



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE USINAS DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL A PARTIR DE SISTEMAS DINÂMICOS

Gabriel Nocito Miquelino Cunha

Vitor Machado Miceli

Projeto de Graduação apresentado ao Curso
de Engenharia de Produção da Escola
Politécnica, Universidade Federal do Rio de
Janeiro.

Orientador: Prof. Amarildo da Cruz

Fernandes, DSc.

Rio de Janeiro

Abril 2013

**ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE USINAS DE
RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL A PARTIR
DE SISTEMAS DINÂMICOS**

Gabriel Nocito Miquelino Cunha

Vitor Machado Miceli

PROJETO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO.

Examinada por:

Prof. Amarildo da Cruz Fernandes, DSc.

Prof. Régis da Rocha Motta, Ph.D.

Francisco Mariano de Souza Lima, DSc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

Abril 2013

Cunha, Gabriel Nocito Miquelino

Miceli, Vitor Machado

Análise da viabilidade econômica de usinas de reciclagem de resíduos da construção civil a partir de sistemas dinâmicos – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

X, 66 p

Orientador: Amarildo da Cruz Fernandes

Projeto Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia de Produção, 2013.

Referencias Bibliográficas: p. 61.

I. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Produção. II. Análise da viabilidade econômica de usinas de reciclagem de Resíduos da Construção Civil a partir de sistemas dinâmicos

CUNHA, GABRIEL NOCITO MIQUELINO
MICELI, VITOR MACHADO

ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE USINAS DE RECICLAGEM DE
RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL A PARTIR DE SISTEMAS DINÂMICOS

[Rio de Janeiro] 2013
(DEI-POLI/UFRJ, Engenharia de Produção, 2013)

p. 66

Projeto de Graduação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica,
Departamento de Engenharia Industrial, Curso de Engenharia de Produção

- 1 – Resíduos de Construção e Demolição,
- 2 – Sistemas Dinâmicos,
- 3 – Viabilidade Econômica

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Produção.

ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE USINAS DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL A PARTIR DE SISTEMAS DINÂMICOS

Gabriel Nocito Miquelino Cunha

Vitor Machado Miceli

Abril/2013

Orientador: Amarildo da Cruz Fernandes, DSc.

Curso: Engenharia de Produção

O descarte ilegal e a falta de um gerenciamento dos resíduos de construção e demolição (RCD) nas cidades brasileiras têm trazido inúmeros problemas para a sociedade, dentre os quais se destacam: a proliferação de vetores de doenças como a da dengue, a obstrução de encostas causando deslizamento nas chuvas, a ocupação irregular de terrenos públicos pela população carente, com riscos de desabamento, entre outros. A reciclagem do RCD traz inúmeros benefícios como o aumento da vida útil dos aterros sanitários, redução da extração de matérias-primas não renováveis como a brita e a areia, geração de novos postos de trabalho, a produção material de construção a baixo custo. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar o mercado de agregados reciclados e desenvolver um modelo baseado em sistema dinâmico para mostrar as dinâmicas e interrelações no gerenciamento de RCD, bem como analisar o custo benefício

entre diferentes cenários que possibilitem a viabilidade econômica dos centros de reciclagem. Foi proposto um modelo que permite analisar a viabilidade econômica de gerenciamento de uma usina de reciclagem de RCD através de um software de simulação I-Think. Os resultados evidenciam a necessidade de uma intervenção pública que melhorem dois fatores principais: (a) lucro e (b) custo unitário de reciclagem. Através de parcerias público privadas, incentivos fiscais ou medidas que estimulassem tanto o consumo de agregados reciclados em obras públicas como a destinação de mais RCD às usinas de reciclagem.

Palavras-chave: RCD, Viabilidade Econômica, Sistemas Dinâmicos.

Abstract of the Graduation Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Industrial Engineer.

**CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE RECYCLING PLANTS:
FEASIBILITY WITH A DYNAMIC SYSTEM APPROACH**

Gabriel Nocito Miquelino Cunha

Vitor Machado Miceli

April/2013

Advisor: Amarildo da Cruz Fernandes, DSc.

Course: Industrial Engineering

The illegal disposal and lack of management of construction and demolition waste (C&DW) in Brazilian cities have brought many problems for society, among which are: the proliferation of vectors of diseases like dengue, obstruction of slopes landslide in rainfall, illegal occupation of public land by the poor people, risk of land collapse, among others. Recycling C&DW brings numerous benefits such as increased life of landfills, reducing the extraction of non-renewable raw materials such as gravel and sand, creating new jobs, building material production at low cost. In this context, the objective of this study is to assess the market for recycled aggregates and develop a model based on dynamic system to show the dynamics and interrelationships in C&DW management, and analyze the cost benefit of different scenarios enabling the economic viability of recycling centers. A model was proposed that allows to analyze the economic feasibility of managing a C&DW recycling plant through a simulation software I-Think. The results highlight the need of an intervention to improve two main factors: (a) income and (b) unit cost of recycling. Through public-private partnerships, tax incentives or measures to stimulate both consumption of recycled aggregates in construction and the destination of more RCD to recycling plants.

Keywords: C&DW, Feasibility, Dynamic System

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Objetivos	2
3. Metodologia	3
CAPÍTULO 1 – ANÁLISE DO MERCADO.....	4
4. Estudo de mercado	4
4.1. <i>Produto: Agregados Reciclados</i>	4
4.2. <i>Processo de produção.....</i>	4
4.3. <i>Tipos de produto.....</i>	5
4.4. <i>Características técnicas</i>	6
4.5. <i>Bens substitutos e complementares</i>	7
4.6. <i>Estrutura de mercado e comercialização</i>	7
4.7. <i>Oferta de agregados reciclados.....</i>	8
4.8. <i>Insumos.....</i>	9
4.9. <i>Consumo de Agregados</i>	10
5. Projeções	12
5.1. <i>Seleção das variáveis economicamente relevantes.....</i>	12
5.2. <i>Determinação das possíveis funções de demanda</i>	13
5.3. <i>Estimativa econométrica das funções e seleção da mais adequada</i>	14
5.4. <i>Projeção da demanda para os próximos cinco anos</i>	14
5.5. <i>Projeção do confronto entre oferta e demanda</i>	15
CAPÍTULO 2 – SISTEMAS DINÂMICOS.....	17
6. Premissas consideradas.....	19
7. Modelo de Análise do Custo-Benefício.....	22
7.1. <i>Os benefícios do gerenciamento do RCD</i>	28
7.2. <i>Cenários considerados.....</i>	29
7.3. <i>Resultados</i>	30
7.4. <i>Comparativo entre as três cidades analisadas</i>	34
8. Modelo de Viabilidade Econômica.....	41

8.1.	<i>Os circuitos em uma planta de reciclagem fixa</i>	41
8.2.	<i>As plantas móveis de reciclagem</i>	43
8.3.	<i>Variáveis analisadas</i>	46
8.4.	<i>Cenários considerados</i>	52
8.5.	<i>Resultados</i>	52
8.6.	<i>Aplicação do modelo em outras duas cidades</i>	54
8.7.	<i>Propostas de solução para a viabilidade das plantas fixas em Macaé</i>	58
9.	Conclusões	60
10.	Referências Bibliográficas	61
	APÊNDICE A – Justificativa das Equações	64

Índice de Figuras

Figura 1 - Processo de produção de agregados reciclados. Fonte: Autores	5
Figura 2 - Consumo brasileiro de agregados por setor e de matérias-primas para a indústria do cimento e cerâmica. A seta vertical indica a estimativa de geração de RCD no Brasil.	10
Figura 3 - Projeções de consumo e oferta de agregados reciclados entre 2013 e 2017.	16
Figura 4 - elementos básicos na modelagem de sistemas dinâmicos.....	17
Figura 5 - modelagem como um processo interativo.	18
Figura 6 - Ciclo simplificado de consumo e descarte de agregados na construção civil.	20
Figura 7 - Modelo Dinâmico 1 para análise de Custo-Benefício da reciclagem nas cidades	22
Figura 8 - Densidade populacional como a maior influência na quantidade de RCD gerada em cada região.	24
Figura 9 - Efeito do preço cobrado na entrada (a) e da quantidade que é reciclada (b) sobre os percentuais.	27
Figura 10 - Resultado simulado do espaço disponível para descarte para cada cenário na cidade de macaé.....	30
Figura 11 - Resultado simulado do Custo Total ao meio ambiente com a ilegalidade para cada cenário considerado na cidade de Macaé	31
Figura 12 - Resultado simulado do valor acumulado de subsídio nos três cenários considerados para Macaé.	32

Figura 13 - Resultado simulado da Relação Custo Benefício para cada cenário da taxa de entrada na planta de reciclagem em Macaé.(1-5,00R\$/t; 2-10,00R\$/t, 3-5,00R\$/t).....	33
Figura 14 - relação custo-benefício do gerenciamento do rcd para as três cidades. 1-macaé 2-são paulo 3-maceió	37
Figura 15 - Ocupação de um aterro virtual com a mesma área para as três cidades.....	38
Figura 16 - Custo Total proveniente do descarte ilegal nas malhas urbanas nas três cidades.....	39
Figura 17 - Subsídio acumulado nas três cidades ao longo dos 20 anos com suas plantas de reciclagem... ..	40
Figura 18 – Circuito simplificado de beneficiamento nas plantas de reciclagem no Brasil.	42
Figura 19 - Circuito maduro simplificado para obtenção de areia e brita reciclada.	43
Figura 20 - Exemplo de planta móvel de reciclagem de RCD.....	44
Figura 21 - Modelo dinâmico 2 proposto para análise de viabilidade econômica de usinas de reciclagem. ..	46
Figura 22 - Lucro Anual Antes do Imposto de Renda – LAIR - para cada um dos cenários considerados na cidade de macaé	53
Figura 23 - Valor Presente Líquido (VPL) em cada cenário.	53
Figura 24 - VPL para 1-circuito Macaé emergente, 2-circ. Macaé maduro, 3- circ. São Paulo emergente,4- circ. São Paulo maduro, 5-circ. Maceió emergente, 6 circ. Maceió maduro.	56
Figura 25 - Resultado de uma suposta melhoria da composição na cidade de Macaé, onde 3 e 4 são os resultados com melhores composições tanto com circuitos emergentes como maduros.....	57
Figura 26 - Resultado simulado com redução de imposto e terreno para circuito emergente em Macaé. .	59
Figura 27 - Gráfico da função 1- e^{-x}	65

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Classificação e utilização dos agregados	6
Tabela 2 - Dados históricos da oferta de agregados reciclados no Brasil	9
Tabela 3 - Consumo brita natural no Brasil.....	11
Tabela 4 - Consumo brita reciclada estimado no Brasil.....	12
Tabela 5 - Variáveis dependentes	13
Tabela 6 - Índices de correlação	14

Tabela 7 – Regressões para a projeção de consumo de agregados reciclados	14
Tabela 8 - Projeções variáveis dependentes.....	15
Tabela 9 - Confronto Oferta x Consumo de agregados reciclados.	16
Tabela 10 - Resumo das premissas consideradas para o modelo 1.....	29
Tabela 11 - Valores aproximados dos subsídios para cada cenário.....	32
Tabela 12 - Dados de entrada pesquisados para as três cidades para a aplicação do Modelo 1.	35
Tabela 13 - Equações dos percentuais determinadas a partir dos valores iniciais pesquisados e espectativas de comportamento nos 20 anos. Fonte: o autor	36
Tabela 14 - Subsídios acumulados em cada cidade ao longo dos 20 anos.	40
Tabela 15- Estimativa de custos para as versões de plantas de reciclagem estudadas.....	45
Tabela 16 - Composição dos resíduos nas três cidades analisadas.	47
Tabela 17 - Percentuais de concreto e cerâmica que será transformado em cada produto ou rejeitados de acordo com cada circuito, independente da origem do resíduo.	49
Tabela 18 - Tabela de preços médios de venda desses agregados reciclados no brasil	50
Tabela 19 - Cenários considerados na simulação do modelo de viabilidade econômica para a cidade de Macaé.	52
Tabela 20- VPL e payback dos resultados simulados em ordem decrescente.....	54
Tabela 21 - Cenários considerados para aplicação do modelo 2 nas plantas fixas das três cidades, considerando o preço de entrada na planta de reciclagem estabelecida em 10,00 R\$/t.	55
Tabela 22 - Resultadado em VPL da aplicação do modelo dinâmico 2 nas três cidades com os dois tipos de circuitos.....	56
Tabela 23 - Cenários das propostas de solução para a viabilidade das plantas fixas com circuito emergente.....	58
Tabela 24 - VPLs em t=20anos para as três alternativas de solução para a planta fixa madura	59

1. Introdução

O descarte ilegal e a falta de um gerenciamento dos resíduos de construção e demolição (RCD) nas cidades brasileiras têm trazido inúmeros problemas para a sociedade, dentre os quais se destacam: a proliferação de vetores de doenças como a da dengue, a obstrução de encostas causando deslizamento nas chuvas, a ocupação irregular de terrenos públicos pela população carente, com riscos de desabamento, entre outros.

Com o crescimento da população urbana nas cidades e ocupação desordenada, muitos aterros sanitários foram esgotados, lixões atingiram ocupação máxima e pedreiras começaram a se tornar um elemento de risco a população nas proximidades dos grandes centros urbanos. Isso naturalmente elevou tanto o custo de obtenção de matéria-prima para a construção civil, como o de descarte dos seus resíduos. Somado a isso, em 2010 foi determinado o marco legal através da Lei 12.305 determinando a Política Nacional dos Resíduos Sólidos obrigando as construtoras a buscarem alternativas não só para solucionar o aumento dos custos, mas também para a sustentabilidade da cadeia da construção civil e cumprimento da lei.

Iniciativas públicas com usinas de reciclagem de RCD começam a ser percebidas no Brasil desde 2001. Sendo uma responsabilidade dos municípios, a reciclagem do RCD traz inúmeros benefícios como o aumento da vida útil dos aterros sanitários, redução da extração de matérias-primas não renováveis como a brita e a areia, geração de novos postos de trabalho, a produção material de construção a baixo custo, entre outros (JOHN, 2000).

Acontece que os agregados após passarem por processos de reciclagem ainda são vistos como novos produtos no mercado, sendo ainda incipientes as usinas privadas que são economicamente sustentáveis em todos os estados brasileiros. Incentivos e parcerias públicas de aquisição ainda são necessários para seu funcionamento. O mercado de agregados reciclados ainda encontra-se em formação.

2. Objetivos

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho consiste em primeiramente analisar as condições do mercado de reciclagem de RCD, mais especificamente do produto Brita reciclada, que é o de maior valor agregado, através das projeções de oferta e demanda deste novo material no Brasil. Com essas projeções será gerado assim um cenário para a viabilidade da instalação de novas usinas de reciclagem no país.

A partir do estudo de mercado o segundo objetivo consiste em desenvolver um modelo baseado em sistema dinâmico para mostrar as interrelações entre as esferas envolvidas no gerenciamento de resíduos de construção e demolição (RCD), bem como analisar a viabilidade econômica de centros de reciclagem em diferentes cenários e condições de mercado.

3. Metodologia

O trabalho consistiu em duas partes: a primeira foi focada em um estudo de mercado para agregados reciclados, avaliando o confronto entre a oferta e a demanda e fazendo projeções futuras sobre o potencial deste setor; a segunda parte foi dedicada a um estudo de viabilidade econômica a partir de modelos dinâmicos que abordam a complexidade da cadeia do RCD e as operações de reciclagem.

Foi realizado, portanto, no primeiro capítulo deste trabalho uma pesquisa exploratória com consulta bibliográfica a fim de obter uma análise dos dados históricos de capacidade produtiva de usinas de reciclagem instalada desde 2001 até 2012 no Brasil, bem como dados de consumo de agregados reciclados, principalmente brita natural. Foram verificadas também possíveis correlações com outras variáveis econômicas como PIB, tamanho da população, para assim poderem ser geradas as projeções de oferta e demanda. Com o cruzamento desses dados, foi verificada a diferença entre a Oferta e Consumo de agregados reciclados e finalmente ser questionada a possibilidade da entrada de novas usinas de reciclagem no setor.

A partir do estudo de mercado sobre os agregados reciclados no Brasil, no Capítulo 2 foi proposto um modelo dinâmico que permite analisar a viabilidade de usinas de reciclagem de RCD em um município do Rio de Janeiro (Macaé) através de um software de simulação I-Think.

CAPÍTULO 1 – ANÁLISE DO MERCADO

4. Estudo de mercado

4.1. Produto: Agregados Reciclados

Os resíduos de construção e demolição são provenientes de construção, reformas, reparos e demolição de obras de construção civil e resultantes da escavação e preparação de terrenos.

Segundo a Resolução nº 307/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), o RCD é classificado em quatro categorias A, B, C e D, sendo as classes A e B recicláveis:

- A) A classe A é a de origem mineral como rochas, solos, cerâmicas, concretos, argamassas, entre outros, que deve ser reciclada como agregados para construção civil ou destinada a aterros específicos.
- B) A classe B é composta de plásticos, papel, metais, vidros, madeiras, asfaltos e outros.
- C) A classe C é composta dos resíduos do gesso
- D) A classe D é composta dos resíduos perigosos.

A fração mineral do RCD (classe A), após processamento nas centrais de reciclagem, constitui os agregados reciclados, onde está incluída a brita reciclada. Estes complementam a oferta do mercado de agregados naturais, reduzindo a pressão sobre os estoques finitos de brita e areia naturais, por exemplo.

4.2. Processo de produção

A tecnologia de obtenção dos agregados reciclados já é dominada. Na Europa diversas usinas já operam com circuitos modernos de operação, podendo ser classificados, conforme Lima (2012) como “circuitos padrão”, que incluem separações densitárias através de equipamentos como Jigue, Britadores VSI e Espirais para obtenção de produtos de maior

valor agregado. Já no Brasil, as operações ainda são simplificadas, resumindo-se a separações granulométricas através de britadores de impacto, de martelo, peneiras, o que Lima (2012) chamou de “circuitos emergentes”. No entanto, salvo poucas variações, os processos existentes nas usinas de reciclagem de produção de agregados reciclados podem ser representados na figura a seguir:

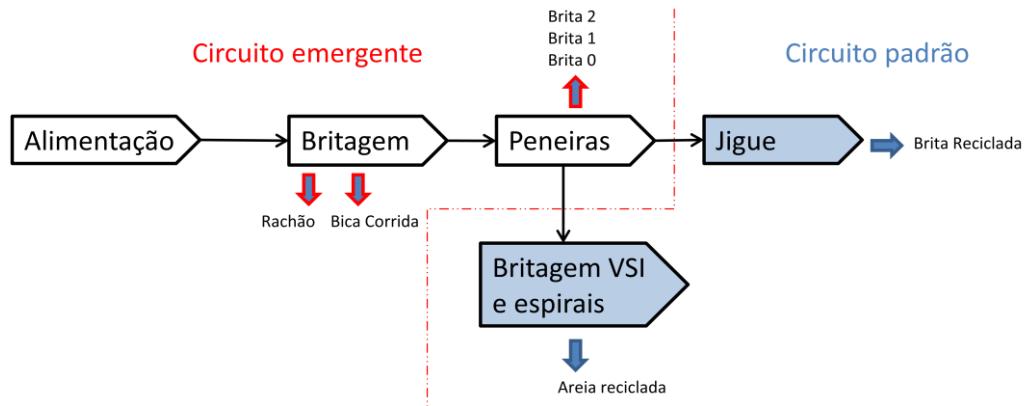


Figura 1 - Processo de produção de agregados reciclados. Fonte: Autores

4.3. Tipos de produto

Pela Figura 1 percebe-se que existem diversos produtos gerados durante o processo de reciclagem de entulhos de obras. Neste trabalho foi considerado que todas as britas (0,1,2, 3 e reciclada) foram incluídas no grupo de britas recicladas, apesar de possuírem aplicações diferentes. A tabela abaixo apresenta os produtos gerados na reciclagem e suas principais utilizações.

Tabela 1 - Classificação e utilização dos agregados

Produto	Utilização
Areia	Assentamento de blocos, tubulações em geral, tanques, embolso, podendo entrar na composição de concretos e asfalto.
Bica Corrida	Confecção de pavimentação asfáltica, lajotas, blocos, intertravados, lajes e acabamentos em geral
Brita 0	Intensivamente na fabricação de concreto, com inúmeras aplicações, como na construção de pontes, edificações e grandes lajes.
Brita 1	Fabricação de concreto que exija maior resistência, principalmente em formas pesadas.
Brita 2	Também denominada pedra de lastro utilizada nas ferrovias
Brita 3	Produto destinado a obras de drenagem, como drenos sépticos e fossas
Rachão	Fabricação de muros de contenção e bases.
Brita reciclada	Em base e sub-base, pisos, pátios, galpões e estradas

Fonte: KULAIF, Yara (2001).

4.4. Características técnicas

O mercado de resíduos sólidos, assim como muitos outros, vem sendo regulado através de instrumentos legais. Desde a Resolução 307 do Conama de 2002, que classifica os resíduos e define responsabilidades aos geradores, outras esferas de regulação também atuam no mercado. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) com diversas normas como a NBR 7211, que fixa as características exigíveis na recepção e produção de agregados, miúdos e graúdos, de origem natural, encontrados fragmentados ou resultantes da britagem de rochas. Há também as NBR 15116/04, que classifica os agregados miúdos e graúdos e aborda os controles tecnológicos da aplicação de concretos não-estruturais, a NBR 7181, que aborda a composição granulométrica e o teor de contaminantes, entre outras.

Neste seguimento são avaliadas algumas características como expansibilidade, energia de compactação, CBR, lavabilidade, porosidade, entre outros fatores relacionados à resistência dos materiais e características mecânicas, que não serão abordados em detalhes neste trabalho.

4.5. Bens substitutos e complementares

- Bens substitutos

Agregados naturais, estes são superiores em qualidade, mais especificamente devido a porosidade dos reciclados, que reduz sua densidade, bem como sua resistência mecânica à compressão.

- Bens complementares

Cimento, água e todos os materiais usados no processo de construção.

4.6. Estrutura de mercado e comercialização

No Brasil, existiam, em 2002, 11 usinas de reciclagem municipais (LEVY, 2002). Esse número cresceu e hoje em 2013 existem cerca de 200 (ABRECON, 2013), muitas associadas à Associação Brasileira de Indústrias Recicladoras de RCD – ABRECON, criada em 2011. Considerando-se um índice médio de geração per capita de RCD de 500 kg/habitante por ano (ÂNGULO, 2005), estima-se uma geração na ordem de 80 milhões de toneladas/ano de RCD para uma população urbana de 160 milhões de pessoas no Brasil, segundo censo do IBGE de 2010.

As escalas de produção das usinas nacionais ainda são pequenas, tipicamente menos que 100 toneladas de RCD processado por dia. Assim, a reciclagem do RCD é ainda quase insignificante diante do montante gerado.

Entretanto, com a publicação do CONAMA, em 5 de Julho de 2002 e com o novo marco regulatório de 2010, vem mudando a situação. A resolução decreta que todos os municípios brasileiros são obrigados a planejar e implementarem estratégias de gerenciamento sustentável de resíduos de construção.

- Características das usinas de reciclagem:
 - Tamanho das Unidades

O equipamento que define a capacidade das usinas é o britador. No mercado existem britadores de diferentes características e capacidades de processamento, normalmente de 20t/h, 30t/h, 50t/h e outros de 100t/h. No Brasil, a produção média nos centros de reciclagem, segundo as 14 usinas analisadas por Nunes (2004) era em 2003 em torno de **208t/dia**. A produção serve apenas como referência para o tamanho da unidade, que pode ocupar um terreno de até 20.000m².

- Concentração Geográfica

No Brasil, as usinas se concentram principalmente na região sudeste, sendo São Paulo o estado com a maior concentração (Nunes, 2004) e onde encontram-se as usinas de maior capacidade. Nesse mercado de agregados o custo de transporte limita o alcance das usinas, que só atendem regiões localizadas dentro de um raio que varia de 30 a 50km da usina.

4.7. Oferta de agregados reciclados

Como dito no tópico anterior, o que define a capacidade da usina de reciclagem é o britador. A partir da capacidade diária média de 208 toneladas (ou aproximadamente 60.000 t/ano, considerado 24 dias de operação ao mês) e das quantidades de usinas existentes desde 2001 é possível analisar a evolução da oferta dos agregados reciclados como um todo no território brasileiro conforme a tabela abaixo:

Tabela 2 - Dados históricos da oferta de agregados reciclados no Brasil

Ano	Número aproximado de	Capacidade (10^5
	Usinas de reciclagem*	t/ano)**
2002	11	6,6
2003	15	9,0
2004	25	15,0
2005	30	18,0
2006	35	21,0
2007	40	24,0
2008	45	27,0
2009	50	30,0
2010	80	48,0
2011	130	78,0
2012	180	108,0

*Número estimado a partir de entrevistas com a ABRECON.

**Adotou-se uma produtividade de 60 mil t/a por usina, com capacidade de 208t/dia.

Pode-se notar um crescimento da oferta desde 2002 com a resolução 307, que foi mais acelerado a partir de 2010, ano da lei 12.305 da PNRS. Esses valores incluem tanto usinas públicas como privadas. Muitas se encontram em implantação ainda, outras inativas. Segundo dados da ABRECON, das 143 usinas listadas em 2010, 100 eram localizadas na região Sudeste, 59 estavam ativas, 62 em implantação e 22 inativas.

Considerando a geração de 80 milhões de toneladas por ano e a capacidade média de uma usina reciclar 60.000 toneladas por ano, estima-se que um número mínimo de usinas no país deveria ser na ordem de 1300. Segundo ABRECON, em 2013 estima-se que só haja 200 usinas no país.

4.8. Insumos

Os insumos para a produção de brita reciclada são os próprios resíduos de construção e demolição. Uma vez que os investimentos foram realizados em equipamentos como os britadores, peneiras, alimentadores, terreno, mão de obra, manutenção, o processo de

separação não exige matéria prima específica além do RCD, apenas combustíveis e eletricidade para os equipamentos funcionarem.

4.9. Consumo de Agregados

O setor público é o grande consumidor de agregados para pavimentação, com um consumo de cerca de 50 milhões de toneladas por ano. Só a pavimentação é capaz de absorver em torno de 50% da massa total do RCD. O restante, cerca de 330 milhões de toneladas de agregados, é consumido pelo setor privado, sendo majoritariamente empregado em concretos e argamassas. Um gráfico como a Figura 2 ilustra o consumo de agregados por setor.

Se todo o RCD classe A for reciclado como agregados e destinado a esse mercado, apenas 20% dos agregados naturais serão substituídos por reciclados. Ou seja, o consumo de agregados reciclados ainda é incipiente, havendo muito espaço para crescimento da oferta.

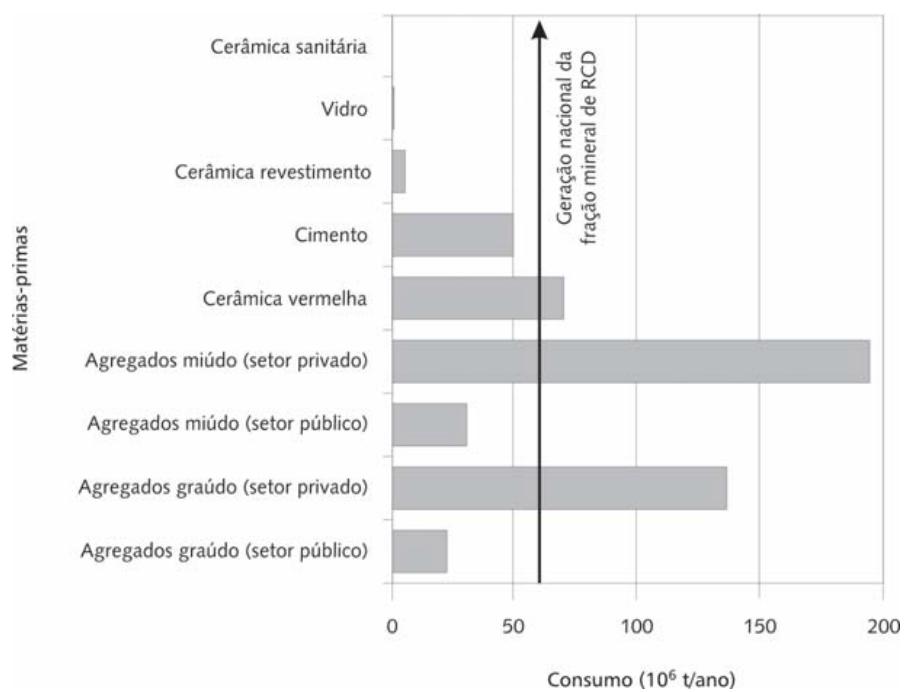


Figura 2 - Consumo brasileiro de agregados por setor e de matérias-primas para a indústria do cimento e cerâmica. A seta vertical indica a estimativa de geração de RCD no Brasil.

FONTE: A PARTIR DE KULAIF, 2001; WHITAKER, 2001; TANNO; MOTA, 2000

Por isso, de modo a agregar valores a projeções de oferta de agregados reciclados, foi realizada um confronto com a análise do consumo apenas de brita natural nos últimos anos desde 2001. Segundo o Sumário Mineral Brasileiro e a Associação Nacional das

Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil (ANEpac), o consumo de brita vem mantendo a média entre 0,9 e 1 tonelada per capita por ano desde 2002. No Sistema de Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira – IBRAM – podem ser acessadas algumas informações como a evolução do consumo de brita no país.

A tabela abaixo resume o consumo de brita natural desde 2001 até 2012:

Tabela 3 - Consumo brita natural no Brasil

Ano	Consumo (10^6 t/ano)
2001	160
2002	165
2003	170
2004	187
2005	196
2006	212
2007	231
2008	252
2009	264
2010	267
2011	278
2012	289

Fonte: Anepac

Pela dificuldade de obtenção de dados mais recentes em relação ao consumo de Brita Reciclada, foi feita uma análise considerando-se o crescimento do mercado de Brita Natural. Para se chegar em uma boa estimativa para o atual consumo, considerou-se que em 20% dos casos o consumo de brita reciclada poderia substituir o de natural integralmente. Observando-se a ordem de grandeza de 10^5 t/ano para a Brita Reciclada e 10^6 t/ano para a Brita Natural, o crescimento do mercado de Brita Natural foi tomado como referência para a projeção de crescimento de Brita Reciclada, chegando-se aos seguintes dados de consumo atual:

Tabela 4 - Consumo brita reciclada estimado no Brasil

Ano	Consumo (10^5 t/ano)
2001	476
2002	474
2003	422
2004	467
2005	450
2006	497
2007	542
2008	550
2009	585
2010	600
2011	605
2012	637

Fonte: os autores

Esses dados serão utilizados para as projeções no tópico seguinte.

5. Projeções

A partir destes dados foram elaboradas as 5 etapas a seguir a fim de avaliar o confronto entre a oferta e demanda de agregados reciclados:

5.1. Seleção das variáveis economicamente relevantes

Como um bem de consumo intermediário, a produção de agregados reciclados está relacionada à produção dos setores que o consomem, sendo o de construção civil o principal.

Como o objetivo é estimar a demanda para os próximos anos, um dado fundamental é o quanto é consumido anualmente, ou seja, a Tabela do Consumo de agregados reciclados (em 10^5 t/ano).

Portanto as variáveis consideradas relevantes foram:

- a) Ano em questão
- b) Consumo anual nacional de agregados naturais
- c) Produto Interno Bruto
- d) População

5.2. Determinação das possíveis funções de demanda

Com as variáveis escolhidas montamos a tabela a seguir considerando dados dos últimos 10 anos:

Tabela 5 - Variáveis dependentes

Consumo (10^5 t/ano)	Ano	PIB (R\$$10^6$bilhões)	População Urbana(10^3hab.)
476	2001	1.184,0	90.161,9
474	2002	1.320,0	92.763,5
422	2003	1.556,0	95.435,1
467	2004	1.769,0	98.690,2
450	2005	2.148,0	101.432,6
497	2006	2.370,0	104.243,3
542	2007	2.558,0	107.145,2
550	2008	3.032,0	109.378,56
585	2009	3.143,0	112.063,89
600	2010	3.675,0	114.749,23
605	2011	4.143,0	117.434,56
637	2012	4.403,0	120.119,90

Anteriormente à analise de regressão linear, é interessante saber o índice de correlação entre o consumo e suas variáveis dependentes, a fim de saber se há sentido em fazer a regressão linear. A tabela com os respectivos valores encontra-se abaixo:

Tabela 6 - Índices de correlação

Variável	Índice de Correlação
PIB	87%
População	92%

5.3. Estimativa econométrica das funções e seleção da mais adequada

Uma das metodologias utilizadas para previsão de demanda é a Regressão Linear a partir dos mínimos múltiplos quadrados, onde dois dos parâmetros de verificação da confiabilidade da projeção são o R^2 e o Valor F.

A partir das análises feitas, estatisticamente aplicando a Regressão Linear, obtiveram-se as seguintes funções das projeções de consumo nacional(Y):

Tabela 7 – Regressões para a projeção de consumo de agregados reciclados

Fatores Analisados	Fórmula via Regressão linear ou múltipla	R ²	Valor F
Ano (X)	$Y = 17,940*X - 35.472,3$	84,5%	54,54
PIB (X)	$Y = 0,062*X + 368,4$	86,11%	62,00
População (X)	$Y = 0,0066*X - 164,36$	83,9%	52,23
PIB (X) e População (Z)	$Y = 0,066*X - 0,0007*Z + 425,25$	86,13%	27,94

5.4. Projeção da demanda para os próximos cinco anos

A partir das funções acima mostradas e dos fatores considerados, percebe-se que a segunda equação $Y = 0,062*X + 368,4$, que considera apenas o PIB, apresenta o coeficiente de correlação R^2 semelhante à última equação, só que com Valor F bem superior. Logo, esta foi escolhida para a projeção do Consumo.

Logo, antes de estimar a demanda para os agregados reciclados, é preciso ainda estimar o PIB e a população para os próximos 5 anos.

Para a projeção da População a partir dos anos foi encontrada a fórmula linear $Y = 2.728,61 * \text{Ano} - 5.369.670,04$ com um R^2 de 99,9%.

Já para a projeção do PIB a fórmula encontrada foi: $Y=298,5 * \text{Ano} - 596.247,6$ com um R^2 de 98,4%.

Logo para os próximos 5 anos teremos a partir dessas fórmulas os seguintes valores para a Demanda:

Tabela 8 - Projeções variáveis dependentes

Ano	População Urbana(10^3 hab.)	PIB((R\$ 10^6 bilhões)	Consumo (10^5 t)
2013	123.021,89	4.548,39	650,4
2014	125.750,5	4.846,85	668,9
2015	128.479,11	5.145,31	687,4
2016	131.207,72	5.443,77	705,9
2017	133.936,33	5.742,23	724,4

5.5. Projeção do confronto entre oferta e demanda

Um dado importante é o de oferta, mencionado na Tabela da Capacidade cuja projeção para os próximos 5 anos foi feita levando em consideração uma perspectiva de crescimento percebido desde 2010 anualmente devido ao marco regulatório. Logo foi considerado um projeção polinomial a partir de 2009 para as projeções de oferta e obteve-se a seguinte equação: $Y(\text{Oferta}) = 3 * (\text{Ano}-2009)^2 + 11,4 * (\text{Ano}-2009) + 15$, obtendo-se um R^2 de 99,8%.

Juntando esses dados com os de consumo, monta-se as projeções para os próximos 5 anos como mostrado na Tabela 9 e na Figura 3:

Tabela 9 - Confronto Oferta x Consumo de agregados reciclados.

Ano	Oferta (10^5	Consumo(10^5	Diferença (Oferta -
	t/ano)	t/ano)	Demand)
2013	147	650,4	-503,4
2014	191,4	668,9	-477,5
2015	241,8	687,4	-445,6
2016	298,2	705,9	-407,7
2017	360,6	724,4	-363,8

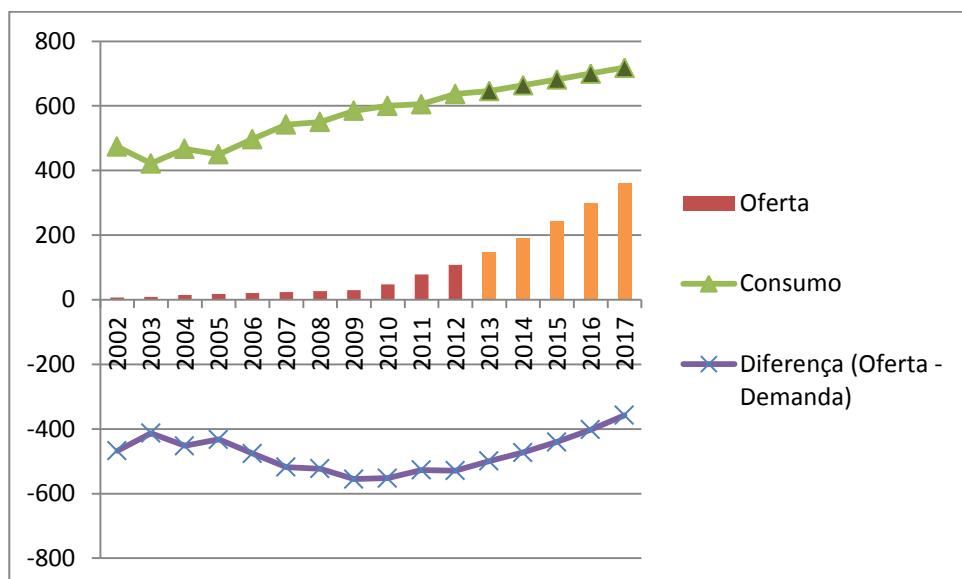


Figura 3 - Projeções de consumo e oferta de agregados reciclados entre 2013 e 2017.

Com as análises das projeções feitas para os próximos 5 anos, percebe-se que ainda há uma diferença muito grande entre a capacidade atual das usinas e a quantidade demandada. Neste intervalo de 5 anos a Demanda por brita reciclada é crescente, e ainda muito maior que a capacidade das usinas de reciclagem. Percebe-se a necessidade iminente de um aumento da capacidade instalada, já iniciada a partir dos novos marcos regulatórios. Pode-se concluir neste primeiro capítulo que do ponto de vista da análise de oferta-demanda, é interessante tanto investir em novas plantas, como aumentar a capacidade das usinas já existentes, tendo em vista a crescente demanda pelos reciclados dos agregados da construção civil, principalmente após o marco legal de 2010 com a Política Nacional dos Resíduos Sólidos. É preciso ainda fundamentar esta decisão com estudos de viabilidade técnica e econômica, que serão realizados no próximo capítulo.

CAPÍTULO 2 – SISTEMAS DINÂMICOS

O conceito de sistemas dinâmicos (DS) foi introduzido por Jay Forrester em 1958 no MIT. Baseado no System Thinking, DS permite analisar o comportamento e inter-relações das variáveis de um sistema de maneira dinâmica. Possui uma natureza qualitativa (soft) e quantitativa (hard), que, respectivamente, identificam relações circulares de causa-efeito e desenvolvem modelos de simulação. Dessa forma, DS podem ser usados para compreender melhor o comportamento dos sistemas e identificar a melhor maneira de operá-lo.

Através do princípio de causa-efeito em função do tempo e das experimentações virtuais é possível identificar os impactos de certas decisões no sistema.

Há variáveis que se comportam como estoques, fluxos, conectores e conversores, ilustrados na Figura 4. Os estoques representam os acúmulos no sistema, cuja variação depende dos fluxos de entrada e de saída, caso existentes, representados pelas válvulas. Os conversores são usados para auxiliar nas equações que determinam as relações entre as variáveis, que precisam estar conectadas através dos conectores (as setas) simbolizando as relações de causa-efeito.

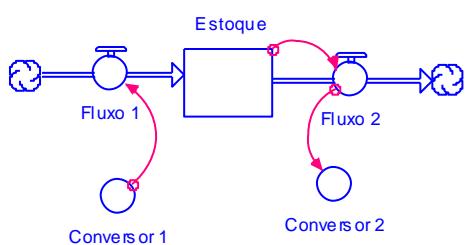


Figura 4 - elementos básicos na modelagem de sistemas dinâmicos.

Fonte: o autor

O software iThink é uma ferramenta para estruturação de processos ou estratégias associadas dinamicamente, muito aplicável no setor de construção. Possui uma interface de simples compreensão. Na condição de software de modelagem dinâmica, possibilita a criação de ciclos “virtuosos” ou “viciosos” para o sistema, bem como o uso de gráficos para

acompanhamento dos valores das variáveis, bastante utilizados como ferramentas para simulação de cenários desejados.

A metodologia da modelagem dos sistemas segue cinco etapas segundo Yuan et al. (2010), representadas pela Figura 5.

1. A primeira etapa consiste em definir o objetivo, na escolha dos fatores relevantes, dos limites da abordagem, do horizonte de planejamento e do comportamento esperado do sistema.
2. Desenvolver uma hipótese dinâmica a partir dos ciclos de feedback e dos elementos básicos.
3. Simulação do modelo.
4. Testes e avaliação do resultado. Testar a viabilidade da estrutura do modelo. Essa etapa é importante para avaliar a sensibilidade e o nível de esforço para tornar as variáveis mais precisas.

Ao atingir maior confiança no modelo, o desenho do modelo e as análises de cenários pelos gráficos serão a última etapa.

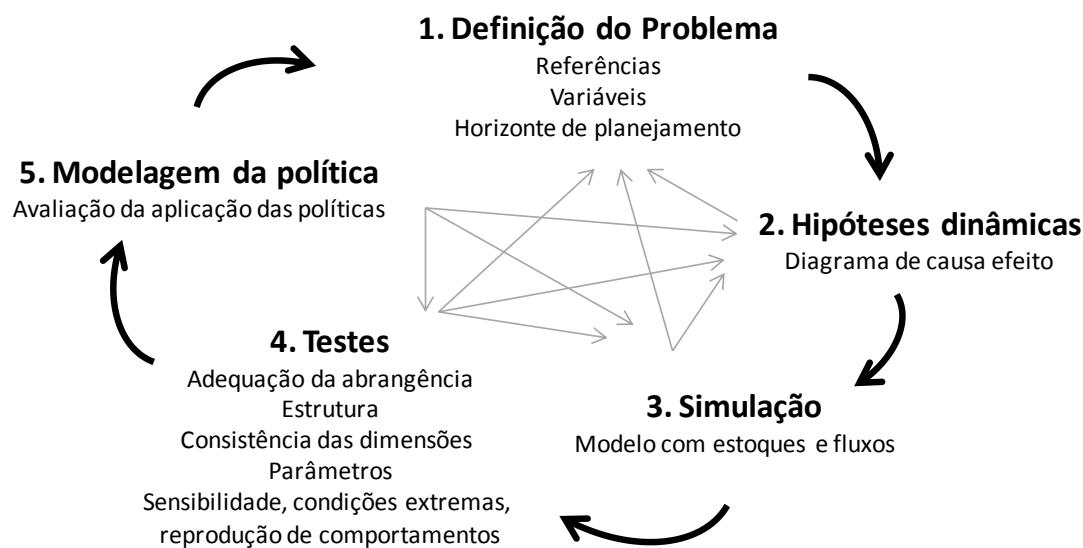


Figura 5 - modelagem como um processo interativo.

Fonte: adaptado de Yuan et al. (2010)

Seguindo essa metodologia, foram realizadas duas aplicações de modelagem de sistemas dinâmicos para compreender melhor o ciclo de vida do RCD e as diferentes operações nas plantas de reciclagem, mostrados nos próximos tópicos.

6. Premissas consideradas

Este tópico tem como objetivos estabelecer as premissas básicas consideradas nas interrelações no gerenciamento de RCD. Foram propostos dois modelos baseados em Sistema Dinâmico através do software de simulação *iThink* que permitem analisar a complexidade da cadeia de gerenciamento de RCD em seu ciclo de vida (modelo de custo benefício) bem como sua viabilidade econômica, o tipo de planta mais adequado considerando a composição do RCD da cidade (modelo de viabilidade).

Segundo Duran et al. (2006) a fim de incentivar a reciclagem aos geradores e estimular a formação de mercado de reciclado, duas esferas devem ser consideradas e representadas esquematicamente na Figura 6. A primeira é a esfera dos consumidores de agregados, sejam eles construtoras, reparadoras ou Prefeitura. De acordo com os custos de aquisição envolvidos na compra de agregados como transporte e preço de venda da tonelada, os consumidores optarão por agregados naturais ou reciclados; já a segunda esfera é a dos geradores de resíduos como empresas de demolição e os próprios consumidores citados, que optarão pelo descarte dos resíduos em plantas de reciclagem ou em aterros sanitários, de acordo com os custos envolvidos.

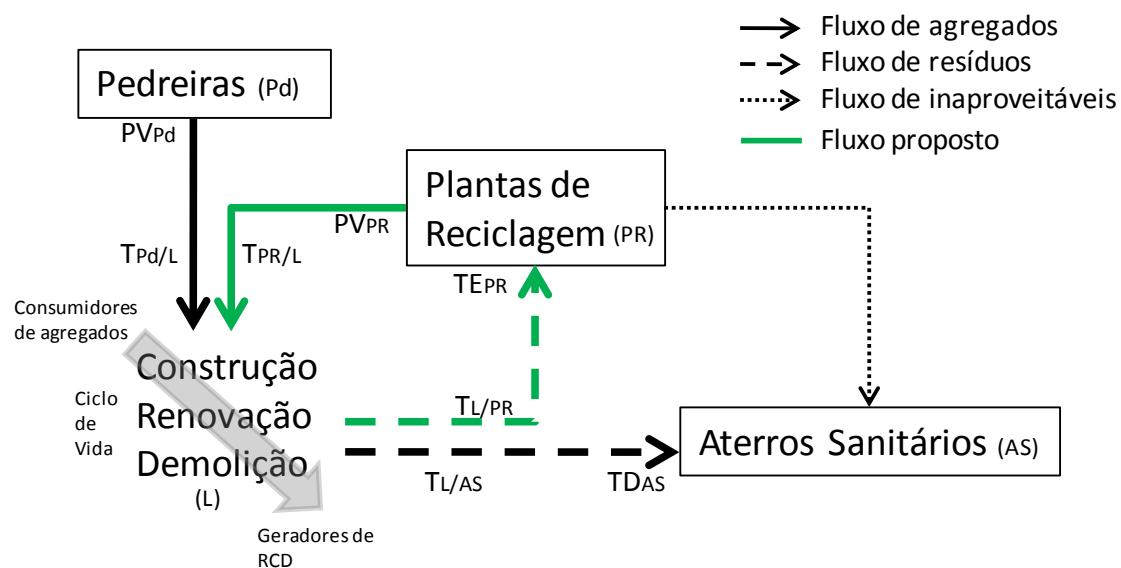


Figura 6 - Ciclo simplificado de consumo e descarte de agregados na construção civil.

PVPd – Preço de venda após extração/beneficiamento de 1t de agregados nas Pedreiras

PVPR – Preço de venda após beneficiamento de 1t de agregados reciclados na Planta de Reciclagem

TPd/L – Custo de transporte de 1t da Pedreira para o local de construção ou renovação

TPR/L – Custo de transporte de 1t de reciclados da PR para o local de construção ou renovação

TL/PR – Custo de transporte de 1t de entulho de L para o PR

TL/AS – Custo de transporte de 1t de entulho de L para o AS

TEPR – Taxa de entrada por tonelada descartada na Planta de Reciclagem

TDAS – Taxa de descarte por tonelada descartada no Aterro Sanitário

Considerando que as especificações técnicas do agregado reciclado para determinada operação atendem aos mesmos requisitos que as do agregado natural equivalente, o único fator que os consumidores terão de comparar é o custo de aquisição (custo unitário da tonelada e o custo do transporte da tonelada até o local de operação) e optar pelo que cobrar o menor preço final. Por isso os custos em uma Planta de Reciclagem devem ser menores do que os de uma Pedreira (Eq. 1)

$$(1) \text{ PVPR} + \text{TPR/L} < \text{PVPd} + \text{TPd/L}$$

Já os geradores de resíduos deverão comparar os custos de descarte na PR com os custos de depósitos em aterros. Somados o custo de transporte à planta com a taxa de depósito, este resultado deve ser menor do que os preços cobrados pelos aterros (Eq 2).

$$(2) \quad TL/PR + TEPR < TL/AS + TDAS$$

Essas equações são importantes, pois um modelo de sistema dinâmico assume alguns pressupostos e hipóteses de causa e efeito entre as variáveis analisadas. Em cada sistema é preciso estabelecer como são essas interrelações para definir o escopo da questão a ser analisada. Diante disso, nos dois modelos foram consideradas as seguintes condições:

Custo de transporte. Como as distâncias entre as fontes geradoras de RCD para os centros de reciclagem e aterros sanitários variam muito dentro da cidade, foi considerado que as distâncias seriam as mesmas (30km), assim como os custos com transporte ($1,00 \text{ R\$/km} \times 30\text{km/t} = 30,00\text{R\$/t}$) em ambos os casos para facilitar as análises. Ou seja, $TPd/L = TPR/L = TL/PR = TL/AS$. Por isso, a taxa de entrada na planta de reciclagem deverá ser menor do que a taxa de entrada no aterro. Nos dois modelos foi considerada R\$1,00 a diferença. Ou seja, se a taxa de entrada no aterro for de R\$6,00/t, isso significa que a taxa de entrada na planta de reciclagem é R\$5,00/t.

Nesse ponto é importante a atuação de políticas que controlem e mantenham o preço de entrada nos aterros elevados ao máximo para incentivar a reciclagem, mas não tanto que influenciem o descarte ilegal. Essa dinâmica e relação de causa-efeito entre o preço e a ilegalidade serão tratadas mais adiante.

Horizonte de planejamento. Foram coletados dados da construção civil e plantas de reciclagem em cidades no Brasil e no mundo. Foram estudados para um horizonte de 20 anos compreendido entre 2012 até 2032.

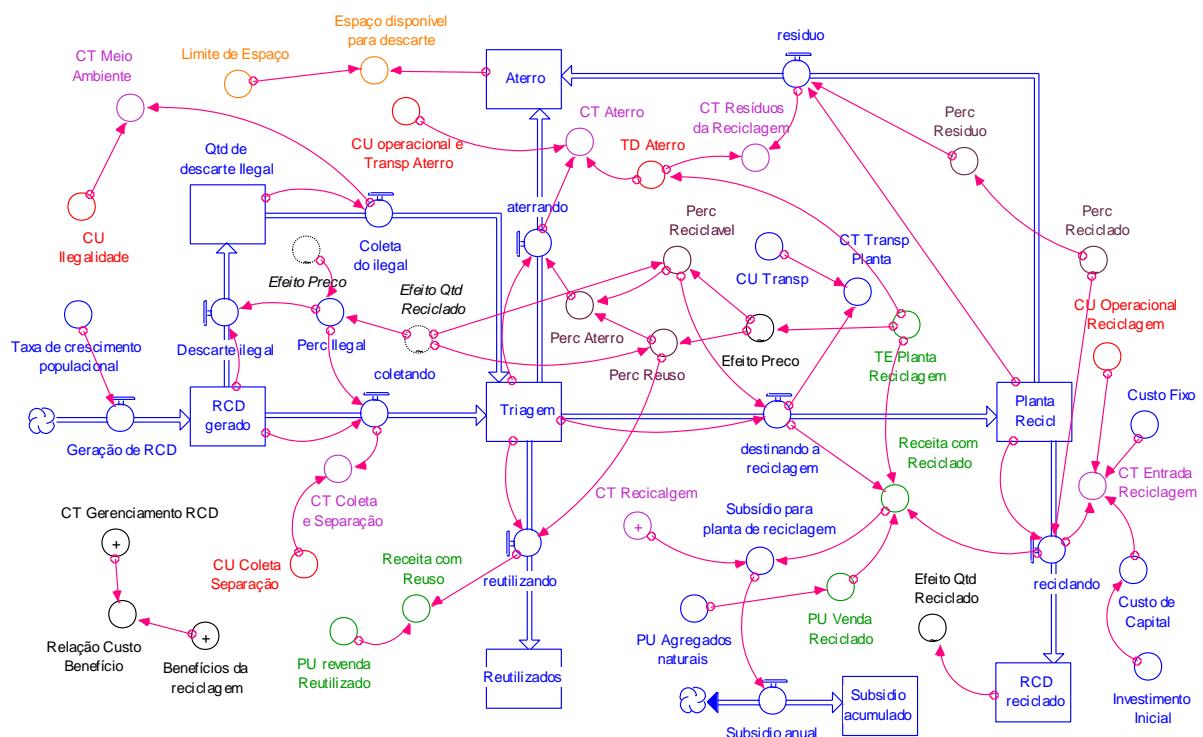
Receitas. Os preços de venda dos agregados reciclados ainda são limitados pela insegurança a respeito da sua qualidade técnica e formação de um novo mercado. Por isso, são vendidos a 70% do preço dos equivalentes naturais.

Aumento de preço ao longo dos anos. Foi considerado que todos os preços seguirão uma média de crescimento gradiente de 1% ao ano do seu valor. Ou seja, tanto os preços de venda de agregados naturais e reciclados como custos unitários operacionais fixos e variáveis aumentarão nessa proporção, simbolizando a inflação.

7. Modelo de Análise do Custo-Benefício

O gerenciamento dos resíduos compreende um conjunto de atividades desde a redução da geração do RCD, sua coleta, seu reuso, reciclagem e o descarte, que apresentam custos determinados para cada fluxo bem como para a armazenagem destes materiais.

O objetivo deste tópico é desenvolver um modelo baseado em Sistemas Dinâmicos que demonstre estas inter-relações e complexidade das atividades do gerenciamento de RCD, bem como uma análise do custo-benefício entre três diferentes cenários de preço de entrada na planta de reciclagem que possibilitem a melhor viabilidade econômica destes projetos. Foi utilizada primeiramente a cidade de Macaé como base pois onde foram realizados os experimentos já descritos neste trabalho. Posteriormente serão comparados os resultados com as outras duas cidades. A estrutura do modelo é representada na Figura 7.



CU	Custo Unitário (R\$/t)
Perc	Percentual (%)
TD	Taxa de Descarte(R\$/t)
TE	Taxa de Entrada (R\$/t)
CT	Custo Total (R\$)
PU	Preço Unitário (R\$/t)

Figura 7 - Modelo Dinâmico 1 para análise de Custo-Benefício da reciclagem nas cidades

Variáveis analisadas

Para a análise foram consultados dados operacionais e financeiros relativos a plantas de reciclagem e construtoras no Brasil, principalmente nas cidades de Americana, em São Paulo e Macaé, no Rio de Janeiro. Em Americana foi consultada a empresa SOLOS Reciclagem da Construção¹. Foi realizada também uma revisão bibliográfica sobre análises de custo-benefício e modelagens dinâmicas no setor de reciclagem, principalmente na China, que serão citados ao longo do trabalho.

Neste modelo foram considerados quatro fases do gerenciamento do RCD:

1. Geração do resíduo na cidade;
2. Coleta, separação e classificação do RCD;
3. Reuso e Reciclagem;
4. Destinação final do RCD.

Geração de RCD

A quantidade de RCD gerada em uma cidade é uma variável difícil de ser medida. Estudos como PINTO, 1999 feitos com amostragens em diferentes cidades, mostrou uma taxa de geração média anual de RCD no Brasil de cada cidade de 0,5t/hab.ano. Essa referência também é utilizada por Müller para mostrar que a taxa de geração em cada país pode estar relacionada com a sua densidade populacional (hab/km²), de acordo com a Figura 8.

¹ A Solos foi visitada em diferentes períodos do trabalho. Essa empresa pertence à construtora Cemara de Americana –SP. Sua razão social antes era Cemara Pró Ambiental.

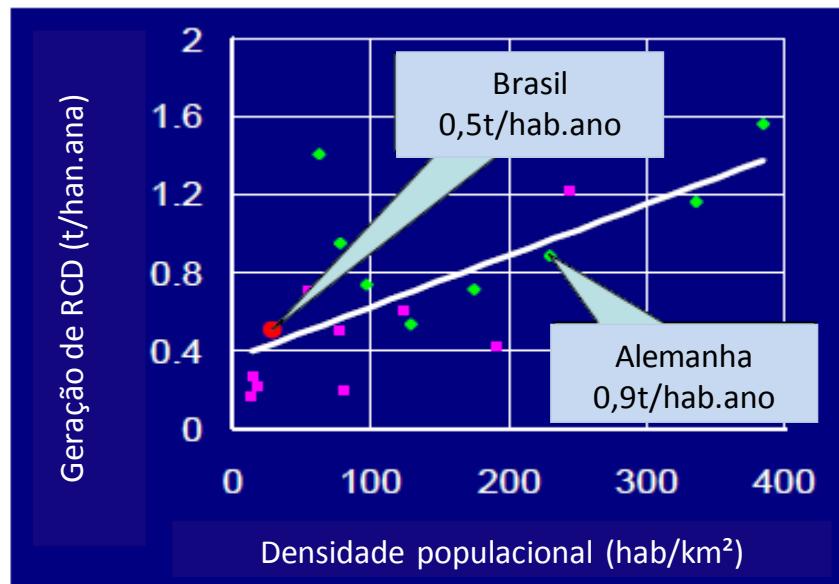


Figura 8 - Densidade populacional como a maior influência na quantidade de RCD gerada em cada região.

Fonte: Muller (2012)

Na cidade de Macaé, com 206 mil habitantes e uma área de 1.200 km² (IBGE, 2011) ou aproximadamente 170hab/km², estima-se pelo gráfico de Muller uma geração de 0,8t/hab.ano ou 160 mil toneladas por ano. Já pelo padrão de Pinto, este número seria 100 mil toneladas por ano. Quando em cidades muito populosas como em São Paulo, este número estimado pela densidade populacional se torna muito elevado, destoando da realidade.

O número de habitantes nesta cidade duplicou nos últimos 20 anos, com uma maior aceleração nos últimos 5 anos, de 4% com relação ao anterior. Devido às condições locais de investimento no setor de petróleo e urbanização da região, estimou-se manter essa taxa de crescimento e chegar a 350 mil habitantes em 2032, aumentando a demanda por residências e construções para a ampliação da cidade. Por isso, foi definida para as simulações uma média de crescimento populacional simples de 3% ao ano sobre a geração inicial de 100mil toneladas de resíduos por ano.

Além disso, como o Brasil no período analisado passará por grandes eventos internacionais como Olimpíadas, Copa do Mundo e programas de desenvolvimento econômico como o PAC 1, PAC 2 ou Minha Casa Minha Vida, essa taxa condiz com o crescimento do índice nacional da construção civil com média de 8,6% anuais desde 2002 (FGV).

Coleta e Separação do RCD

Em grande parte das cidades no Brasil os resíduos gerados de construções, reformas e demolições são coletados *in loco* da geração e transportados para centros de triagem onde serão separados segundo suas composições, uso e destino de cada resíduo. Este processo envolve, portanto, custos de coleta, separação e transporte.

Reuso e reciclagem do RCD

Após a coleta e classificação nos centros de triagem, os resíduos triados podem interessar algumas empresas que desejam reutilizá-los ou ainda necessitarem ser processados em plantas de reciclagem para atingir melhores características para diferentes utilizações. Tanto o reuso direto como a reciclagem representam a logística reversa da construção civil, com custos em suas etapas. No primeiro caso, para efeitos de simplificação, os consumidores dos resíduos que serão reutilizados serão os responsáveis por arcar com os custos de transporte ou mesmo reutilizar no próprio local onde houve geração de RCD.

Outra parte do RCD é destinada à planta de reciclagem, onde haverá o custo operacional de reciclagem, de descarte de resíduos do processo nos aterros, transporte, bem como os custos de capital, variável esta que depende do capital inicial investido (aquisição do terreno, licenças, equipamentos envolvidos, construção da planta e outros).

Destinação final do RCD

Popularmente conhecidos como “lixões”, os aterros² atualmente no Brasil representam o destino mais comum do RCD. Os custos envolvidos no processo de descarte no aterro, tanto a partir da triagem ou a partir da reciclagem, são a taxa de entrada no aterro, custo de transporte e o de operação do aterro. Além disso, um importante fator a ser considerado é o seu espaço disponível para descarte, uma vez que há um volume de ocupação máximo e no caso de se atingir a saturação, obriga-se serem feitas novas aquisições de terrenos pelas municipalidades, aumentando os gastos públicos. Para este modelo foi considerada uma ocupação de um aterro com capacidade máxima de 800 mil toneladas, tamanho de um aterro de médio porte.

² Existem 3 tipos de aterro: aterro sanitário, aterro controlado e os “lixões”. Neste caso a referência é feita aos lixões.

Acontece que nem tudo é coletado e destinado corretamente. Uma parte do RCD gerado é descartada ilegalmente na malha urbana das cidades. Além de retrabalhos operacionais para recolher esses resíduos depois pelas empresas de coleta, com maiores custos logísticos, há impactos tanto sociais como ambientais proporcionados pela poluição visual, agressão ao meio ambiente e possibilidade de ocorrência de focos de vetores de doenças como a dengue.

Por isso, o descarte ilegal é bastante custoso. Este é o custo da ilegalidade ou do recolhimento do RCD depositado na malha urbana, que, segundo a Companhia de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro (Comlurb), pode ser estimado hoje em 70,00 R\$/t no município do Rio.

Apesar de no Brasil essa ilegalidade ser “tolerada”, em países europeus, por exemplo, são cobradas multas às empresas que forem flagradas descartando em locais não autorizados. Isso mostra a diferença no nível de sustentabilidade promovido entre os países.

Também segundo a Comlurb, o motivo da ilegalidade é o elevado custo do descarte legal dos resíduos. No Brasil esse descarte é feito nos aterros públicos, onde a taxa de entrada cobrada pode chegar a até 20,00 R\$/t. Ou seja, essa taxa é considerada a principal influência na proporção que será descartada ilegalmente, ou, quanto menor o preço, tanto no aterro como nas recicladoras, mais apto estarão os geradores a descartar de maneira legal, sendo menor a proporção descartada ilegalmente, seguindo uma relação de acordo com a Figura 9.

Tanto o percentual de descarte ilegal quanto os percentuais que serão levados aos três destinos são influenciados pelos valores da taxa de entrada na planta de reciclagem e pelo volume de RCD sendo reciclado, de maneira que quanto mais é reciclado na cidade e/ou menor o valor da taxa de entrada cobrada, mais estímulo outros geradores terão para reciclar seus resíduos e coletá-los corretamente. Essa relação de causa efeito é representada conforme mostrado na Figura 9.

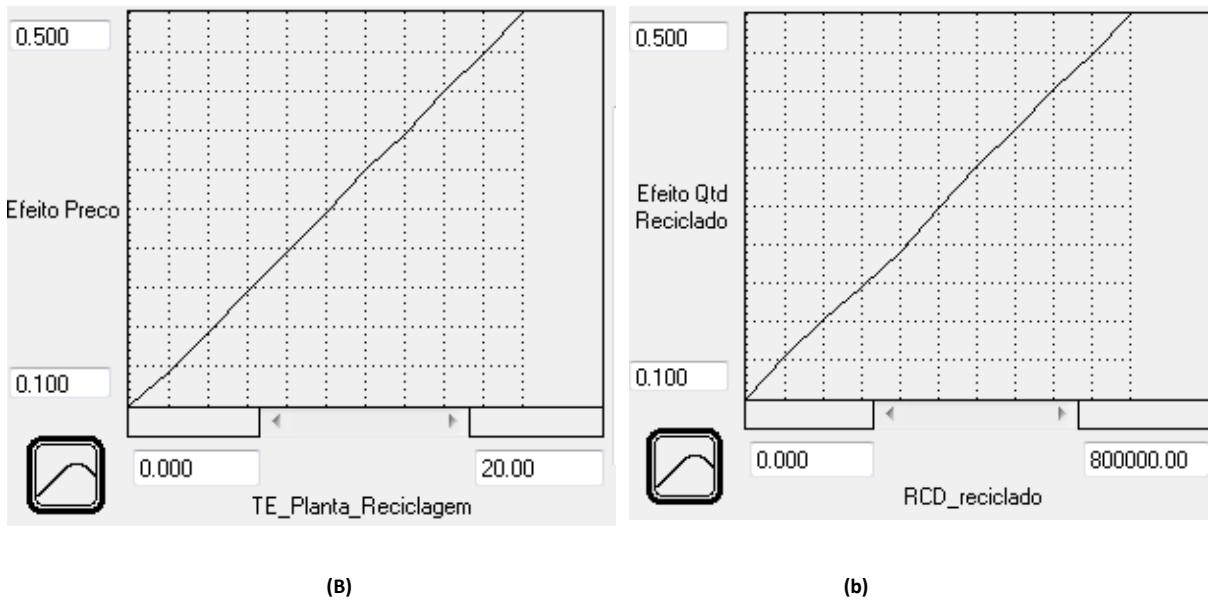


Figura 9 - Efeito do preço cobrado na entrada (a) e da quantidade que é reciclada (b) sobre os percentuais.

Para cada valor da taxa de entrada na planta ou no volume de RCD reciclado haverá um valor do efeito do preço e da quantidade sendo reciclada. A combinação dos dois valores dos efeitos causa o impacto geral nos percentuais, equacionados a partir das estimativas das relações de causa efeitos após coleta dos dados de entrevistas e visitas a plantas no Brasil e com maiores detalhes da justificativa de seus valores no Apêndice A, mostrados nas equações a seguir:

$$\text{Perc reciclavel} = 0.7 * (1 - (\exp(-20/\text{efeito_preco}) * (\text{efeito_qtd_reciclado} - 0.1) * 0.13)) / (1.7 * (1 - \text{efeito_preco}/2)))$$

O percentual *de reuso* é considerado também proporcional ao preço cobrado na entrada da planta e o volume de RCD reciclado. Quanto maior o preço, menos estímulos haverá para reciclar, sendo mais barato reutilizar o RCD gerado. Isso é mostrado na equação a seguir, que também combina os dois efeitos:

$$\text{Perc reuso} = \text{efeito_preco}/3 + 0.01/\text{efeito_qtd_reciclado}$$

O destino do restante será o aterro sanitário cuja equação é, portanto:

$$\text{Perc aterro} = 1 - (\text{perc reuso} + \text{perc reciclavel})$$

As *receitas geradas* na planta de reciclagem são provenientes de duas fontes: a taxa de entrada cobrada na chegada da caçamba e a venda dos materiais reciclados. Dependendo do cenário das condições de cada cidade, a receita total não será suficiente para cobrir os custos operacionais e de capital, sendo necessário um subsídio para zerar o balanço. Como as plantas para este modelo foram projetadas sem fins lucrativos, o subsídio será a diferença entre o custo e a receita e será financiado pelo governo.

Portanto o *custo total de gerenciamento do RCD* pode ser representado como a soma dos custos totais de coleta, classificação e separação, de aterro, de reciclagem, de ilegalidade e do subsídio à reciclagem. Sua equação é representada a seguir:

$$CT\ Gerenciamento\ RCD =$$

$$[CT\ Coleta\ e\ Separação + CT\ Aterro + CU\ Operacional\ Reciclagem * reciclando + TE\ Planta\ Reciclagem * destinando\ a\ reciclagem + CT\ Resíduos\ da\ Reciclagem + Subsídio\ para\ planta\ de\ reciclagem]$$

7.1. Os benefícios do gerenciamento do RCD

Já os benefícios são representados como a soma das economias proporcionadas pelo descarte nas plantas de reciclagem, com o que será deixado de comprar de agregado natural bem como as receitas geradas com a reciclagem e reuso. É representada na fórmula:

$$Benefícios\ da\ reciclagem =$$

$$[(destinando\ a\ reciclagem\ +\ reutilizando)\ * (TD\ Aterro\ -\ TE\ Planta\ Reciclagem)\ + (reciclando\ +\ reutilizando)\ * PU\ Agregados\ naturais\ +\ Receita\ com\ Reciclado\ + Receita\ com\ Reuso]$$

Análise de custo-benefício

É a diferença entre os benefícios e custos de se gerenciar e controlar o RCD gerado na cidade. É a variável do modelo que mostrará se é válido promover e incentivar a reciclagem na cidade ou não, tanto no ponto de vista do governo, que arca com os custos de infraestrutura dos aterros, suas operações e compra de agregados para novas construções, como dos geradores, que pagam pelo descarte do RCD e também pelos agregados. Ambos sairão ganhando quando maior for a relação custo benefício.

Tabela 10 - Resumo das premissas consideradas para o modelo 1.

Dados de entrada		Unidade	Valores	Obs
Do sistema	Abreviatura			
Taxa de geração de RCD	Geração de RCD	t/ano	função	inicial de 100mil
Limite de espaço no aterro	Limite de espaço	t	800000	fixo nos 20 anos
Taxa de crescimento	-	%/ano	função	média de 3%
Preço de revenda de reutilizados	PU revenda Reutilizados	R\$/t	10->13	aumento nos 20 anos
Preço dos agregados naturais	PU agregados naturais	R\$/t	30->36	aumento nos 20 anos
Preço de venda de reciclados	PU venda reciclados	R\$/t	função	70% do valor dos naturais
Taxa de descarte no aterro	TD Aterro	R\$/t	função	TD Plant Rec +1
Investimento Inicial	-	R\$	5,2milhões	terreno+equip+construção
Taxa de entrada na Planta de Recic.	TE Planta Reciclagem	R\$/t	variável	em análise
Proporções				
de ilegalidade	Perc ilegal	%	função	combinação dos 2 efeitos
destinado ao aterro	Perc aterro	%	função	1-pec aterro-perc reciclável
reutilizado	perc reuso	%	função	combinação dos 2 efeitos
reciclável	perc reciclável	%	função	combinação dos 2 efeitos
reciclado	perc reciclado	%	85->95	aumento nos 20 anos
Custos Unitários				
Ilegalidade(Meio Ambiente)	CU Ilegalidade	R\$/t	50->70	aumento nos 20 anos
Coleta e Separação	CU Coleta e Separação	R\$/t	7->9	aumento nos 20 anos
Reciclagem(Operacional variável)	CU Operacional Reciclagem	R\$/t	9->11	aumento nos 20 anos
Reciclagem(Operacional Fixo)	Custo Fixo	R\$/t	500->550mil	aumento nos 20 anos
Aterro	CU Operacional Aterro	R\$/t	5->7	aumento nos 20 anos
Reciclagem(Capital)	Custo de capital	R\$/ano	453.360	Pgto anual do Inv.Inic. a 6%aa

Fonte: entrevistas e visitas técnicas.

Para garantir maior realidade e dinâmica ao sistema, foram considerados aumentos dos preços ao longo dos 20 anos, explicados pelo aumento da inflação, aumento salarial, que aumentam os custos operacionais. Esse aumento é representado na coluna *Valores* através da seta de transição entre os valores. Por exemplo, para o custo unitário de ilegalidade (CU Ilegalidade) foi estimado um aumento de 2% ao ano, passando de R\$50,00/t no ano de 2012 para R\$70,00/t em 2032.

7.2. Cenários considerados

Os cenários propostos a seguir são baseados no motivo considerado principal para a falta de estímulo ao descarte de RCD em áreas de reciclagem, que é justamente o custo que o descarte representa aos geradores através das taxas de entrada cobrada nos aterros. Portanto, os seguintes cenários foram considerados com a inserção da planta de reciclagem como outra possibilidade de destino do RCD:

- Cenário 1: Não é cobrada taxa de entrada na planta de reciclagem.
- Cenário 2: Taxa de entrada na planta de reciclagem constante de 5,00 R\$/t.

- Cenário 3: Taxa de entrada na planta de reciclagem constante de 10,00 R\$/t.
- Cenário 4: Taxa de entrada na planta de reciclagem constante de 15,00 R\$/t.
- Cenário 5: Taxa de entrada na planta de reciclagem constante de 20,00 R\$/t.

7.3. Resultados

Depois de simulados os cenários, foram gerados quatro gráficos que evidenciam suas diferenças e os resultados entre, o espaço disponível para descarte, custo total ao meio ambiente, a quantidade acumulada de subsídio ao longo dos 20 anos e a relação custo-benefício.

A Figura 10 ilustra o impacto da variação de preços de entrada na planta sobre a ocupação dos aterros. Percebe-se que quanto menor o preço cobrado na entrada dos resíduos mais tempo será necessário para que o aterro atinja sua lotação. Isso pode ser explicado pelo estímulo máximo aos geradores em recicarem seus resíduos. Além de não se pagar nada pelo descarte, maior será a quantidade sendo coletada corretamente e reciclada no município, o que incentiva ainda mais outros geradores a fazerem o mesmo. Neste caso de Macaé o espaço considerado não seria suficiente para os 20 anos, o que aumentaria os custos do governo para aquisição de novos terrenos.

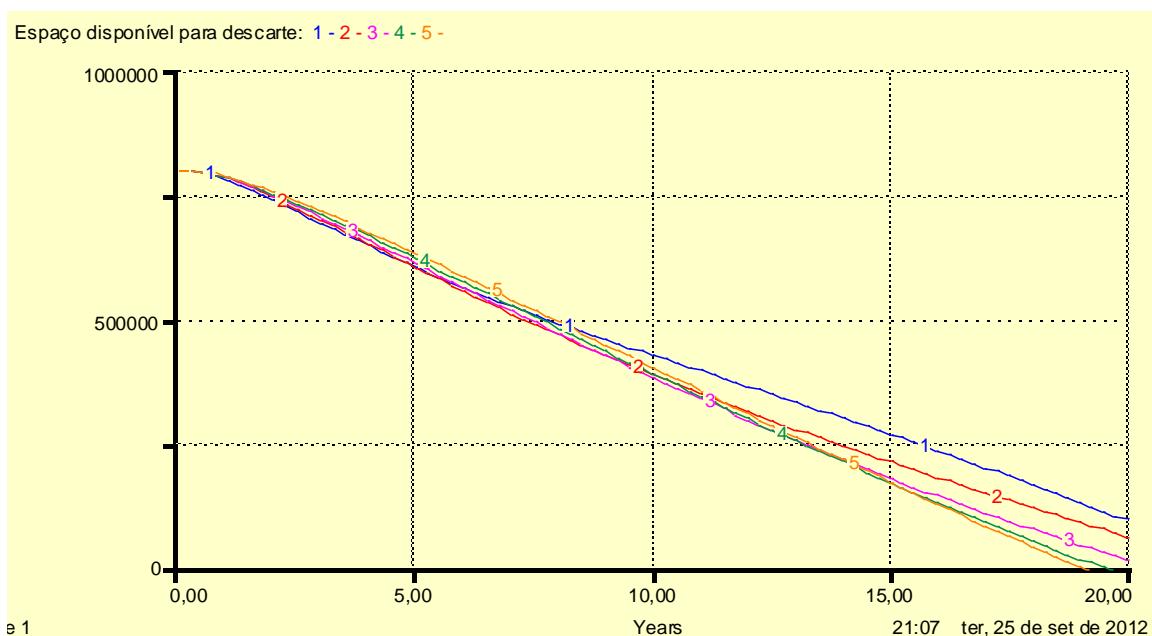


Figura 10 - Resultado simulado do espaço disponível para descarte para cada cenário na cidade de macaé

Na Figura 11 percebe-se que o custo ao meio ambiente, proporcional ao nível de ilegalidade de cada ano, será maior quanto maior o preço, como já era de se esperar. Isso pode ser explicado pelos efeitos dos preços e da quantidade reciclada. Além disso, fica claro que não basta apenas o estímulo do preço e da quantidade sendo reciclada. Por mais que o percentual de ilegal diminua ao longo do tempo, essa redução será sobre um volume de RCD gerado, que é cada vez maior, elevando o custo total a cada ano. Somente quando a taxa de entra na planta é muito baixa que o custo da ilegalidade será menor do que hoje em dia. Ou seja, outros incentivos serão necessários para continuar reduzindo os custos com o recolhimento da ilegalidade.

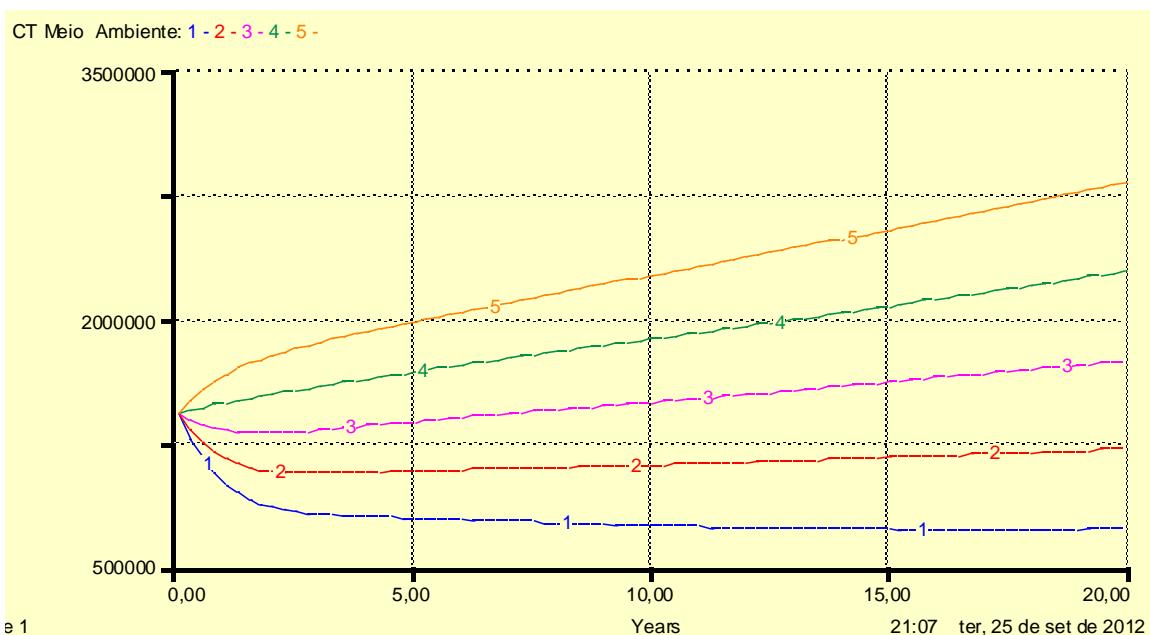


Figura 11 - Resultado simulado do Custo Total ao meio ambiente com a ilegalidade para cada cenário considerado na cidade de Macaé

Outra conclusão foi relativa à quantidade total de subsídio que a planta recicladora precisará para cobrir seus custos, visto na Figura 12, que ilustra a quantidade de subsídio recebida desde o ano zero. O menos custoso para o serviço público de limpeza, portanto, é o cenário 4, com a taxa de R\$15,00/t.

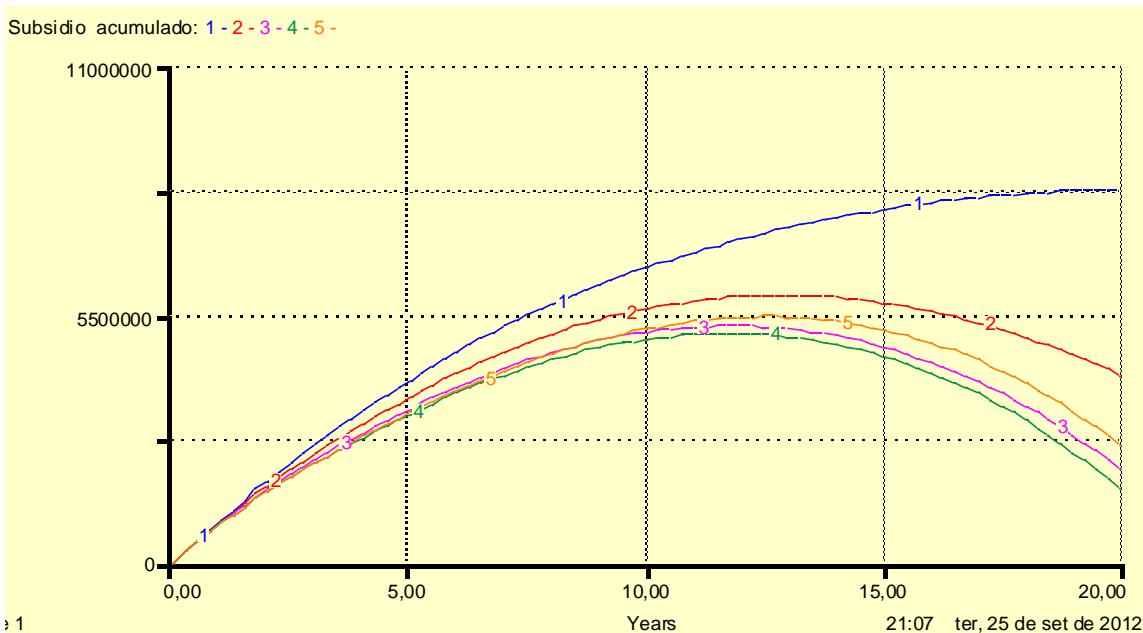


Figura 12 - Resultado simulado do valor acumulado de subsídio nos três cenários considerados para Macaé.

Percebe-se que, a partir do décimo segundo ano, haverá declínio nas curvas de subsídios. Isso acontece devido ao estímulo cada vez maior à reciclagem com o aumento da quantidade sendo reciclada na cidade. Nesta fase, a planta atinge o máximo de subsídio recebido e começará a gerar mais receita do que custos, devendo na prática retornar a diferença ao governo. Cada cenário acumulará os subsídios recebidos ao longo dos 20 anos conforme a Tabela 11.

Tabela 11 - Valores aproximados dos subsídios para cada cenário

Taxa de Entrada	Cenário	Máximo de Subsídio Atingido	Subsídio acumulado final
R\$0,00/t	1	R\$ 10 100 000,00	R\$ 8 200 000,00
R\$5,00/t	2	R\$ 7 100 000,00	R\$ 4 200 000,00
R\$10,00/t	3	R\$ 6 300 000,00	R\$ 2 100 000,00
R\$15,00/t	4	R\$ 6 130 000,00	R\$ 1 600 000,00
R\$20,00/t	5	R\$ 6 510 000,00	R\$ 2 600 000,00

Conclui-se pela Figura 13 - Resultado simulado da Relação Custo Benefício para cada cenário da taxa de entrada na planta de reciclagemFigura 13 que, independentemente do preço cobrado, haverá sempre uma relação custo benefício positiva e crescente. Ou seja, os benefícios gerados são

mais quantitativos do que os custos gerados com a reciclagem. Este é um indicador de que a reciclagem deve ser estimulada.

Percebe-se que inicialmente quanto mais barato for para descartar os resíduos nas plantas de reciclagem, melhores são os benefícios. Só que no longo prazo as receitas geradas são mais significativas, bem como o nível de ilegalidade proporcional ao preço cobrado. Levando isso tudo em consideração, o cenário 3 é o que proporciona maiores benefícios por conta principalmente da maior receita gerada com o percentual que é destinado corretamente e que é reciclado.

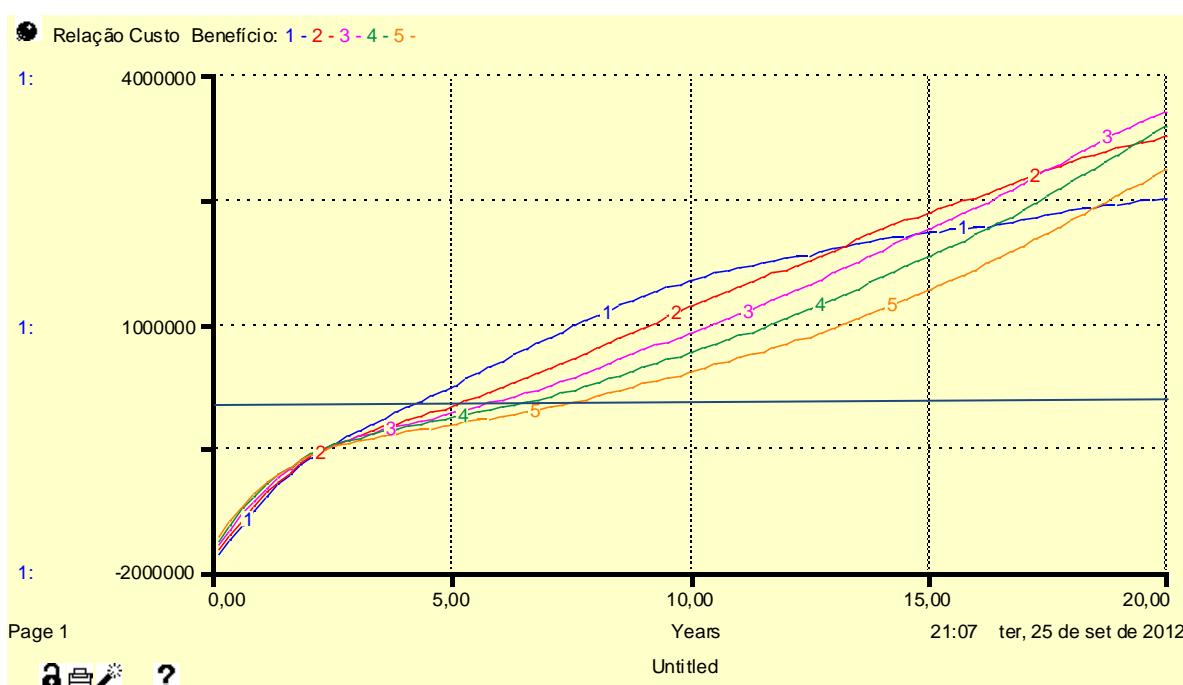


Figura 13 - Resultado simulado da Relação Custo Benefício para cada cenário da taxa de entrada na planta de reciclagem em Macaé.(1-5,00R\$/t; 2-10,00R\$/t, 3-5,00R\$/t)

Trata-se de um longo período de tempo para se pagar o investimento bem como uma elevada quantia a ser desembolsada em subsídios se comparada ao investimento inicial de 5 milhões de reais. A diferença nas curvas de subsídios pode ser explicada pelo maior percentual reciclado e menor ilegalidade conforme a taxa de entrada cobrada é mais baixa, mas em contrapartida é gerada uma menor receita para a planta. Portanto, o cenário 3 apresenta melhor custo benefício do que o cenário 4 mas é o que necessita de mais subsídios do Serviço Público. Já a uma taxa de 10,00 R\$/t haverá maior quantidade de subsídio, mas em contra partida haverá menor custo ao meio ambiente diante da menor quantidade que será

descartada ilegalmente se comparada com o cenário 4 de 15,00R\$/t. Por isso, o cenário onde a taxa de entrada na planta de reciclagem seja de 10,00 R\$/t é o mais recomendado para a cidade de Macaé. E diante da nova política de resíduos sólidos (Lei 12305 de 2010), será ainda necessário equacionar a maneira como a indústria da construção civil arcará com esses subsídios, visto que a política do poluidor-pagador é um princípio desta lei.

7.4. Comparativo entre as três cidades analisadas

Depois de aplicar o modelo 1 na cidade de Macaé, o mesmo modelo foi levemente adaptado para que fosse possível estudar os comportamentos nas outras duas cidades analisadas neste trabalho (São Paulo e Maceió) e comparar os efeitos e resultados. Dessa maneira será possível verificar a melhor relação de custo benefício, o volume de subsídio, bem como os impactos nos aterros e ao meio ambiente em cada cidade.

Para isso, foram necessárias modificações nos dados de entrada do modelo, visto que são três realidades bem diferentes, tanto do ponto de vista econômico, cultural como também político. Ou seja, não só os custos envolvidos nos processos, mas também os incentivos históricos para a reciclagem em cada cidade são diferentes.

Assim como em Macaé, foram pesquisados dados operacionais como custos de equipamentos, de terreno, dados das populações, expectativa de crescimento, preços dos agregados naturais, dos reutilizados e seus percentuais em cada cidade. Foi possível observar, como já era de se esperar, que São Paulo por ser a maior cidade é também a que possui custos mais elevados, pagando-se mais pela mão de obra, pelos bens de produção, tornando os processos mais caros.

Outro ponto a destacar é a quantidade de RCD gerada em cada cidade e o quanto efetivamente será reciclado deste total ao longo dos vinte anos. Com relação ao tamanho da região de São Paulo analisada, foi considerado apenas o raio onde a população tinha alguma relação com o RCD amostrado, sendo estimada em 600 mil habitantes, o que equivaleria a 300mil toneladas de RCD gerada ao ano. Pelos dados históricos fornecidos do IBGE percebeu-se que o tamanho da população tanto de Maceió como em São Paulo encontra-se em fase já de desaceleração de crescimento. Por isso foi estimado um crescimento anual de apenas 1%, diferente dos 3% ao ano considerado em Macaé.

Tabela 12 - Dados de entrada pesquisados para as três cidades para a aplicação do Modelo 1.

Dados de entrada	Unidade	Macaé	São Paulo	Maceió
Do sistema				
Taxa de geração de RCD	t/ano	100 000	300 000	200 000
Limite de espaço no aterro	t	800 000	800 000	800 000
Taxa de crescimento	%/ano	3%	1%	1%
Preço fração mineral reutilizada	R\$/t	10->13	20->30	8->11
Preço dos agregados naturais	R\$/t	35->41	50->65	25->35
Preço de venda de agregados reciclados	R\$/t	70%	70%	70%
Taxa de descarte no aterro	R\$/t	f	f	f
Investimento Inicial	R\$	5,2milhões	16milhões	4milhões
Quantidade referência reciclada		1500000	2000000	1800000
Custos Unitários				
Operações				
Ilegalidade (Meio Ambiente)	R\$/t	50->70	70->90	40->60
Coleta e Separação	R\$/t	7->9	9->11	4->6
Reciclagem (Operacional variável)	R\$/t	8->10	11->13	7->9
Reciclagem (Operacional Fixo)	R\$/ano	500->550mil	1000->1100	400->450mil
Aterro	R\$/t	5->7	6->8	4->5
Reciclagem (Capital)	R\$/ano	453 360	2 092 243	435 923

Já por ser cidade grande e ao mesmo tempo mais desenvolvida, estimou-se também que a reciclagem em São Paulo seria bem aceita e mais incentivada. Essas estimativas são importantes para a formulação das hipóteses de causa-efeito, por exemplo, no percentual que será reciclado e reutilizado de acordo com os preços e quantidades sendo recicladas (efeito preço e efeito quantidade), sendo necessário modificar os parâmetros das equações sugeridas no caso de Macaé. E esses parâmetros foram escolhidos na tentativa e erro através das simulações até que se chegasse ao comportamento esperado dos percentuais de ilegalidade, de reuso e de reciclagem em função do tempo, sem a preocupação com os resultados finais (volume de subsídio, custo-benefício e os outros). Ou seja, determinada a hipótese de comportamento diante de cada realidade, a cada simulação eram feitas correções nos parâmetros até que se chegasse ao desejado fisicamente, e não financeiramente.

As equações das proporções de RCD que serão descartadas ilegalmente, nos aterros, nas plantas de reciclagem ou mesmo reutilizada são determinadas em função dos valores iniciais pesquisados com as prefeituras e construtoras das cidades bem como as perspectivas de evolução desses percentuais nos 20 anos, considerando a existência das plantas de reciclagem e do quanto é cobrado por tonelada para nela depositarem o RCD. Nesse sentido, as equações mencionadas para cada cidade são mostradas na Tabela 13.

Tabela 13 - Equações dos percentuais determinadas a partir dos valores iniciais pesquisados e expectativas de comportamento nos 20 anos. Fonte: o autor

Percentuais envolvidos	em t=0	Equação para 0<t<20 anos
de ilegalidade		
Macaé	25%	Efeito_Preco/2+0.01/Efeito_Qtd__Reciclado
São Paulo	15%	Efeito_Preco/6+0.01/Efeito_Qtd__Reciclado
Maceió	50%	Efeito_Preco/1+0.02/Efeito_Qtd__Reciclado
de reuso		
Macaé	35%	Efeito_Preco/2+0.02/Efeito_Qtd__Reciclado
São Paulo	15%	Efeito_Preco/3+0.01/Efeito_Qtd__Reciclado
Maceió	15%	Efeito_Preco/3+0.01/Efeito_Qtd__Reciclado
de reciclagem		
Macaé	25%	0.7*(1-(EXP((-20/(Efeito_Preco))*(Efeito_Qtd__Reciclado-0.1))*0.13)/(1.7*(1-Efeito_Preco/2)))
São Paulo	25%	0.7*(1-(EXP((-20/(Efeito_Preco))*(Efeito_Qtd__Reciclado-0.1))*0.13)/(1.7*(1-Efeito_Preco/2)))
Maceió	15%	0.6*(1-(EXP((-20/(Efeito_Preco))*(Efeito_Qtd__Reciclado-0.1))*0.13)/(1.6*(1-Efeito_Preco/2)))

Com essas equações formuladas foi possível simular os três cenários em que a taxa de entrada na planta de reciclagem é fixa em 10,00 R\$/t. Os resultados são representados nas figuras a seguir.

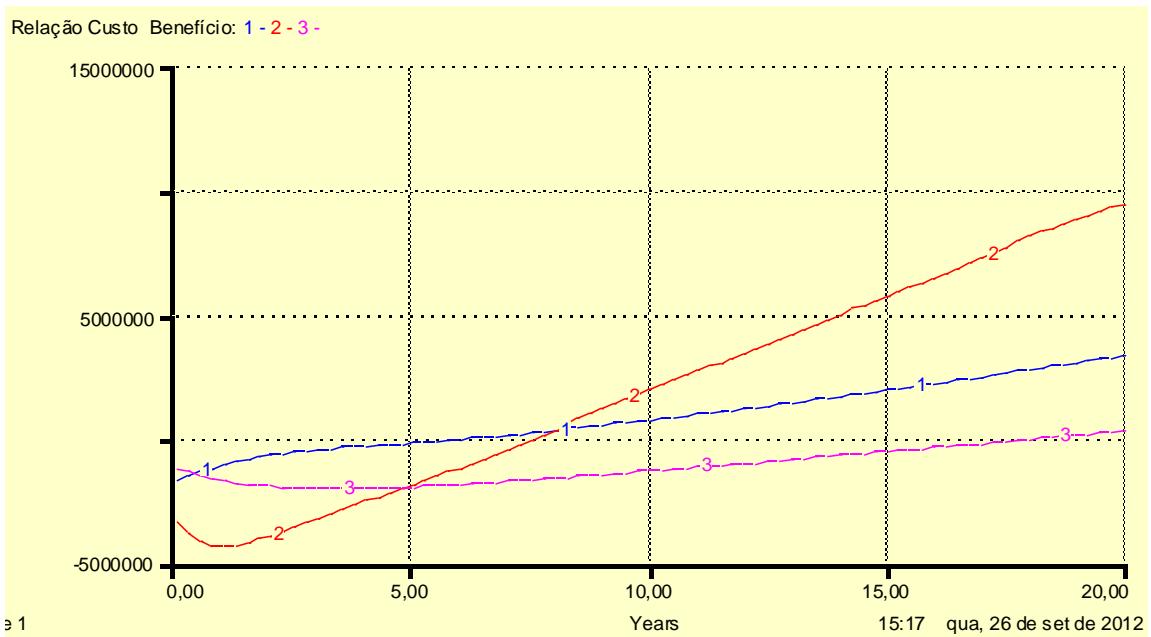


Figura 14 - relação custo-benefício do gerenciamento do rcd para as três cidades. 1-macaé 2-são paulo 3-maceió

Pela Figura 14 percebe-se que a cidade de Macaé é a primeira a apresentar uma relação custo benefício positiva, após 5 anos. São Paulo, apesar de só apresentar uma relação positiva após o sétimo ano, é a que trará maior relação no longo prazo. Nas três cidades estudadas, a existência de plantas de reciclagem e esforços para estabelecer uma política de gerenciamento do RCD traz mais benefícios do que custos no longo prazo. No curto prazo os investimentos são elevados, pesando para uma relação negativa, principalmente para a cidade de Maceió, que só terá uma relação positiva após 17 anos de funcionamento da planta e São Paulo, que diante do elevado investimento inicial de 16 milhões (8milhões de reais cada planta com capacidade 50t/h) já mostra retorno já nos oito anos iniciais.

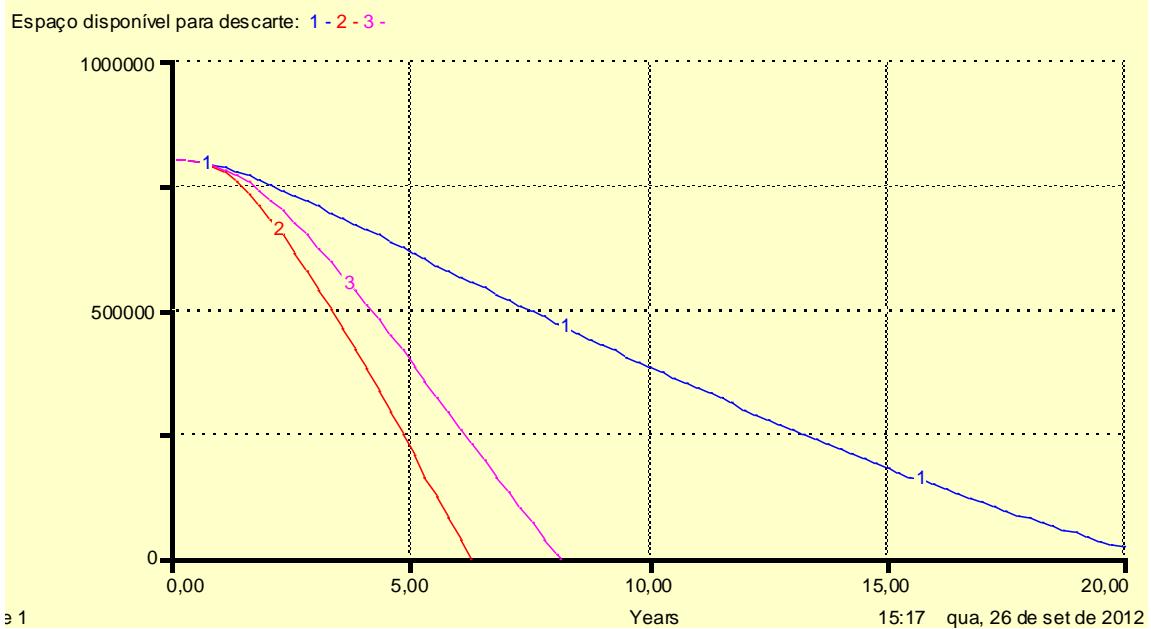


Figura 15 - Ocupação de um aterro virtual com a mesma área para as três cidades.

Na Figura 15 é refletida a necessidade de investigar novas maneiras de desestimular o descarte do RCD nos aterros. Apesar do preço de entrada nas plantas de reciclagem ser o ótimo, é preciso também criar incentivos para que geradores de RCD destinem cada vez mais seus resíduos para as plantas recicladoras ao invés dos aterros. Caso contrário, na região de São Paulo, por exemplo, seria preciso investir a cada 6 anos na aquisição de novas áreas de aterro em regiões cada vez mais urbanizadas, o que onera ainda mais os gastos públicos.

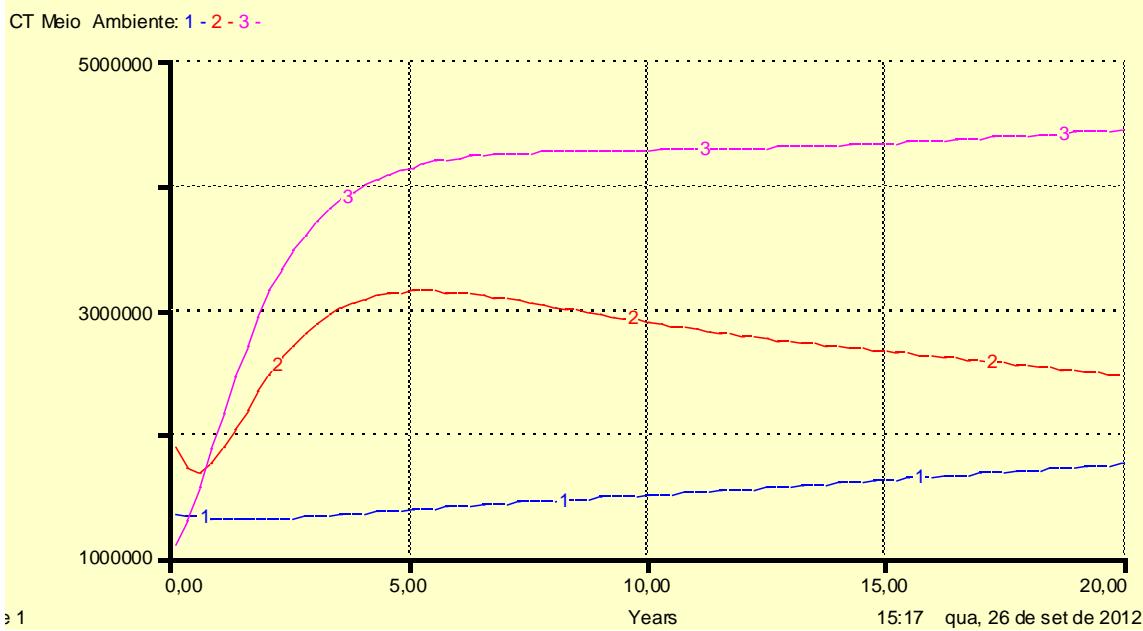


Figura 16 - Custo Total proveniente do descarte ilegal nas malhas urbanas nas três cidades

Pela Figura 16 percebe-se que a inserção das plantas de reciclagem reduz o ritmo atual de crescimento da ilegalidade, uma vez que menos resíduos serão descartados na malha urbana. Em Macaé essa redução não é suficiente para compensar o aumento do volume de RCD gerado com o crescimento mais acelerado da população e do custo unitário da ilegalidade. Isso pode fazer com que Macaé atinja um custo de recolhimento em 20 anos quase equivalente uma região em São Paulo, que possui um custo unitário maior e em maior volume.

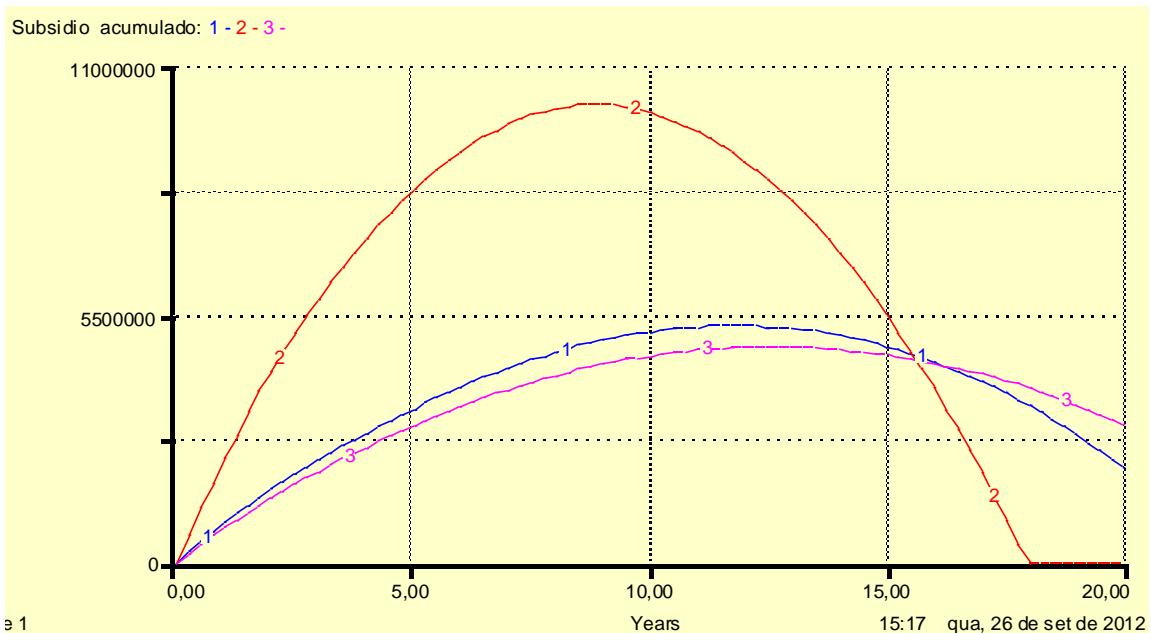


Figura 17 - Subsídio acumulado nas três cidades ao longo dos 20 anos com suas plantas de reciclagem.

A Figura 17 mostra a quantidade de subsídio acumulada desde o início do projeto até o ano em questão. Percebe-se que as três cidades necessitam de subsídios inicialmente para poderem operar com custos superiores às receitas. Essas condições permanecem até um certo ano quando a planta da região consegue gerar mais receitas dos que custos, passando a retornar os subsídios aos municípios.

Tabela 14 - Subsídios acumulados em cada cidade ao longo dos 20 anos.

Cidade	Cenário	Máximo de Subsídio Atingido	Subsídio acumulado final
Macaé	1	R\$ 6 300 000,00	R\$ 2 100 000,00
São Paulo	2	R\$ 7 100 000,00	R\$ 0,00
Maceió	3	R\$ 4 800 000,00	R\$ 3 100 000,00

A única que conseguiria devolver todo o subsídio recebido seria a região de São Paulo. Isso acontece devido ao maior volume processado, que necessita duas plantas de reciclagem, e aos maiores preços dos agregados reciclados. Maceió necessitaria de subsídios de cerca de 3 milhões de reais para viabilizar a reciclagem do RCD na cidade, mesmo após os 20 anos. Mesmo São Paulo só conseguiria pagar os subsídios recebidos a partir do décimo sétimo ano de investimento. Um risco que poucas empresas privadas estariam dispostas a enfrentar.

Por isso no próximo modelo serão mais detalhadas as operações de reciclagem e será identificado como tornar esses empreendimentos mais rentáveis.

8. Modelo de Viabilidade Econômica

O segundo modelo proposto com aplicação de sistemas dinâmicos, diferentemente do primeiro, tem como objetivo avaliar o impacto dos processos operacionais de reciclagem, do tipo de planta escolhidos segundo a qualidade do RCD coletado em cada cidade.

Como visto nesta pesquisa, a composição do RCD gerado possui grande variabilidade entre as cidades. Esta interfere diretamente na qualidade do RCD que será processado para atingir maior valor agregado (com maiores resistências mecânicas para funções estruturais, por exemplo) e, consequentemente, na capacidade de geração de receita para a planta de reciclagem. Ou seja, em uma região cuja composição do RCD possua mais material de boa qualidade (menos contaminantes, maior presença de concretos puros), e opere com circuitos adequados, haverá mais agregados reciclados de boa qualidade.

Dessa maneira, foram estudados três modelos de plantas de reciclagem: uma planta fixa com circuito considerado como o de países emergentes, uma planta fixa com circuito considerado como o de países mais desenvolvidos e uma planta móvel com circuito de emergentes.

8.1. Os circuitos em uma planta de reciclagem fixa

Os resíduos de construção no Brasil, quando levados a centros de processamento da sua fração mineral, passam por diversas etapas:

1. Assim que chegam as caçambas com RCD na planta de reciclagem há uma inspeção visual, com o objetivo de rejeitar caçambas com muitos contaminantes ou materiais muito heterogêneos;
2. Sendo autorizada a entrada, esta caçamba é depositada em um estoque, onde será realizada uma catação manual, separando a fração não mineral como plástico, vidro, madeira, isopor, papel entre outros;

3. A fração mineral é levada por retro escavadeiras ao alimentador, a partir do qual será realizada a etapa de **britagem**, onde haverá a redução do tamanho das partículas;
4. Logo depois há uma **separação magnética** dos metais ferrosos seguidas da **separação granulométrica** através das peneiras.

Esse é o circuito emergente, representado na Figura 18.

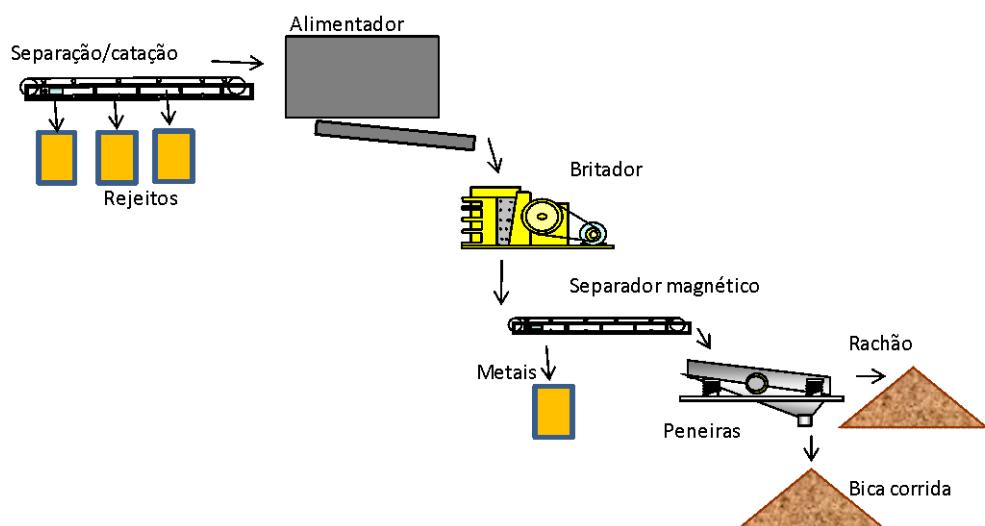


Figura 18 – Circuito simplificado de beneficiamento nas plantas de reciclagem no Brasil.

Os produtos reciclados no Brasil são em sua maioria o rachão, de baixo valor agregado, utilizado principalmente para sub-base para pavimentação e aterros, e a bica corrida, de médio valor agregado, utilizada principalmente como base para pavimentação e concretos não estruturais.

Nas recicladoras de países como Holanda e Alemanha, onde o agregado reciclado é encontrado normalmente nas lojas de material de construção, ainda há as etapas de separação densitária com jigues, espirais, classificadores em espiral e britadores VSI como mostrado na Figura 19. A partir desses circuitos diferenciados são obtidos agregados reciclados de alta qualidade, como areia fina lavada e brita reciclada, de alto valor agregado, utilizadas principalmente na fabricação de argamassa e concretos estruturais, respectivamente. No Brasil o mercado para estes produtos de maior qualidade ainda está em formação.

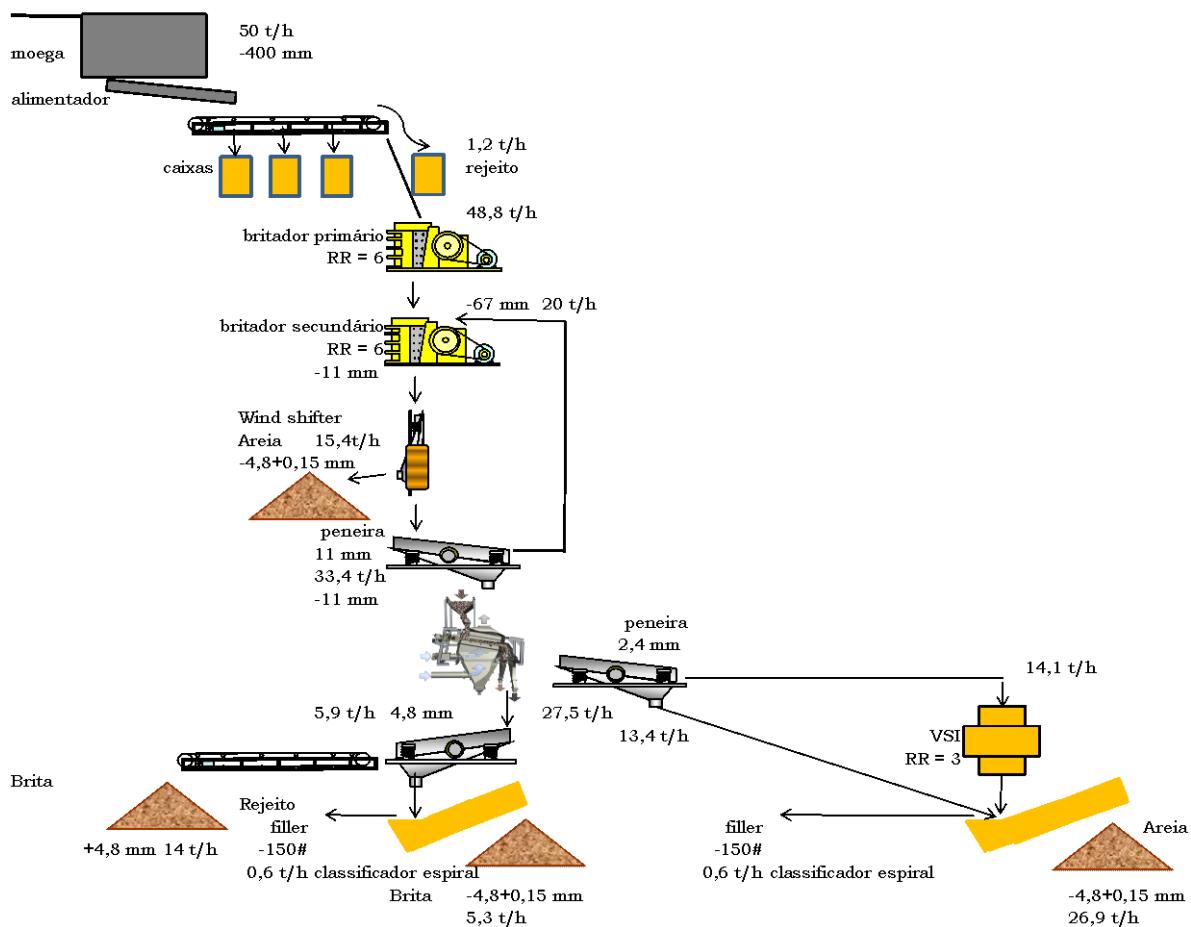


Figura 19 - Circuito maduro simplificado para obtenção de areia e brita reciclada.

8.2. As plantas móveis de reciclagem

As plantas móveis são também consideradas uma opção de investimento. Elas atuam pontualmente ou simultaneamente nas áreas onde haverá grande geração de resíduos, como grandes demolições ou construções. Apesar de ter que deslocar todo o maquinário pelas regiões da cidade, o custo de transporte somado para levar os resíduos até uma planta fixa é elevado, tornando a versão móvel passível de análise. Além disso, como a geração de resíduos é contínua ao longo do ano, não há necessidade de um terreno para alojar os equipamentos, sem custos, portanto, com aquisição de terreno nem com a construção de uma planta.



Figura 20 - Exemplo de planta móvel de reciclagem de RCD.

Fonte: Metso

A planta móvel realiza os mesmos processos encontrados em uma planta fixa de modo que o operador de escavadeira ou de pá-carregadeira consiga controlar toda a operação de britagem. Isso reduz não só os custos como também todo o sistema de carregamento. Assim, uma planta móvel possuirá um menor quadro de funcionários, bem como custos variáveis menores ao longo da operação, visto que os gastos com energia, água e rejeitos são proporcionais à quantidade de resíduo sendo processada na planta.

A partir de questionários, visitas a plantas de reciclagem e empresas de construção no Brasil foi montada a Tabela 15 a seguir com as estimativas de custos operacionais e investimento inicial para cada tipo de planta.

Tabela 15- Estimativa de custos para as versões de plantas de reciclagem estudadas

DADOS	Planta fixa emergente				Planta fixa madura				Planta Móvel			
Capacidade (t/h)	50 ton/h				50 ton/h				30 ton/h			
Capacidade (t/ano)	144000				144000				79200			
Processos Envolvidos	Catação, britagem, peneiramento, separação densitária				Catação, britagem e peneiramento							
Investimento Inicial												
1.Terreno	200 R\$/m ²	15.000 m ²	R\$ 3.000.000,00			R\$ 3.000.000,00			R\$ -			
2.Construção da Planta			R\$ 1.000.000,00			R\$ 1.000.000,00			R\$ -			
3.Equipamentos Envolvidos		qtd			qtd			qtd				
Alimentador Principal	50t/h	1	R\$ 250.000,00	50t/h	1	R\$ 250.000,00	30t/h	1	R\$ 150.000,00			
Esteira de Catação		1	R\$ 100.000,00		1	R\$ 100.000,00		1	R\$ 100.000,00			
Separador Magnético		1	R\$ 150.000,00		1	R\$ 150.000,00		1	R\$ 150.000,00			
Peneiras 3 decks(Screeners)		1	R\$ 150.000,00		1	R\$ 150.000,00		1	R\$ 150.000,00			
Britador de mandíbula	50t/h	1	R\$ 380.000,00	50t/h	1	R\$ 380.000,00	30t/h	1	R\$ 240.000,00			
Britador secundário		-			1	R\$ 450.000,00		-	R\$ -			
Jigue		-	R\$ -		1	R\$ 350.000,00		-	R\$ -			
Britador VSI		-	R\$ -		1	R\$ 220.000,00		-	R\$ -			
Classificador		-	R\$ -		1	R\$ 250.000,00		-	R\$ -			
Peneira 2 decks		-	R\$ -		2	R\$ 200.000,00		-	R\$ -			
Outros			R\$ 180.000,00			R\$ 180.000,00			R\$ 300.000,00			
		Subtotal	R\$ 1.210.000,00			Subtotal	R\$ 2.680.000,00		Subtotal	R\$ 1.090.000,00		
		Total	R\$ 5.210.000,00			Total	R\$ 6.680.000,00		Total	R\$ 1.090.000,00		
Custos Operacionais Mensais												
Fixos												
4. Mão de obra												
Qualificada 3000 R\$/mês		3 func	R\$ 9.000,00		6 func	R\$ 18.000,00		4 func	R\$ 12.000,00			
Não qualificada 1200 R\$/mês		10 func	R\$ 12.000,00		15 func	R\$ 18.000,00		8 func	R\$ 9.600,00			
Gerente 5000 R\$/mês		1 ger	R\$ 5.000,00		1 ger	R\$ 5.000,00		1 ger	R\$ 5.000,00			
5.Terreno			R\$ 5.000,00			R\$ 5.000,00			R\$ -			
		Subtotal	R\$ 31.000,00			Subtotal	R\$ 46.000,00		Subtotal	R\$ 26.600,00		
Variáveis												
6. Energia	0,35 R\$/kWh	150.000 kWh	R\$ 52.500,00	200.000 kWh	R\$ 70.000,00	120.000 kWh	R\$ 42.000,00					
7.Água	1,75 R\$/m ³	3600 m ³	R\$ 6.300,00	3600 m ³	R\$ 6.300,00	1980 m ³	R\$ 3.465,00					
8.Rejeitos	0,30 R\$/t		R\$ 3.600,00		R\$ 3.600,00		R\$ 2.160,00					
9.Manutenção/Desgaste			R\$ 10.000,00		R\$ 15.000,00		R\$ 8.000,00					
10.Transportes			R\$ -		R\$ -		8 x R\$3000,00	R\$ 24.000,00				
11.Outros			R\$ 20.000,00		R\$ 20.000,00		R\$ 15.000,00					
		Subtotal	R\$ 92.400,00		Subtotal	R\$ 114.900,00		Subtotal	R\$ 94.625,00			
		Total	R\$ 123.400,00		Total	R\$ 160.900,00		Total	R\$ 121.225,00			
CU Operacional variável(R\$/t)			R\$ 7,70			R\$ 9,58			R\$ 13,14			

Fonte: Entrevistas a plantas em São Paulo e Macaé e pesquisa de mercado

Segundo Rotter (2007), a escolha do gerador de resíduo em descartar em uma planta fixa ou móvel dependerá da diferença nos custos entre elas, que deve ser comparada com a economia que seria realizada com a diferença de distâncias. Essa decisão é baseada na equação a seguir:

$$|Rcf - Rcm| < Ut \times La$$

Onde Rcf é o custo unitário de reciclagem em uma planta fixa e Rcm, o custo unitário da reciclagem por uma planta móvel. Ut é o custo unitário do transporte e La representa a diferença de distância percorrida.

Com os dados da tabela e sabendo que o custo unitário de transporte é de 0,80 R\$/km, uma planta móvel com custo unitário de 13,14 R\$/t só seria escolhida ao invés de uma planta fixa com 7,70 R\$/t caso a diferença de distância fosse de pelo menos 6,8 km.

Como em muitas cidades grandes as plantas fixas podem ficar em regiões isoladas mas ainda centrais, a escolha entre que tipo de planta adotar dependerá de questões financeiras. Para isso foi realizado um modelo de viabilidade econômica com uso de sistemas dinâmicos. O modelo é representado na Figura 21.

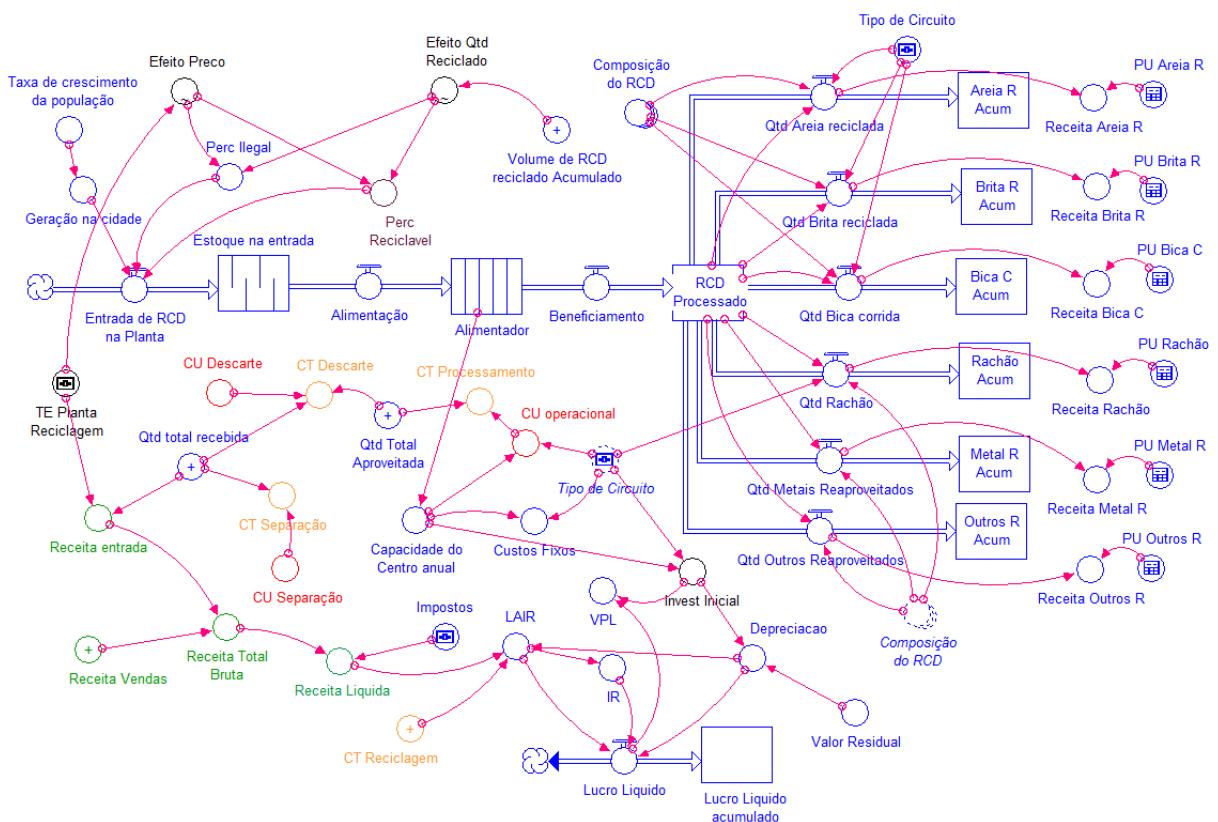


Figura 21 - Modelo dinâmico 2 proposto para análise de viabilidade econômica de usinas de reciclagem.

8.3. Variáveis analisadas

Neste segundo modelo as variáveis estão divididas em dois grupos:

- A) Variáveis de entrada na planta
- B) Variáveis operacionais e financeiras

A) Variáveis de entrada na planta:

Composição do RCD

A composição do RCD que chega à planta é representada pelas proporções de cada material no RCD. Foram divididas em cinco componentes (concreto;; cerâmica; aço e ferro; solos; e outros), que variam de acordo com cada cidade. Para esse estudo foi considerada as proporções das amostras levantadas e mostradas no capítulo 4 (Trabalho experimental), com o critério que a fase concreto é $d > 2,2$ e a outra fase . Essas proporções determinarão assim as quantidades de cada material no RCD que entra em cada planta de reciclagem. Na classe Outros estão inclusos: madeira, plásticos, papel, vidro, isopor e contaminantes (gesso e amianto).

Tabela 16 - Composição dos resíduos nas três cidades analisadas.

	São Paulo	Macaé	Maceió
Alta Qualidade	49%	17%	4%
Média e Baixa Qualidade	51%	83%	96%
Total	100%	100%	100%

Fonte: Lima (2012)

Nesta primeira etapa será aplicado o modelo apenas com a composição da cidade de Macaé. Em uma segunda etapa será comparada a viabilidade a partir das composições e das realidades de cada cidade.

Capacidade de processamento.

As plantas de reciclagem atualmente no Brasil possuem capacidades de processamento variadas. Neste modelo a jornada de trabalho na planta fixa será de 10 h/dia, 24 dias no mês (somados dois sábados no mês) e capacidade de 50 t/h, totalizando 144000 t/ano. Já uma planta móvel operaria também 10 h/dia, só que 22 dias no mês e capacidade de 30 t/h, totalizando 79200 t/ano. Os 22 dias foram considerados partindo do princípio que a planta móvel perde 2 dias para cada mudança de local de operação, que neste modelo será de 8 vezes por ano, ao custo de R\$ 3 000,00 por mudança.

Entrada de RCD na planta

Como visto no modelo anterior, uma parte do resíduo, antes de chegar à planta de reciclagem, é coletada (outra parte é descartada ilegalmente), passa por uma etapa de triagem onde são separados os contaminantes e o que será reutilizado. Dessa maneira, das milhares de toneladas geradas na cidade em um ano, inicialmente apenas uma parte chega à planta de reciclagem. Mesmo assim, ao chegar, é feita uma nova separação. Esse percentual é influenciado tanto pela quantidade sendo reciclada como pelo preço, assim como no modelo anterior, mesmo gráfico. Quanto mais se recicla, maior o efeito, maior o percentual que será reciclado (Figura 9).

Percentuais recicláveis

É o percentual da composição que será efetivamente reciclado. É uma variável que depende da tecnologia dos tipos de equipamentos sendo empregados no circuito. Por exemplo, quanto de concreto que, no circuito emergente, será processado para formar o rachão? E quanto que será processado em bica corrida? Esses valores mudam de acordo com a demanda instantânea de cada planta de reciclagem. Às vezes a demanda por rachão é maior do que brita reciclada, então a decisão será de não processar no jigue, por exemplo. Por isso foram consultadas algumas plantas e profissionais do setor e foi montada a tabela abaixo com uma estimativa dos percentuais de concreto e cerâmica que ao serem processados se transformarão nos produtos listados. Lembrando que em blocos de concretos de demolição, por exemplo, podem existir também metais.

Tabela 17 - Percentuais de concreto e cerâmica que será transformado em cada produto ou rejeitados de acordo com cada circuito, independente da origem do resíduo.

Entrada	Alta Qualidade		Baixa/Média Qualid.	
Circuitos	1	2	1	2
Produtos				
Rachão	25%	5%	23%	8%
Bica Corrida	50%	5%	70%	8%
Brita Reciclada	10%	63%	-	-
Areia Reciclada	5%	20%	-	80%
Metal	5%	5%	2%	2%
Rejeitos	5%	2%	5%	2%
Total	100%	100%	100%	100%

Fonte: Entrevistas com profissionais do setor

Agregados reciclados gerados

Como falado anteriormente, foram considerados dois tipos de circuitos: o maduro ou elaborado (representado pelo número 1 nas equações do modelo) e o emergente ou padrão (2). Em cada tipo de circuito, os produtos formados serão diferentes, com preços de venda diferentes, com custos operacionais (fixos e variáveis) diferentes e por isso precisam estar presentes na modelagem. Por exemplo, a quantidade de bica corrida e areia recicladas formadas são proporcionais aos percentuais de concreto e cerâmica presentes na composição, como mostrado nas equações abaixo baseadas nas proporções acima mencionadas.

$$\begin{aligned}
 Qtd\ Bica\ Corrida = & \\
 \text{if } Tipo\ de\ Circuito = 2 \text{ then } RCD\ Processado * (\text{Composição}\ do\ RCD[Concreto]^{*.05} + \\
 & \text{Composição}\ do\ RCD[Ceramica]^{*.08}) \text{ else } RCD\ Processado * (\text{Composição}\ do\ \\
 & RCD[Concreto]^{*.5} + \text{Composição}\ do\ RCD[Ceramica]^{*.7})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Qtd\ Areia\ Reciclada = & \text{if } Tipo_de_Circuito = 2 \text{ then } \text{Composição}\ do\ RCD[Ceramica]^{*.8} + \\
 & \text{Composição}\ do\ RCD[Concreto]^{*.2}) * RCD\ Processado \text{ else } RCD\ Processado * \text{Composição}\ do\ \\
 & RCD[Concreto]^{*.1}
 \end{aligned}$$

B) Variáveis Operacionais e Financeiras:

Estas variáveis resultarão nos custos e na geração de receitas da planta de reciclagem. As operações financeiras foram referenciadas segundo (Caloba. G.M. et Motta, R.R., 2002).

Custos

Neste modelo o custo total de reciclagem será a soma dos custos variáveis (representados pelos custos marginais) de processamento, classificação (considerado 1,00 R\$/t em todos os casos) e resíduos para descarte nos aterros, considerado em 11,00 R\$/t (considerando a taxa de entrada no aterro). Os custos fixos variam em cada tipo de planta. É a soma dos gastos com funcionários e aluguel do terreno, considerados também na Tabela 15..

Portanto a equação do Custo Total de reciclagem é representada da seguinte maneira:

$$CT\ Reciclagem = CT\ Descarte + CT\ Processamento + CT\ Separação + Custos\ Fixos$$

Receita

Cada agregado possui seu valor médio de mercado, que, multiplicado pela quantidade respectiva reciclada, gerará a receita proveniente do material, como mostrado a seguir com o exemplo do concreto:

$$Receita\ Areia\ R = Qtd_Areia_reciclada * PU_Areia_R$$

O preço unitário de cada material natural varia de acordo com cada região. É importante avaliar as condições locais de mercado, sua localidade, proximidade de rios e praias, pois há casos onde o preço da areia natural ou podas de árvore, por exemplo, possuem um preço unitário mais elevado do que o da bica corrida. Neste modelo foi considerado o preço médio do agregado reciclado no Brasil, cujos valores iniciais nas três cidades estão mostrados na Tabela 18.

Tabela 18 - Tabela de preços médios de venda desses agregados reciclados no brasil

	Preço de Venda do agregado reciclado (R\$/t)		
	Macaé	São Paulo	Maceió
Brita Reciclada	35,00	50,00	25,00
Areia Reciclada	30,00	40,00	20,00
Bica Corrida	25,00	30,00	15,00
Rachão	18,00	20,00	12,00
Metais	20,00	25,00	18,00
Outros	10,00	15,00	8,00

Fonte: Questionários e pesquisa de mercado (2012)

Como no modelo anterior, a receita total bruta será a soma das receitas da venda de cada material reciclado e reaproveitado com a receita gerada da taxa de entrada na planta, fixada em 10,00 R\$/t com base no modelo 1. No caso da planta móvel, a taxa de entrada é cobrada também por tonelada processada.

A receita líquida que entrará no fluxo de caixa é a receita bruta do ano descontada dos impostos (Pis-Cofins e ICMS), que somados são aproximados 20 %.

Lucros

O Lucro antes do Imposto de Renda (LAIR) é a diferença entre a receita líquida e a soma do custo total de reciclagem com a depreciação anual, que é proporcional ao investimento inicial e seu valor residual. Neste setor industrial o valor residual é considerado elevado, em média de 80%.

O lucro líquido, portanto, será o LAIR descontado do Imposto de Renda (IR), fixado em 25% para este setor.

Análise de viabilidade

Segundo Motta, existem três ferramentas mais utilizadas para analisar a viabilidade econômica de um empreendimento: a taxa interna de retorno (TIR), o valor presente líquido (VPL), e payback. Neste software de simulação existem funções financeiras limitadas pré-embarcadas (built-ins), só foi possível analisar o valor presente líquido do investimento ao longo do tempo, cuja fórmula é:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t}$$

Onde FC_t é a variação do fluxo de caixa no ano t (diferença entre receita líquida e custos no ano t) e i é a taxa de juros considerada. No modelo proposto foi considerada como taxa mínima de atratividade (TMA) de 8% ao ano, comparados com a taxa Selic de 9% ao ano em 2012.

A partir dos dados anteriores montou-se o fluxo de caixa no horizonte de 20 anos e determinou-se o VPL em seguida para cada cenário considerado.

8.4. Cenários considerados

No modelo anterior foi visto que os subsídios eram muito próximos para taxas de entrada em 5,00R\$/t e de 10,00 R\$/t. Com a finalidade de avaliar o impacto do tipo de circuito e do tipo de planta na viabilidade da planta de acordo com a composição dos resíduos, foram estudados quatro cenários principais para a cidade de Macaé (RJ), conforme a tabela abaixo.

Tabela 19 - Cenários considerados na simulação do modelo de viabilidade econômica para a cidade de Macaé.

Cenário	Tipo de Planta	Círculo	Taxa de Entrada (R\$/t)
1	Móvel	Emergente	5,00
2	Móvel	Emergente	10,00
3	Fixa	Emergente	10,00
4	Fixa	Maduro	10,00

Fonte: os autores

8.5. Resultados

Os resultados das simulações são mostrados nos dois gráficos abaixo. O primeiro representa o Lucro antes do Imposto de Renda (LAIR) gerado anualmente para cada cenário (Figura 22). É visto que devido a maior escala e maior valor agregado dos produtos, a planta com circuito maduro é a que apresenta maior lucro. Os custos superam as receitas iniciais em todos os casos, explicando os prejuízos nos primeiros anos. Os dados referentes às plantas móveis apresentam um comportamento mais linear a partir do oitavo ano, quando atingem sua capacidade máxima de reciclagem.

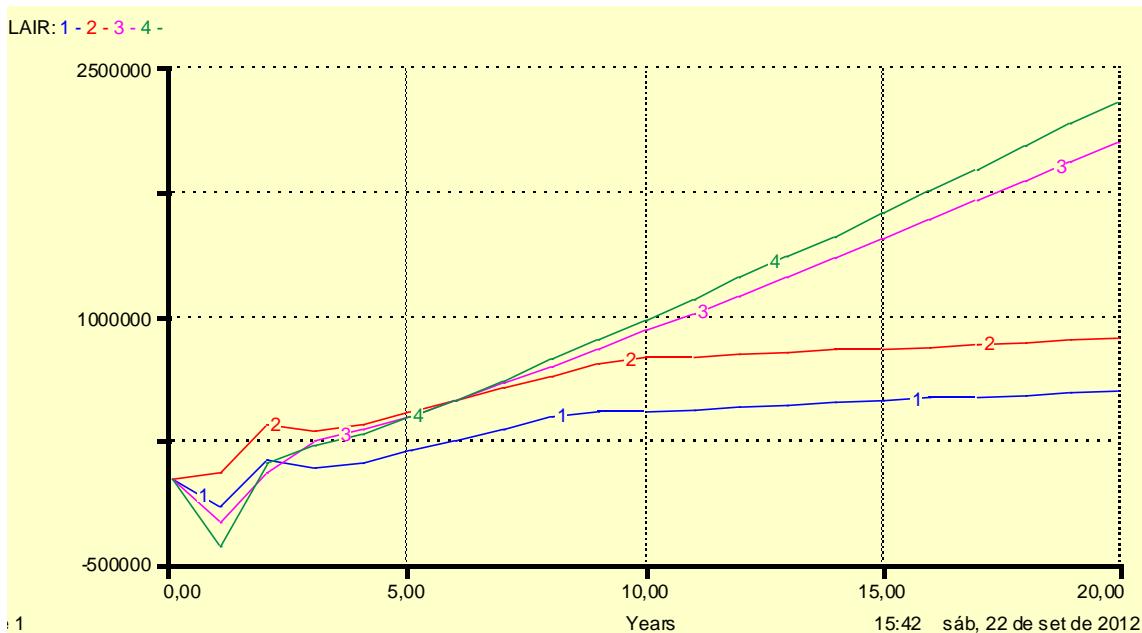


Figura 22 - Lucro Anual Antes do Imposto de Renda – LAIR - para cada um dos cenários considerados na cidade de macaé

Apesar de as plantas móveis apresentarem menores lucros anuais devido a menor capacidade, o único cenário que apresentou VPL positivo antes do vigésimo ano foi o 2 (Figura 23). Ou seja, é a única considerada viável economicamente.

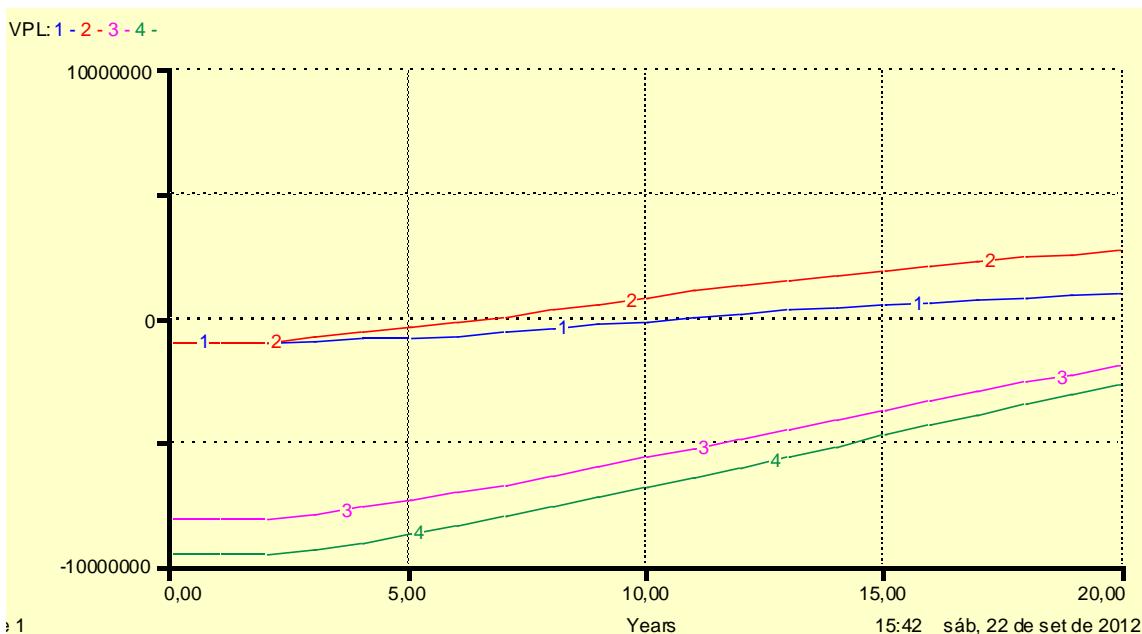


Figura 23 - Valor Presente Líquido (VPL) em cada cenário.

Na cidade de Macaé, portanto, as plantas fixas foram as que apresentaram piores resultados. No caso da móvel, nesta cidade o investimento se paga a uma taxa de entrada de R\$10,00 a partir do décimo sétimo ano apenas, quando o VPL é positivo (Tabela 20).

Tabela 20- VPL e payback dos resultados simulados em ordem decrescente.

Cenários	VPL (t=20anos)	Payback(anos)
1	R\$ 709.059,09	13
2	R\$ 2.156.488,15	7
3	-R\$ 1.993.356,36	-
4	-R\$ 2.788.044,39	-

Percebe-se que, também como o comprovado no primeiro modelo, as plantas fixas necessitarão de subsídios para se tornarem viáveis. Com essa composição a planta em Macaé com circuito maduro é menos viável do que uma planta com circuito emergente. Isso pode ser explicado pelo aumento dos custos operacionais tanto fixos como variáveis, sem um aumento significativo na receita gerada, não configurando uma boa alavancagem operacional.

8.6. Aplicação do modelo em outras duas cidades

Uma vez aplicado para a cidade de Macaé, como feito com o modelo 1, o modelo 2 será levemente adaptado, com algumas modificações de parâmetros, principalmente no que se refere a composição granulométrica de cada realidade bem como os dados de volume gerado anualmente, custos de operação, investimento inicial, preços dos agregados e dos resíduos entre outros.

A fim de facilitar a visualização, nesta etapa será considerado apenas as plantas fixas nas cidades, com os dois tipos de circuitos, configurando os seguintes cenários mostrados na Tabela 21.

Tabela 21 - Cenários considerados para aplicação do modelo 2 nas plantas fixas das três cidades, considerando o preço de entrada na planta de reciclagem estabelecida em 10,00 R\$/t.

	Macaé	São Paulo	Maceió			
Alta Qualidade	17%	49%	4%			
Baixa/Média Qualidade	83%	51%	96%			
Total	100%	100%	100%			
Tipo de circuito	Emergente	Maduro	Emergente	Maduro	Emergente	Maduro
Cenário	1	2	3	4	5	6

E os resultados são mostrados na Figura 24 e onde é possível avaliar alguns pontos: a cidade de São Paulo é a única que apresenta condições de mercado favoráveis à reciclagem; é a única que apresenta nos dois circuitos VPL positivo, sendo o circuito maduro mais viável diante da melhor composição do RCD gerado ($VPL4 > VPL3$), que permite a operação e receita de maiores quantidades de produtos com maior valor agregado como a brita e areia reciclada. Já Maceió (representada pelas linhas 5 e 6 na figura), assim como mostrado no modelo 1, apresenta os piores cenários comparados pelos tipos de circuitos, mesmo com maiores volumes de RCD operados. Isso pode ser explicado pela má qualidade do RCD, bem como pelas piores condições de mercado com baixos preços de agregados reciclados, baixo estímulo à reciclagem e percentuais de ilegalidade elevados.

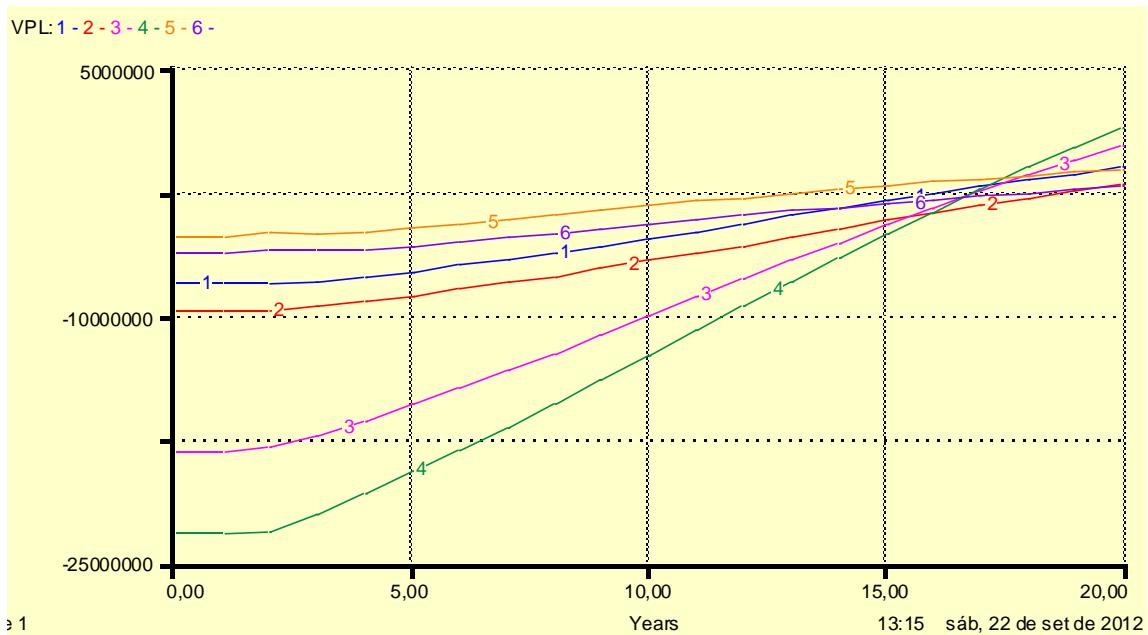


Figura 24 - VPL para 1-círcuito Macaé emergente, 2-circ. Macaé maduro, 3- circ. São Paulo emergente,4-circ. São Paulo maduro, 5-circ. Maceió emergente, 6 circ. Maceió maduro.

Tabela 22 - Resultado em VPL da aplicação do modelo dinâmico 2 nas três cidades com os dois tipos de circuitos.

Cenários	VPL (t=20anos)	Payback(anos)
1	-R\$ 1.993.356,36	-
2	-R\$ 2.788.044,39	-
3	R\$ 359.109,99	18,7
4	R\$ 1.413.227,64	17,3
5	-R\$ 2.133.497,62	-
6	-R\$ 3.246.428,49	-

Pelos resultados apresentados anteriormente, surgiu a hipótese de que a qualidade da composição do RCD é o fator mais sensível de impacto na viabilidade econômica das plantas. Por isso foi testada uma melhoria fictícia na composição do RCD na cidade de Macaé de forma que 60% fosse de concreto, 20% de cerâmica, 10% de solos, 5% de metais e 5% de outros. O resultado é mostrado na Figura 25.

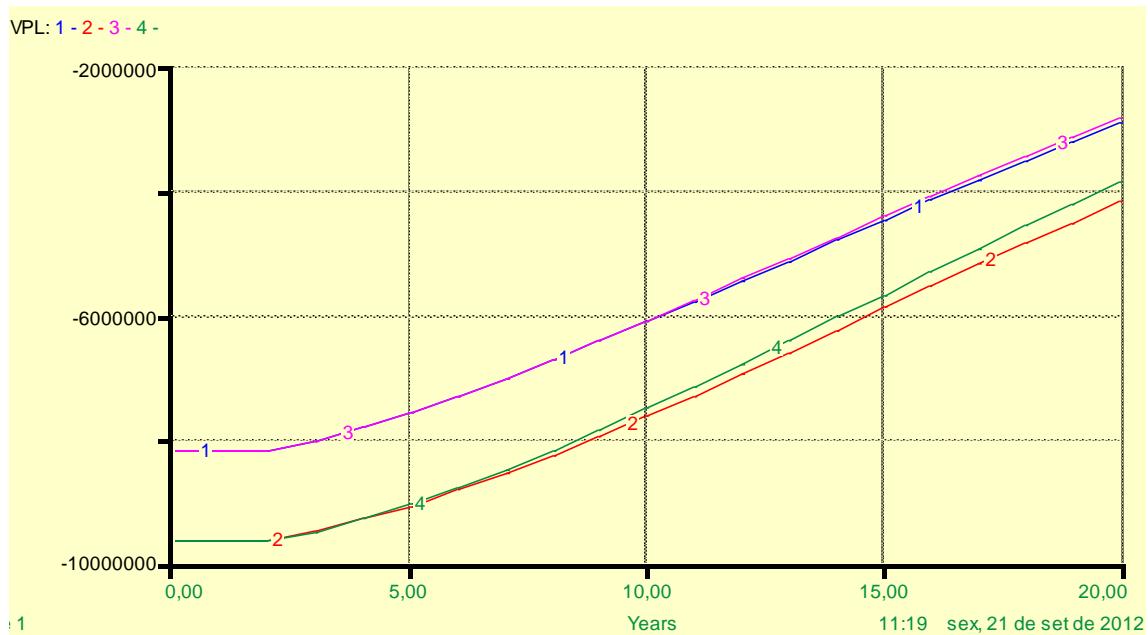


Figura 25 - Resultado de uma suposta melhoria da composição na cidade de Macaé, onde 3 e 4 são os resultados com melhores composições tanto com circuitos emergentes como maduros.

Pela Figura 25 percebe-se que, mesmo com uma composição fictícia melhor, a cidade de Macaé não apresentaria resultados financeiros tão diferentes. Apesar de o circuito emergente ter apresentado uma melhoria proporcional maior do que o maduro, ambos ainda seriam inviáveis economicamente. Isso mostra que a composição pouco influencia na viabilidade econômica das plantas de reciclagem. Por isso foram testados outros parâmetros externos passíveis de serem humanamente controlados que pudessem contribuir mais para existência desses empreendimentos nas cidades.

8.7. Propostas de solução para a viabilidade das plantas fixas em Macaé

Alguns subsídios podem ser pensados a fim de solucionar a questão da viabilidade das plantas fixas: redução da carga tributária para esse tipo de negócio (ao todo paga-se 45% de imposto), redução do valor do terreno adquirido, incentivos que estimulem o uso dos agregados reciclados em construções futuras (aumento do percentual reciclável) ou melhores ferramentas de controle para garantir o maior cumprimento dos códigos municipais que responsabilizam os geradores pela coleta e destinação adequada do RCD.

Por isso foi também simulado o impacto da diminuição do ICMS, Pis e Confis na viabilidade das plantas fixas com os dois circuitos, bem como a aquisição do terreno a 20% do seu valor original previsto na Tabela 15, proporcionando um menor investimento inicial e os dois casos simultaneamente, como mostrado na Tabela 23.

Tabela 23 - Cenários das propostas de solução para a viabilidade das plantas fixas com circuito emergente

	Terreno	20% do valor do terreno
	Integral	
Impostos de 20%	1	3
Impostos de 10%	2	4

Como na cidade de Macaé a planta fixa com circuito emergente é a mais indicada, nos gráficos abaixo se visualiza os VPLs em cada um dos quatro cenários de propostas para a planta fixa na cidade de Macaé.

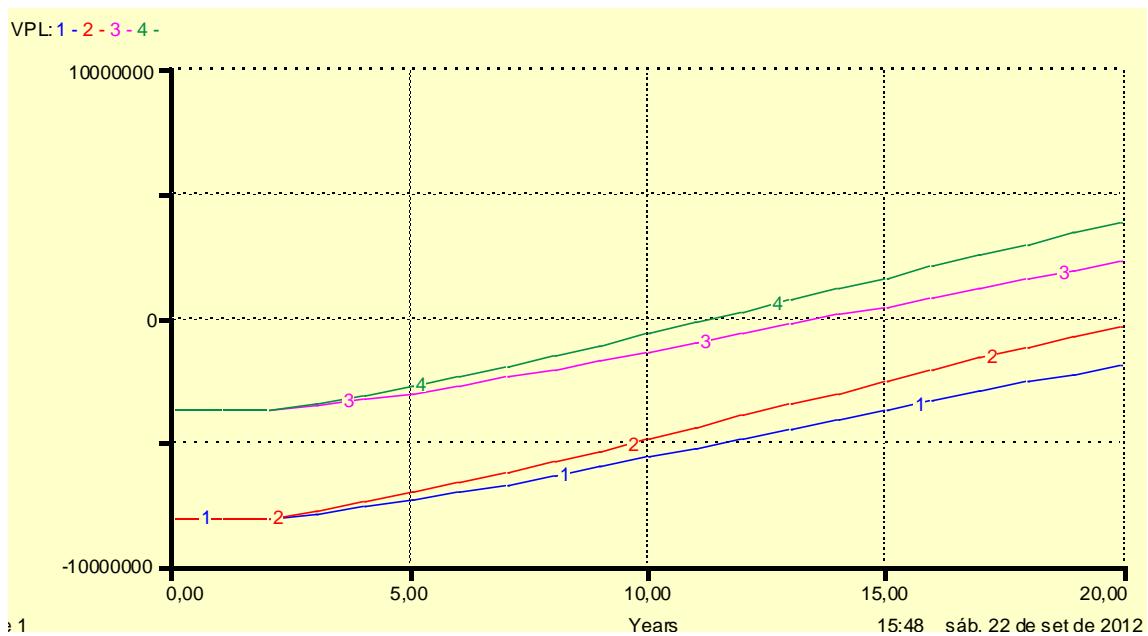


Figura 26 - Resultado simulado com redução de imposto e terreno para circuito emergente em Macaé.

Foi possível perceber que reduzindo somente os impostos considerados o cenário apresentara ainda VPL negativo, classificando como inviável economicamente (Figura 26).

Só ao reduzir também o valor do terreno para 20% o valor original que a planta se configura viável e ainda mais viável ao reduzir também os impostos cobrados (Tabela 24).

Tabela 24 - VPLs em t=20anos para as três alternativas de solução para a planta fixa madura

Cenário	VPL (t=20anos)	Payback(anos)
1	-R\$ 1.964.367,09	-
2	-R\$ 396.499,38	-
3	R\$ 2.214.673,64	13,5
4	R\$ 3.782.541,35	10,5

Com esses resultados fica evidente a importância dos subsídios para o setor de reciclagem em plantas fixas de cidades com pouca geração de RCD e baixo estímulo à reciclagem. O custo do terreno em cidades pode representar até 80% do investimento inicial, principalmente neste momento de valorização imobiliária de maneira geral no território brasileiro, assumindo um papel importante para a viabilidade destes empreendimentos. Uma elevada carga tributária também compromete. Como no modelo anterior, fica a questão: quem pagará por esses subsídios? De que maneira as empresas receberão o subsídio?

9. Conclusões

Terminado este trabalho faz-se uma análise comparativa entre os resultados atingidos e os objetivos esperados. Os objetivos iniciais foram atingidos. Os modelos foram desenvolvidos e aplicados em municípios brasileiros.

Apesar dos altos investimentos iniciais com a aquisição de terrenos para construção da planta e compra de equipamentos, a reciclagem do RCD apresentou mais benefícios do que custos nas cidades avaliadas. Em um horizonte de 20 anos, a região de São Paulo apresentaria uma relação custo-benefício bem superior às cidades de Macaé e Maceió, que também apresentaram relações positivas. Esse é um indicador que complementa o estudo de mercado de oferta-demanda, evidenciando que a reciclagem deve ser recomendada e incentivada.

Devido a condições de mercado mais favoráveis, como maior geração de RCD, maiores preços de venda dos agregados reciclados, a região de São Paulo é a única capaz de devolver todo o subsídio recebido antes dos 20 anos considerados. Já as cidades de Macaé e Maceió conseguiriam retornar apenas parte dos R\$ 6 milhões que ambas receberiam, restando ainda, cerca de 2 milhões e 3 milhões, respectivamente. Isso já pode ser percebido na prática pela distribuição das centrais de reciclagem pelo país. Das 59 usinas ativas listadas pela ABRECON em 2011, 48 eram privadas e, destas, 36 localizavam-se no estado de São Paulo, onde a cultura da reciclagem já está bem mais avançada.

Portanto, os grandes desafios à viabilidade técnica e econômica das plantas de reciclagem de RCD no Brasil ainda são as resistências culturais, percebidas pelas equações dos modelos que interferem nos percentuais de reciclagem e de ilegalidade, e a participação do poder público na adoção de medidas que intensifiquem o consumo de agregados reciclados e na destinação correta dos resíduos nas usinas de reciclagem existentes e nas muitas outras que ainda vão surgir no país.

10. Referências Bibliográficas

ÂNGULO, S.C. et al. **Análise comparativa da tecnologia de processamento na reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição.** In: XXI ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 2005. Natal: CEFET/RN, 2005. p. 305-312.

BLENGINI, G.A. **Life cycle of building, demolition and recycling potential: a case study in Turin, Italy.** Building and Environment v. 44, 2009. p. 319-330.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 307

_____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2008.

_____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2011.

_____. Lei nº 9.065, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Brasília.

_____. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Brasília.

_____. Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília.

CALOBA G.M., MOTTA R.R. **Análise de Investimentos.** Atlas: 2002..

DOLAN et. al. **Concepts for reuse and recycling of construction and demolition waste.** EUA: Construction Engineering Research Laboratories, US Army Corps of Engineers, 1999.

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. 2006.

FERHR, M.; Marques R.B.; Pereira, A.F.N. **Polluter-pays principle applied to construction and demolition debris.** Journal of Environmental Protection, abr. 2011. v. 2, p. 124.

HAO, J.L.L.; TAM, V.W.Y.; YUAN, H.P. **Dynamic modeling of construction and demolition waste management process.** v. 17, n. 5. Shenzhen: Emerald Group Publishing Limited, 2010.

NUNES, K.R.A.. **Avaliação dos Investimentos nas Usinas de Reciclagem de RCC nos Municípios Brasileiros.** Tese Doutorado na Engenharia de Produção- COPPE-RJ 2004.

NUNES, K.R.A. et. al. **Evaluation of Investments in Recycling Centres for Construction and Demolition Wastes in Brazilian Municipalities.** 2007. p. 1531-1540.

PANORAMA 2010. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. São Paulo, Brasil, 2010.

PEARCE, D. **Cost-benefit analysis and environmental policy.** Oxford Review of economic policy, v.14, n.4. 1998.

PINTO, T.P. **Metodologia para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana.** 1999. 190 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

POON, C.S. et al. **On-site sorting of construction and demolition waste in Hong Kong.** Resources, conservation and recycling, v. 32. p. 157-172. 2001.

JOHN, VANDERLEY. **Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção.** In: Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção: Projeto Entulho Bom. Salvador: EDUFBA, 2001. p. 26-44.

YUAN et. al. **A model for cost-benefit analysis of construction and demolition waste management throughout the waste chain.** Resources, Conservation and Recycling: v. 55. 2011.

ZHAO, W., REN, H., ROTTER, V.S. **A system dynamics model for evaluating the alternative of type in construction and demolition waste recycling center:** the case of Chongqing, China. Resources, Conservation and Recycling, n. 55, p. 933- 944. 2011.

ZHAO, W., REN, H., 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, n. 54, p. 377-389. 2010.

APÊNDICE A – Justificativa das Equações

Para chegar aos valores das equações que definem os percentuais tanto de ilegalidade como de reuso e reciclável foi adotada a metodologia de tentativa e erro de modo que os valores fossem consistentes e coerentes com a realidade esperada. Não seria permitido, por exemplo, valores negativos de percentuais ou que extrapolassem o limite físico de 100% do fluxo. As fórmulas foram postas de modo que os valores representassem, para diferentes cenários de valores de entrada, respostas que condiziam com os valores esperados da evolução dos percentuais para cada cidade.

Logo, para cada equação foram formuladas hipóteses dinâmicas de resposta às variações do efeito preço e efeito quantidade de RCD sendo reciclada, como mostradas a seguir:

- ▶ Quanto maior Taxa de Entrada na Planta de Reciclagem, menor o percentual de reciclagem, maior o percentual de ilegalidade e maior o percentual de reuso.
- ▶ Quanto maior a quantidade de RCD reciclado, maior o percentual de reciclagem, menor o percentual de ilegalidade e menor o percentual de reuso.

Portanto, tanto o percentual de ilegalidade (*Perc Ilegal*) como o de reuso (*Perc Reuso*) deveria ser diretamente proporcional ao preço cobrado na entrada da usina de reciclagem (*Efeito Preço*) e inversamente proporcional à quantidade sendo reciclada (*Efeito Qtd Reciclado*). Como é algo de certa forma intuitivo e que vá variar de forma gradual, propõe-se uma relação linear para estas duas equações do percentual:

- $Perc\ Ilegal = Efeito_Preco/a1+a2/Efeito_Qtd_Reciclado$
- $Perc\ Reuso = Efeito_Preco/b1+b2/Efeito_Qtd_Reciclado$

Já para o percentual que seria destinado a recicladora (*Perc Reciclável*) esperava-se um comportamento diferente, que fosse aumentando de forma mais acelerada logo a partir do primeiro ano que fosse implantada a usina de reciclagem na cidade. Pensou-se que nos primeiros anos o que seria efetivamente destinado de RCD às usinas seriam muito inferior ao que era gerado de RCD na cidade. Só que este valor cresceria de forma bem acelerada logo nos primeiros anos até se chegar ao limite ao longo dos 20 anos.

Por isso propôs-se a equação exponencial negativa com o limite de 1(100%): $f(x) = 1 - e^{-x}$, onde $f(x)$ é o percentual sendo destinado às usinas de reciclagem ao longo de cada ano(x), como mostrado na figura a seguir:

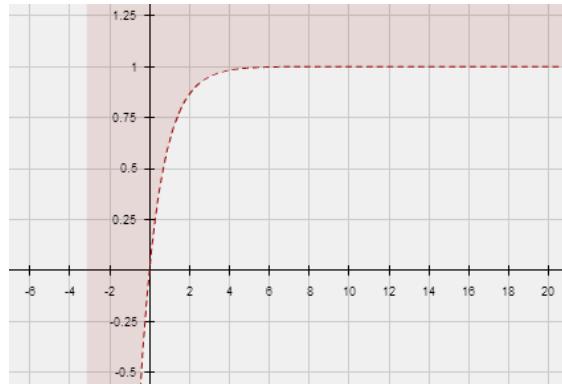
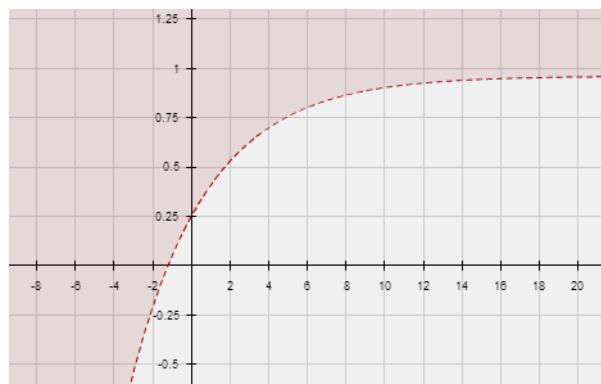


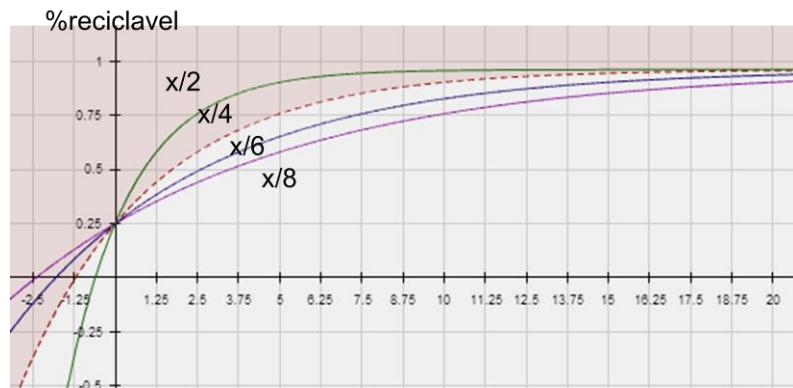
Figura 27 - Gráfico da função $1 - e^{-x}$

Como os valores iniciais para $x=0$ não eram de zero, e a velocidade para atingir o limite mudava para cada valor de preço e de quantidade sendo reciclada, bem como o próprio limite que seria um pouco menor do que 100%, a equação foi se ajustando até se chegar nesta proposta para $f(x)$:

$$0.96 * \left(1 - e^{-\frac{x}{4} + 0.3}\right)$$



Desta maneira, conforme fosse variando o x , que variava entre 0,1 e 0,5, o valor inicial se mantinha constante, assim como os limites, mudando somente a “barriga da curva”, ou a velocidade com que se atingiria o limite proposto, como pode ser observado a seguir:



Dessa forma chegou-se a equação proposta para o percentual reciclável, onde as constantes variavam para cada modelo e foram escolhidas de modo a manter a integridade, consistência e coerência dos parâmetros e do modelo:

- $$\text{Perc Reciclavel} = c1 * (1 - (\text{EXP}((c2 / \text{Efeito_Preco}) * (\text{Efeito_Qtd_Reciclado} + c3) * c4) / (c5 * (1 - \text{Efeito_Preco} / c6))))$$