Outros Reciclados (t) = (Reciclar Outros) dt+Outros Reciclados (t ₀)	ton
Custo de outros reciclados	Custo unitário de reciclagem plástico e outros*Reciclar Outros	reais.ano ⁻¹
Disponível RCD aterro	Triar RCD*porcentagem depositada em aterro	ton.ano ⁻¹
Resíduos depositados em aterro	Resíduos depositados em aterro (t) = (Disponível RCD aterro) dt + Resíduos depositados em aterro (t ₀)	ton
Custo da disposição em aterro	Custo Unitário de disposição com Imposto*Disponível RCD aterro	reais.ano ⁻¹
Custo de transporte	Custo unitário de transporte*Disponível RCD aterro	reais.ano ⁻¹
porcentagem depositada em aterro	1 -(Porcentagem despejada ilegalmente+porcentagem reciclada agregado+Porcentagem reciclada plástico e outros)	dmnl
porcentagem reciclada agregado	Efeito do custo de disposição na reciclagem-Porcentagem despejada ilegalmente	dmnl
Efeito do custo de disposição na reciclagem ²	With Lookup(Custo Unitário de disposição com Imposto ([[0,0)-(300,1)],(10,0), (12,0.013), (17,0.032),(19,0.079),(22,	dmnl

Como citar:

BRUMATTI, D. V.; VENES, H.; GALAVOTE, T.; CHAVES, G. L. D.; SIMAN, R. R. Avaliação da gestão de resíduos de construção e demolição baseada em dinâmica de sistemas: um estudo de caso em Serra/ES. In: 2^o CONGRESSO INTERNACIONAL DE SUSTENTABILIDADE URBANA, 2. 2022, Vitória. *Anais* [...]. Vitória: UFES, 2022. p. 785-794. ISBN: 978-989-53626-0-8

	0.164), (25,0.211), (30,0.38), (35,0.599), (38,0.621), (40,0.64), (50,0.826),(55,0.82),(58,0.738),(60,0.699),(70,0.77))	
Custo Unitário de disposição com Imposto	Custo unitário de aterro+(Custo unitário de aterro*Imposto para aterro)	reais.ton ⁻¹
Efeito do custo na porcentagem de despejo ilegal ³	With Lookup(Custo Unitário de disposição com Imposto ([(0,0)-(300,0.09)], (34.93,0.008), (81.51,0.014), (128.09, 0.02), (174.67,0.028), (221.25,0.035), (267.83,0.048), (314.41, 0.07),(350,0.897),(425,0.1317),(475,0.1647),(500,0.1827))	dmnl
Porcentagem despejada ilegalmente	Efeito do custo na porcentagem de despejo ilegal	dmnl
Custo de remoção RCD ilegal	Custo unitário de despejo ilegal*Dispor RCD ilegal	reais.ano ⁻¹
Custo total da gestão de RCD	Custo da disposição em aterro+Custo de outros reciclados+Custo de remoção RCD ilegal+Custo de transporte+Custo de triagem+"Custo Reciclagem (agreg.)"	reais.ano ⁻¹

Fonte: Os autores (2022) baseado em: (1) Espírito Santo (2019); (2) Mak et al. (2019) e (3) Baseado em Au, Ahn e Kim (2018), valores convertidos em abril de 2022.

O estudo de caso foi aplicado no município de Serra, Espírito Santo (ES), escolhido devido à disponibilidade de dados sobre a gestão e o gerenciamento dos resíduos sólidos no município. Além disso, possui o maior Produto Interno Bruto do estado decorrente da grande concentração de indústrias no município (ESPÍRITO SANTO, 2019). O **Quadro 2** apresenta os parâmetros utilizados no modelo relacionados ao município estudado, bem como dados de entrada identificados na literatura.

Quadro 2. Parâmetros de entrada do modelo utilizados.

Variável	Parâmetro	Unidade	Fonte:
Custo inicial reciclagem agregado	10*	Reais.ton ⁻¹	Fornecido pela Vila Recicla
Custo unitário de aterro	12*	Reais.ton ⁻¹	Rosado e Penteadó (2020)
Custo unitário de reciclagem plástico e outros	40*	Reais.ton ⁻¹	Fornecido pelo Sindicato das Indústrias de Vidros do Estado do Espírito Santo
Custo unitário de transporte	14,4*	Reais.ton ⁻¹	Geoobras (2020)
Porcentagem reciclada plástico e outros	15	%	Rezende e Santana (2018)
População inicial	527.240	habitantes	Espírito Santo (2019)
Imposto para aterro	0	%	Fornecido pela Prefeitura Municipal da Serra/ES
Custo unitário de despejo ilegal	36,95*	Reais.ton ⁻¹	
Custo unitário de triagem	12,6*	Reais.ton ⁻¹	

* Valores atualizados 2022, de acordo com o índice nacional de preços ao consumidor amplo – IPCA (IBGE, 2022).

Fonte: Os autores, 2022.

2.3 Verificação do modelo

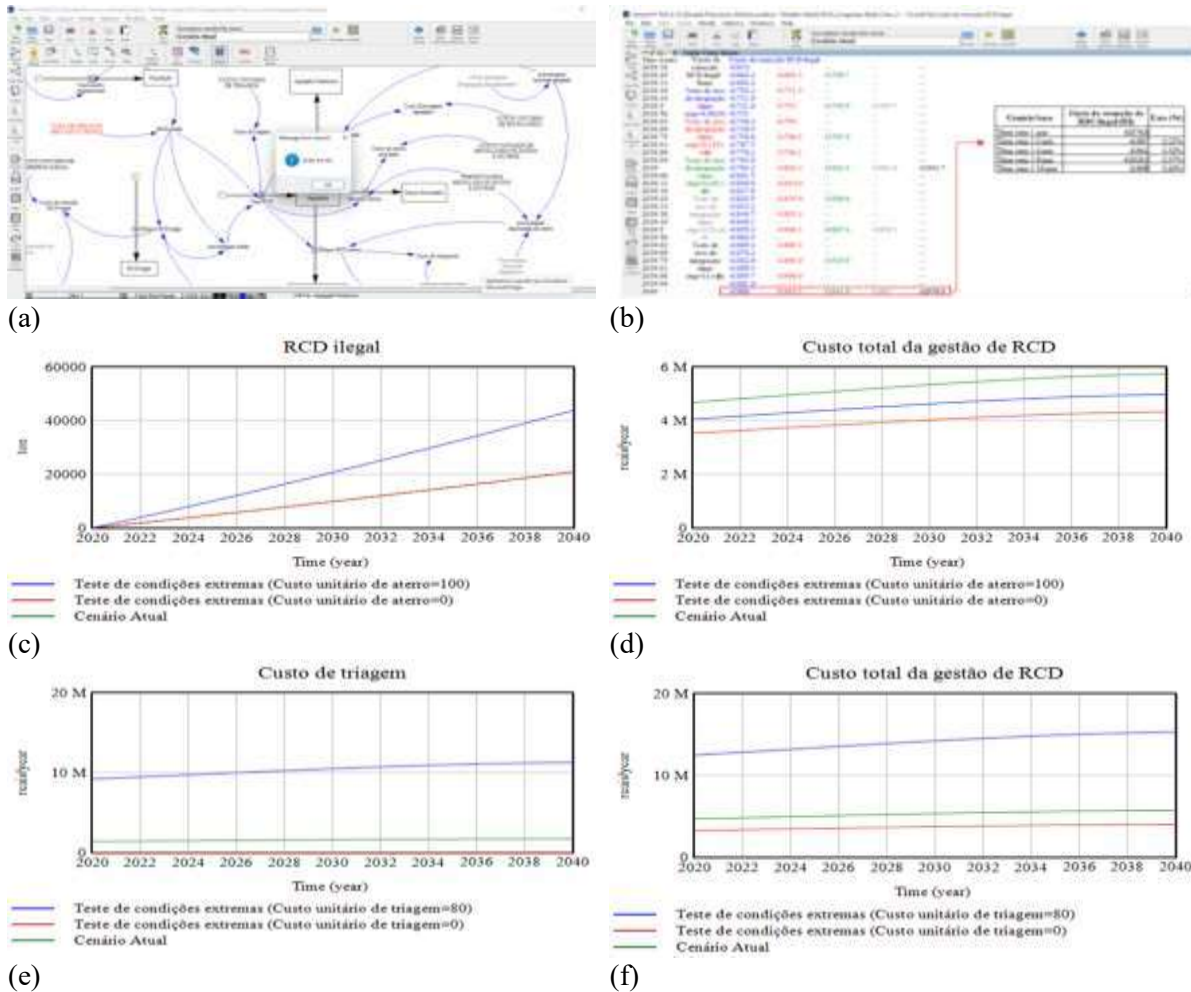
Para avaliar a confiabilidade do modelo foram realizados testes de consistência dimensional, condição extrema e erro de integração (**Figura 2**), uma vez que, são os testes mais empregados na avaliação de modelos de DS (STERMAN, 2000). Em todos os testes o modelo se comportou conforme o esperado. Além disso, adotou-se horizonte de simulação de 20 anos (2020-2040) e time step de 1 ano. Os modelos de DS são baseados em equações diferenciais ordinárias não lineares, resolvidas

Como citar:

BRUMATTI, D. V.; VENES, H.; GALAVOTE, T.; CHAVES, G. L. D.; SIMAN, R. R. Avaliação da gestão de resíduos de construção e demolição baseada em dinâmica de sistemas: um estudo de caso em Serra/ES. In: 2^o CONGRESSO INTERNACIONAL DE SUSTENTABILIDADE URBANA, 2. 2022, Vitória. **Anais [...]**. Vitória: UFES, 2022. p. 785-794. ISBN: 978-989-53626-0-8

numericamente em um processo de integração numérica (STERMAN, 2000). O método de integração de Euler foi utilizado devido ao baixo tempo computacional necessário e sua alta estabilidade numérica (KORN, 2016).

Figura 2. (a) Teste de consistência dimensional; (b) Teste de erro de integração; Teste de condições extremas para o (c) RCD ilegal, (d) Custo total da gestão de RCD, (e) Custo de triagem, (f) Custo total da gestão de RCD.



Fonte: Os autores, 2022.

2.4 Descrição dos cenários

Os cenários foram confeccionados de forma a fornecer análise da influência nas variações da estimativa temporal da população, geração per capita de resíduos e imposto para aterro na quantidade de RCD gerada, disposta ilegalmente e reciclada, bem como sua influência no custo total do gerenciamento do RCD (**Quadro 3**).

Estes cenários propostos basearam-se na literatura afim de avaliar a possibilidade de variação a partir de mudanças nos próximos anos. Foram considerados cenários com implementação de impostos para geradores de resíduos que destinam em aterro (Cenário 1.1 e Cenário 1.2). O primeiro considera que o município de Serra implemente baixos valores de impostos para aterramento como constatado nas

Como citar:
BRUMATTI, D. V.; VENES, H.; GALAVOTE, T.; CHAVES, G. L. D; SIMAN, R. R. Avaliação da gestão de resíduos de construção e demolição baseada em dinâmica de sistemas: um estudo de caso em Serra/ES. In: 2º CONGRESSO INTERNACIONAL DE SUSTENTABILIDADE URBANA, 2. 2022, Vitória. *Anais [...]*. Vitória: UFES, 2022. p. 785-794. ISBN: 978-989-53626-0-8

idades do Reino Unido (PANZONE et al., 2021), enquanto o segundo considera que o município implemente valores mais altos de imposto, como observado na China (MAK et al., 2019). Já os últimos dois cenários consideram a combinação de alto crescimento populacional e da GPC, juntamente com a implementação de um baixo (Cenário 2.1) e alto (Cenário 2.2) valor de imposto para aterro.

Quadro 3. Descrição dos cenários.

Variáveis	Cenário	Descrição
Imposto para aterro	1.1 Imposto (baixo)	Supondo a implementação de imposto para geradores de resíduos destinados em aterro com aumento de 2% anualmente.
	1.2 Imposto (alto)	Supondo a implementação de imposto para geradores de resíduos destinados em aterro com aumento de 6% anualmente.
População GPC Imposto para aterro	2.1 Pop/GPC (alto) Imposto (baixo)	Considerando um alto aumento populacional e da taxa de geração per capita seguido da implementação de imposto para geradores de resíduos destinados em aterro com aumento de 2% anualmente.
	2.2 Pop/GPC (alto) Imposto (alto)	Considerando um alto aumento populacional e da taxa de geração per capita seguido da implementação de imposto para geradores de resíduos destinados em aterro.com aumento de 6% anualmente.

Fonte: Os autores, 2022.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados para a quantidade acumulada do agregado cimentício reciclado, estão apresentados na **Figura 3 (a)**. Os melhores resultados alcançados de quantidade de agregado cimentício reciclado foram encontrados nos cenários em que os impostos aplicados aos geradores que encaminham os resíduos para aterro foram alto (6%), demonstrando ser este um importante instrumento para incentivar a reciclagem de RCD. O cenário 2.2 Pop/GPC (alto) Imposto (alto) apresentou um resultado 124 vezes maior do que o cenário 2.1 Pop/GPC (alto) Imposto (Baixo), o que endossa o resultado de outros estudos que defendem as vantagens do imposto para geradores de resíduos destinados em aterro na gestão dos RCD. Yuan e Wang (2014) determinaram para a cidade de Shenzhen/China, que uma cobrança de aterro de 62,00 reais.ton⁻¹, contra 3,88 Reais.ton⁻¹ cobrados no cenário atual, poderia elevar a quantidade de RCD reciclados até o ano de 2030, em 260%.

Os resultados para a quantidade acumulada de resíduos depositados em aterro sanitário, ao longo dos anos, estão apresentados na **Figura 3 (b)**. O cenário que demonstrou maior desvio de RCD do aterro foi alcançado quando o imposto aplicado aos geradores foi alto (6%), confirmando essa estratégia como uma ótima maneira de se desviar resíduos do aterro sanitário. Isso traz vários benefícios como prolongamento da vida útil do aterro, diminuição do impacto ambiental da disposição de resíduos no solo e incentivo à reciclagem e reuso. Segundo Yu et al. (2021), tanto em países desenvolvidos quanto os em desenvolvimento estão com falta de locais para instalação de aterros sanitários e enfrentam um problema desafiador de degradação ambiental causado por RCD.

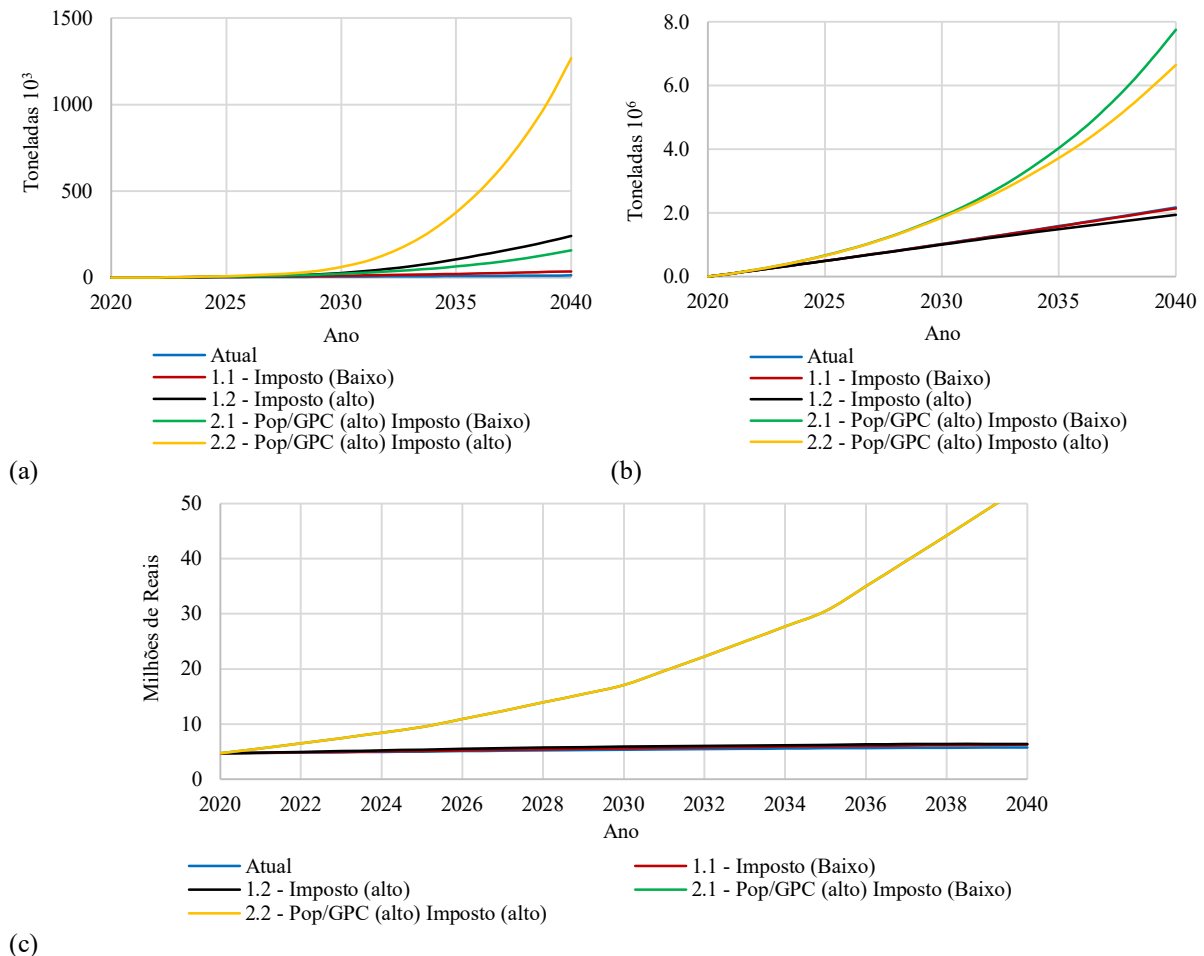
Outros estudos como o de Lu et al. (2015) corroboram com esses resultados. Esses autores estudaram para Hong Kong, em 2014, a disposição a pagar pelas partes interessadas pela gestão do RCD e demonstraram que para a eliminação do resíduo em aterro, as partes estariam dispostas a pagar em média 155,44 Reais.ton⁻¹, quase o dobro do valor estabelecido pelo poder público (83,75 Reais.ton⁻¹).

Como citar:

BRUMATTI, D. V.; VENES, H.; GALAVOTE, T.; CHAVES, G. L. D; SIMAN, R. R. Avaliação da gestão de resíduos de construção e demolição baseada em dinâmica de sistemas: um estudo de caso em Serra/ES. In: 2^o CONGRESSO INTERNACIONAL DE SUSTENTABILIDADE URBANA, 2. 2022, Vitória. *Anais [...]*. Vitória: UFES, 2022. p. 785-794. ISBN: 978-989-53626-0-8

Mak et al. (2019) simularam o esquema de cobrança para 35 anos (2005 a 2040) em Hong Kong e demonstraram a importância do imposto sobre o aterro para a redução de RCD a longo prazo, identificando a porcentagem ideal de cobrança, que não deve exceder 250% de incremento sobre a taxa originalmente aplicada para a cidade estudada, de 110,69 Reais.

Figura 3. (a) Quantidade acumulada de agregado cimentício reciclada; (b) quantidade acumulada de resíduos depositados em aterro sanitário; (c) custo total da gestão do RCD.



Fonte: Os autores, 2022.

Porém, um ponto negativo observado foi o aumento do despejo ilegal desses resíduos em pontos viciados, acarretando um total de 76.000 toneladas de RCD ilegal. Esse fato também foi observado por Yu et al. (2013), em seu estudo realizado em Hong Kong, onde a quantidade de RCD depositados em aterros diminuiu 40% de 6.600 ton.dia⁻¹ em 2005, para cerca de 4.000 ton.dia⁻¹ 2006. Além disso, a quantidade de RCD disposto em aterro em 2009 foi de cerca de 3.121 ton.dia⁻¹, demonstrando uma redução de 53% em relação aos dados de 2005. No entanto, o despejo ilegal de RCD aumentou em mais de 400%, de 365 casos em 2005 para 1.587 casos em 2006. Para minimização desse problema, Jia et al. (2017) indicaram a introdução de atividades de fiscalização e penalização como uma forma de reduzir a quantidade de resíduos despejados ilegalmente. Em um estudo realizado em Shenzhen, na China, esses

Como citar:

BRUMATTI, D. V.; VENES, H.; GALAVOTE, T.; CHAVES, G. L. D.; SIMAN, R. R. Avaliação da gestão de resíduos de construção e demolição baseada em dinâmica de sistemas: um estudo de caso em Serra/ES. In: 2º CONGRESSO INTERNACIONAL DE SUSTENTABILIDADE URBANA, 2. 2022, Vitória. *Anais [...]*. Vitória: UFES, 2022. p. 785-794. ISBN: 978-989-53626-0-8

autores constataram uma redução de 63,17% na quantidade de RCD despejado ilegalmente, sugerindo valores das multas na faixa de 231 a 269 reais.ton⁻¹.

Os resultados para o custo total de gerenciamento do RCD, estão apresentados na **Figura 3 (c)**. Eles mostram que a reciclagem ainda pode ser uma forma de destinação cara, uma vez que os cenários com imposto para disposição de RCD em aterro, favorecendo o desenvolvimento de maiores taxa de reciclagem foram aqueles que apresentaram maior custo total da gestão do RCD. Em função disso, outros mecanismos devem ser incentivados para tornar a reciclagem menos onerosa, como a oferta de subsídios econômicos e desoneração fiscal para as indústrias recicladoras. Jia et al. (2017) constataram um aumento de 310,41% na quantidade de resíduos reciclados e reutilizados quando o subsídio governamental em Shenzhen/China, alcançaram 30,80 Reais.ton⁻¹. Di Filippo et al. (2019) afirmam que incentivos financeiros para cimento e concreto de baixo carbono, podem ser oferecidos como créditos fiscais, isenções de impostos sobre vendas, assistência de empréstimo, abatimentos ou subsídios disponíveis para aqueles que produzem ou compram produtos de concreto de baixo carbono.

4. CONCLUSÃO

Neste estudo foi proposto um modelo de DS para avaliar os efeitos do crescimento populacional, aumento da geração de RCD e implementação de impostos sobre aterramento na reciclagem do agregado cimentício, assim como nos custos de gerenciamento do RCD. Após concepção e verificação do modelo por meio dos testes de validação, percebeu-se que ele se comportou de maneira adequada. Os resultados apontam que a implementação de imposto para aterro é uma alternativa para efetivamente promover o desvio de RCD do aterro sanitário e aumentar a reciclagem do agregado cimentício. Contudo, a implantação desta política acarretou também aumento do despejo ilegal e dos custos com o manejo. Nesse sentido, os tomadores de decisão devem aumentar a fiscalização e a efetividade na aplicação de penalidades, bem como fornecer subsídios para indústrias recicladoras. Por fim, recomenda-se para estudos futuros a simulação do modelo proposto com a inclusão das variáveis taxa de descarte de RCD em aterro, implementação de penalidades e subsídios, de forma conjunta para avaliar os impactos associados à gestão dos RCD de forma abrangente.

REFERÊNCIAS

- AU, L.; AHN, S.; KIM, T. System Dynamic Analysis of Impacts of Government Charges on Disposal of Construction and Demolition Waste: A Hong Kong Case Study. *Sustainability*, v. 10, p. 1077, 4 abr. 2018.
- CHAVES, G. et al. Synergizing environmental, social, and economic sustainability factors for refuse derived fuel use in cement industry: A case study in Espírito Santo, Brazil. *Journal of Environmental Management*, v. 288, n. March, p. 112401, 2021.
- DI FILIPPO, J.; KARPMAN, J.; DESHAZO, J. R. The impacts of policies to reduce CO2 emissions within the concrete supply chain. *Cement and Concrete Composites*, v. 101, n. August 2018, p. 67–82, 2019.
- DING, Z. et al. An agent-based model approach for urban demolition waste quantification and a management framework for stakeholders. *Journal of Cleaner Production*, v. 285, n. xxxx, p. 124897, 2021.
- ESPÍRITO SANTO. *Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Espírito Santo*. Vitória, 2019.
- GEOOBRAS. *Consulta de Obras Públicas*. Disponível em: < <https://geoobras.tce.es.gov.br/cidadao/>>. Acessado

Como citar:

BRUMATTI, D. V.; VENES, H.; GALAVOTE, T.; CHAVES, G. L. D; SIMAN, R. R. Avaliação da gestão de resíduos de construção e demolição baseada em dinâmica de sistemas: um estudo de caso em Serra/ES. In: 2º CONGRESSO INTERNACIONAL DE SUSTENTABILIDADE URBANA, 2. 2022, Vitória. *Anais [...]*. Vitória: UFES, 2022. p. 785-794. ISBN: 978-989-53626-0-8



em: 01 Setembro 2020.

GHISOLFI, V. et al. System dynamics applied to closed loop supply chains of desktops and laptops in Brazil: A perspective for social inclusion of waste pickers. **Waste Management**, v. 60, p. 14–31, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Inflação**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>>. Acessado em 01 Setembro 2022.

JIA, S. et al. Dynamic simulation analysis of a construction and demolition waste management model under penalty and subsidy mechanisms. **Journal of Cleaner Production**, v. 147, 30 jan. 2017.

KORN, G.A. **Interactive Dynamic-System Simulation**. Crc Press. Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, 2016.

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.

LIU, J.; LIU, Y.; WANG, X. An environmental assessment model of construction and demolition waste based on system dynamics: a case study in Guangzhou. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 30, p. 37237–37259, 2020.

LLATAS, C. et al. An LCA-based model for assessing prevention versus non-prevention of construction waste in buildings. **Waste Management**, v. 126, p. 608–622, 2021.

LU, W. et al. Stakeholders' willingness to pay for enhanced construction waste management: A Hong Kong study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 233–240, 2015.

MAK, T. M. W. et al. A system dynamics approach to determine construction waste disposal charge in Hong Kong. **Journal of Cleaner Production**, v. 241, p. 118309, 2019.

MMA. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. **MMA Publicações**, p. 103, 2012.

PANZONE, L. et al. 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.

POPLI, K.; SUDIBYA, G. L.; KIM, S. A Review of Solid Waste Management using System Dynamics Modeling. **Journal of Environmental Science International**, v. 26, n. 10, p. 1185–1200, 2017.

REZENDE, V. M. M.; SANTANA, C. G. Composição gravimétrica dos resíduos de construção civil da cidade de São Luís - MA. **Revista CEDS**, n.9, 2018.

ROSADO, L. P.; PENTEADO, C. S. G. Gestão municipal dos resíduos da construção civil: influência da taxa de disposição em aterros. **Ambiente & sociedade**, v. 23, 2020.

STERMAN, J. D. **Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World**. Boston: McGRAW-HILL, 2000.

VENTANA SYSTEMS, V. **Vensim. Ventana Systems UK**. Disponível em: <<http://www.ventanasystems.co.uk/services/software/vensim/%3E>>. Acesso em: 29 jul. 2022.

YU, A. et al. Strategies for effective waste reduction and management of building construction projects in highly urbanized cities— a case study of hong kong. **Buildings**, v. 11, n. 5, p. 1–14, 2021.

YU, A. T. W. et al. Impact of Construction Waste Disposal Charging Scheme on work practices at construction sites in Hong Kong. **Waste Management**, v. 33, n. 1, p. 138–146, 2013.

YUAN, H.; WANG, J. A system dynamics model for determining the waste disposal charging fee in construction. **European Journal of Operational Research**, v. 237, n. 3, p. 988–996, 2014.

Como citar:

BRUMATTI, D. V.; VENES, H.; GALAVOTE, T.; CHAVES, G. L. D; SIMAN, R. R. Avaliação da gestão de resíduos de construção e demolição baseada em dinâmica de sistemas: um estudo de caso em Serra/ES. In: 2^o CONGRESSO INTERNACIONAL DE SUSTENTABILIDADE URBANA, 2. 2022, Vitória. **Anais [...]**. Vitória: UFES, 2022. p. 785-794. ISBN: 978-989-53626-0-8