



## Análise de Ciclo de Vida Entre *Liner* Mineral Padrão e *Liner* Alternativo em Aterro Sanitário

Eng. Civil Esp. Bruno Susin

UNISINOS, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - PPGEC - São Leopoldo, Brasil,  
bruno@terraservice.com.br

Prof. Dr. Marcelo Oliveira Caetano

UNISINOS, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - PPGEC - São Leopoldo, Brasil,  
mocaetano@unisinós.br

Acad. Eng. Civil Marla Griebler

Terraservice, Caxias do Sul, Brasil, marlagriebler@gmail.com

**RESUMO:** Considerado habitual o aterramento de resíduos sólidos urbanos no Brasil, existe uma preocupação com relação aos impactos ambientais deste processo. Para evidenciar a eficiência ambiental na redução do uso de recursos naturais não renováveis e emissões atmosféricas, realizou-se o estudo sobre análise do ciclo de vida (ACV) entre dois cenários propostos, com especificações distintas: no cenário 1, *liner* executado com energia normal e solo argiloso importado; e cenário 2, *liner* alternativo, composto por solo local do estudo de caso e resíduos da construção e demolição, reciclados e misturados *in loco*, e executado na energia modificada. Estabelecendo-se unidade funcional de 10 m<sup>3</sup> de *liner* executado, aplicou-se a metodologia de ACV considerando os aspectos e impactos ambientais para os dois cenários. Dos resultados obtidos, o que se mostrou mais eficiente em termos ambientais, foi fruto das especificações atribuídas ao cenário 2.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Liner* Mineral Alternativo, *Liner* Mineral Padrão, ACV, Aterro Sanitário, Eficiência Ambiental

### 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, aterramento de resíduos sólidos urbanos é uma prática usual. Conforme o relatório da ABRELPE (2017), o país gera cerca de 214.868 t/ano e um índice per capita de 1,035 kg/hab.dia. Destes, 59,1% são destinados de forma ambientalmente segura em aterros sanitários. Outros 22,9% e 18% são destinados de forma incorreta em aterros controlados e lixões, respectivamente. Num contraponto, a Lei Federal 12.305 exige a destinação final em locais ambientalmente seguros, sendo proibida a destinação em lixões (BRASIL, 2010).

Segundo Susin *et al.* (2017), um aterro de resíduos sólidos, seja este industrial, urbano, perigoso ou de lixo de baixo nível radioativo, no

Brasil e no restante do mundo, é uma opção para a destinação dos materiais inservíveis ao homem. Boas práticas são de suma importância para que tais materiais realmente fiquem confinados e ao longo de sua decomposição não degradem o ambiente em que se instala o aterro de resíduos.

Segundo Gomes *et al.* (2015), existe uma crescente preocupação com relação aos impactos ambientais gerados pelos aterros de resíduos, o que vem promovendo uma série de estudos a fim de se determinar o risco ambiental efetivo de um aterro de resíduos dentro de suas peculiaridades técnicas. A aplicação de metodologias propostas pela geotecnia ambiental, objetivando o reuso ou a reciclagem de resíduo da construção e demolição (RCD) nas obras de aterro de



resíduos, promove uma maior sustentabilidade dos empreendimentos instalados pela indústria de aterro de resíduos.

Barros (2005), atenta para as questões relacionadas ao desenvolvimento sociocultural e econômico dos centros urbanos, o crescimento econômico é diretamente proporcional ao crescimento do setor da construção civil, de forma que a ingerência dos processos produtivos dessa indústria pode aumentar também a geração de resíduos. O autor também salienta para o déficit habitacional brasileiro, que perdura e que também apresenta riscos ao aumento de geração de RCD nas cidades.

Por suas propriedades inertes, o RCD classe A, já vem sendo beneficiado em plantas de reciclagem, em diversos municípios brasileiros, por exemplo: Belo Horizonte, São Paulo, Rio de Janeiro, São José do Rio Preto, Londrina, Caxias do Sul, etc. O processo de beneficiamento básico contempla a separação, a britagem e a segregação granulométrica do RCD. Os equipamentos de britagem utilizados para esse fim não sofreram significativas modificações tecnológicas desde os anos 90 (SOUTSOS e FULT, 2015).

A Resolução CONAMA nº 307 de 5 de julho de 2012 ressalta para a necessidade da gestão e manejo correto do RCD, para a viabilização de destinos mais nobres para o RCD. A NBR 15.116 (ABNT, 2004) apresenta critérios técnicos para a utilização de resíduo da construção e demolição reciclado (RCDR) em camadas de pavimentação e em preparo de concretos sem função estrutural. Moresco (2017), apresenta taxa de geração entre 200 kg/hab.ano e 717 kg/hab.ano (apud COELHO e BRITO, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2011; MELO, GONÇALVES E MARTINS, 2011; BERNARDES *et al.*, 2008; PINTO, 1999).

Segundo Boscov (2008) e Junior (2006), aterros de resíduos são concebidos para realizar o confinamento dos resíduos, reduzir o volume dos mesmos e conseqüentemente minimizar (controlando a migração de contaminantes para o meio) os impactos ambientais. Tal confinamento se realiza impedindo o contato

direto do resíduo com o terreno natural e com a atmosférica.

Os elementos responsáveis por isolar o resíduo disposto do meio são denominados *liners* e de acordo com Macambira (2002), é chamada *liner* a camada individual de fundo e *compacted clay liner* (CCL) a barreira mineral que constitui a barreira de fundo. Solos coesivos compactados constituem presença constante em barreira impermeáveis de sistemas de contenção de resíduos. Pode compor as barreiras impermeabilizantes, ou *liners*, de base e das laterais dos taludes e de cobertura.

A NBR 13.896 (ABNT, 1997) define impermeabilização como a deposição de camadas de materiais naturais ou artificiais, que impeça ou reduza substancialmente a infiltração de água no solo. A norma estabelece ainda algumas diretrizes, dentre essas que no local a ser implantado o aterro haja uma extensa jazida de argila com coeficiente de permeabilidade inferior a  $10E-06$  cm/s.

Tipicamente se encontram nas grandes cidades mundiais, centrais de processamento de resíduos, áreas licenciadas e munidas tecnicamente para receber, processar e encaminhar diversos tipos de resíduos de diversas fontes da sociedade. Por isso, a proposta realizada no cenário 2, apresentado no presente estudo, considera o processamento do RCDR *in loco*.

### 1.1 Objetivo e Escopo do Trabalho

O objetivo do presente trabalho é comparar ambientalmente a execução de dois sistemas de *liners* (cenário 1 e cenário 2) em um aterro de resíduos, aplicando a ferramenta de análise de ciclo de vida (ACV). O escopo abrange a extração, o consumo e o beneficiamento da matéria prima utilizada na construção do *liner* mineral assim como o impacto ambiental resultante do desenvolvimento dos trabalhos de terraplenagem e construção do mesmo.



## 2 ESTUDO DE CASO

O trabalho utilizou como estudo de caso o aterro sanitário da cidade de São Leopoldo - RS. O empreendimento recebe hoje resíduos de 26 municípios da bacia do Rio dos Sinos, está instalado em uma área de 1.350.000 m<sup>2</sup>, onde 600.000 m<sup>2</sup> são utilizados para a disposição de resíduos, a área restante abriga áreas de preservação. O local tem capacidade para receber 5 milhões de toneladas de resíduos e vida útil de 20 anos com a célula em uma média de altura de 10 metros. Atendendo a uma população que em 2010 era composta por 1.721.939 habitantes, com uma geração de RSU estimada em 1.229,50 t/dia (PROSINOS, 2012). A massa específica natural deste RSU é de 0,30 g/cm<sup>3</sup> e 0,26 g/cm<sup>3</sup>, para amostras coletadas no presente aterro em profundidades de 0,8 m e 0,5 m respectivamente (CRVR, 2017).

O RCDR foi coletado no laboratório de construção civil da UNISINOS, localizado em São Leopoldo/RS e posteriormente triturado em moinho de mandíbulas. Após, os resíduos foram processados com um moinho de facas, a granulometria foi reduzida até material passante na peneira 4,8 mm. Finalmente, a última etapa do beneficiamento foi em um moinho de rolo, tornando o RCD praticamente uma areia fina a média. Esses são originados de paredes de alvenarias de aproximadamente 1 m<sup>2</sup> (corpos de prova utilizados para estudos na graduação em Engenharia Civil e Arquitetura da UNISINOS). Estas paredes foram desmanchadas e separadas de acordo com sua fabricação, em bloco cerâmico RCDRV (tipicamente vermelhos em função de sua origem) e RCDRC (tipicamente cinza em função de sua origem).

Para o município de São Leopoldo, cidade sede do aterro sanitário estudo de caso, considerando uma população de 214.210 habitantes e os índices anuais per capto de geração de RCD supracitados, é estimada uma geração de RCD de 42,8 t a 153,5 t por ano no município (CRVR, 2017; MORESCO, 2017). Junior, Macedo e Lafayette (2017) apresentam abordagem para a utilização de RCDR como

camada de cobertura em aterro sanitário, mas se apropriadamente beneficiado pode ser aplicado em diversas finalidades na engenharia civil.

De acordo com Shuck (2018), com exceção da argila do *liner* mineral padrão (LMP), os materiais utilizados no estudo de caso somente apresentaram coeficiente de permeabilidade (k) menor ou igual a 10E-7 cm/s (coeficiente de permeabilidade máximo requerida) quando aplicada a energia modificada na compactação. Segundo Mitchell (1965), conforme se aumenta a energia de compactação a permeabilidade diminui, o número de espaços é reduzido e a permeabilidade tem relação direta com a área de seção dos poros.

A caracterização geotécnica dos materiais foi realizada por Shuck (2018), a Tabela 1 apresenta os índices físicos do material em análise. O autor utilizou um software de empacotamento para a definição do teor de RCDR a ser incorporado juntamente com o solo local (SL) no *liner*, a seguir realizou uma bateria de ensaios geotécnicos nos diferentes teores propostos pelo software e no LMP.

Os traços de 60% solo local (SL) + 40% resíduo de construção ou demolição reciclado cinza (RCDRC) e 60% solo local (SL) + 40% resíduo de construção ou demolição reciclado vermelho (RCDRV) compactados na energia modificada, projetados por Shuck (2018), seriam aqueles com o menor custo ambiental, pois elimina o km rodado por caminhões transportadores de argila da jazida e utiliza RCDR. A Tabela 2 apresenta os parâmetros obtidos na compactação e nos ensaios de permeabilidade segundo as normas NBR 7.182 (ABNT, 2006) e NBR 14.545 (ABNT, 2000) respectivamente. As características geotécnicas do *liner* mineral padrão (LMP) é executado na área do estudo de caso com 100% da energia de compactação normal, atingindo coeficiente de permeabilidade inferior a 10E-07.



Tabela 1: Índices físicos do material em análise.

Mat.	$\gamma_{nat}$	$\gamma_d$	$W_{\%}$	$\gamma_s$	e	p (%)
SL	17,13	14,80	15,74	26,36	0,78	43,85
LMP	16,10	13,56	18,75	26,20	0,93	48,26
RCDRC	13,30	13,10	1,45	26,65	0,98	49,49
RCDRV	11,60	11,47	1,13	26,51	1,27	55,95

Fonte: Shuck, 2018.

Tabela 2: Parâmetros obtidos na compactação e nos ensaios de permeabilidade.

Mat.	$\gamma_{dm\acute{a}x}$	$W_{\acute{o}t}$	e	P (%)	$K_{20}$
SL	19,7	10	0,34	68	1,90E-07
LMP	18,8	12	0,39	79	9,37E-07
60%SL+40% RCDRC	20,5	9,5	0,29	58	5,51E-07
60%SL+40% RCDV	19	12,5	0,39	78	9,96E-07

Fonte: Shuck, 2018.

A camada impermeabilizante mineral de *liner* padrão, assim como o *liner* proposto no cenário 2, apresenta 60 cm de espessura e é construída com LMP no estudo de caso. Dessa forma, considerando como unidade funcional 10 m<sup>3</sup> de *liner* instalado, tem-se 16,5 m<sup>2</sup> de área de base da célula do aterro. Com altura média de resíduos depositados no interior da célula do aterro até a cota de selamento de 10 m, de modo que para a geração diária de RSU de 1.229,5 t, essa área de aterro, considerando massa específica natural do resíduo de 0,28 g/cm<sup>3</sup>, pode atender a bacia do rio dos sinos por 26,64 dias para o resíduo não adensado (CRVR, 2017).

Todo o material trabalhado, tanto os solos como o RCDR são considerados pela engenharia civil, materiais de 1<sup>a</sup> categoria. Materiais tipicamente granulares e facilmente escaváveis pela lâmina do trator. (RICARDO e CATALANI, 2007).

### 3 METODOLOGIA

Realizou-se ACV de dois cenários em estudo, denominados cenário 1 e cenário 2, para avaliar qual dos dois sistemas de *liner* apresenta maior eficiência ambiental. A metodologia apresentada

é baseada na metodologia trabalhada por Gomes *et al.* (2015) que contempla as seguintes etapas:

-Definição do objetivo e escopo: estabelece as fronteiras do estudo; critérios de análise e fatores de relevância;

-Análise de inventário: levantamento de dados; fluxograma de processos dos dois cenários; UD; coleta de dados e quantificação de entradas e saídas;

-Avaliação dos potenciais impactos ambientais: levantamento de dados e definição dos impactos ambientais (IAs) e aspectos ambientais (AAs);

-Interpretação dos resultados: Interpretação direta comparativa dos resultados qualitativos e quantitativos da ACV;

-Avaliação Crítica: por fim os resultados obtidos deverão ser avaliados.

Os cálculos de produtividade e de consumo foram desenvolvidos, na etapa de inventário, a partir da metodologia do DNIT, apresentadas no SINCRO 3 (2008), dos dados dos fabricantes dos equipamentos, a Equação 1 apresenta a metodologia de cálculo. Valores de consumo de combustível foram definidos a partir do banco de dados da empresa Terraservice Geologia, Engenharia e Meio Ambiente (TERRASERVICE, 2018). Valores de consumo de argila, RCDR e solo local a partir da geometria de projeto do *liner* do estudo de caso.

$$P = \frac{60 * C * FC * Fc * FE}{TC} \quad (1)$$

Onde:

P = Produtividade;

TC: tempo de ciclo (h);

C: Capacidade;

FC: Fator de Carga, para material de 1<sup>a</sup> categoria fator de conversão de 0,9;

Fc: Fator de Conversão, 0,77 para material de 1<sup>a</sup> categoria;

FE: Fator de Eficiência, de 0,83 para obras de construção;

Ainda na etapa de inventário, foi realizada a classificação em relação a duas categorias de impactos ambientais:



-“aquecimento global”, através do levantamento das emissões atmosféricas no desenvolvimento dos processos propostos pelo estudo;

-“redução de recursos naturais não renováveis”, por meio do consumo de óleo diesel e extração de argila e solo natural.

Na segunda etapa realizou-se levantamento dos aspectos e impactos ambientais, para a verificação de qual cenário apresenta o maior potencial de impacto para o meio ambiente. Este foi baseada no procedimento de identificação do Sistema de Gestão Ambiental da Unisinos (SGA UNISINOS, 2015) e no trabalho de Moraes *et al.* (2010). Outros autores, como: Potrich *et al.* (2007), Piva *et al.* (2007) e Dulac *et al.* (2009), Andrade e Turrioni (2014), usaram uma metodologia similar.

A presente ACV fundamentou-se nos seguintes parâmetros: situação operacional, probabilidade ou frequência de um aspecto ambiental ocorrer, severidade de um aspecto ambiental (intensidade e/ou gravidade potencial do impacto), classificação do grau de risco, e classificação do grau de severidade. (SGA UNISINOS, 2015; Moraes *et al.*, 2010).

A seguir são detalhados os dois cenários e apresentados critérios técnicos para a quantificação de entradas e saídas do inventário proposto. Em cada cenário são detalhados aspectos relevantes dos equipamento e práticas executivas que se distinguem em termos de impacto ambiental.

### 3.1 Cenário 1

Considera a execução de 10 m<sup>3</sup> de *liner* mineral, na energia normal, com argila importada de jazida a 50 km de distância do estudo de caso. A Figura 1 apresenta o fluxograma de processos do cenário 1. Considera-se para a execução do *liner* na energia normal, camadas de 30 cm fofas e velocidade de 10 km/h.

Caminhão Constalation de transporte rodoviário modelo 17190, marca Volkswagen, com capacidade de 14 m<sup>3</sup>, com desempenho de 3,58 L/km e 214 m<sup>3</sup>/h para uma distância média

de transporte (DMT) de 200 m (SINCRO 3, 2008; TERRASERVICE, 2018).

Caminhão rodoviário, com capacidade de 24 toneladas e consumo de 2,5 L/km (TERRASERVICE, 2018).

Escavadeira hidráulica da marca Caterpillar, modelo CAT320D, com capacidade de 1,2 m<sup>3</sup>, potência de 148 HP e desempenho 18 L/h. Para materiais de 1<sup>a</sup> categoria, produtividade de 192 m<sup>3</sup>/h (SINCRO 3, 2008; TERRASERVICE, 2018).

Trator de Esteira marca Caterpillar, modelo CATD6T, peso de 21 t e desempenho de 26 L/h. Este com 8,7m<sup>3</sup> de capacidade produção de 234 m<sup>3</sup>/h para materiais de 1<sup>a</sup> categoria; (SINCRO 3, 2008; TERRASERVICE, 2018).

Rolo compactador da marca Caterpillar, modelo CP533PD, potência de 95 HP e consumo de 9 L/h. Do tipo pé de carneiro, atingindo 100% Proctor normal em 8 passadas e com produtividade de 168 m<sup>3</sup>/h (SINCRO 3, 2008; TERRASERVICE, 2018).

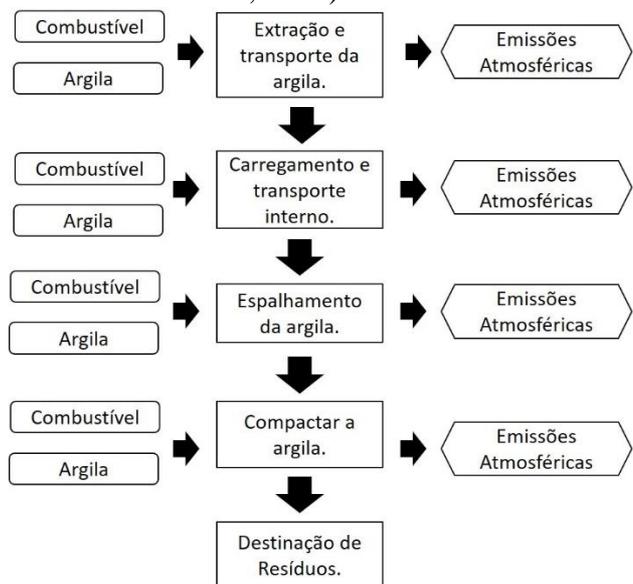


Figura 1 Fluxograma de processos do cenário 1.

### 3.2 Cenário 2

Considera a execução de 10 m<sup>3</sup> de *liner* alternativo, composto por solo local e resíduos da construção civil reciclado (RCDR), na proporção 2,5:1 e compactado na energia modificada. Considerando a fabricação do



RCDR na área estudo de caso. A Figura 2 apresenta o fluxograma de processos do cenário 2. Considera-se na execução da compactação na energia modificada 100% do Proctor modificado executado em camadas de 15 cm de espessura fofa ou velocidade de 5 km/h.

RCDR: em 10 m<sup>3</sup> de *liner*, de acordo com o traço projetado, deverá haver 4 m<sup>3</sup> de RCDR (SCHUK, 2018).

Sistema de britagem de RCDR auto propelido, carregado por escavadeira hidráulica, da marca Metso, modelo LT110, motor CAT C-12 capacidade de 700 t/h, desempenho de 0,3 L/h. O sistema de britagem apresenta a possibilidade de carregamento do material pronto para a realização do transporte interno (METSO, 2005).

Mistura do material com a utilização de caçamba peneiradora modelo MB-S18 S4, da marca MB Crusher, capacidade 2,4 m<sup>3</sup>, grade com 1.600 mm de diâmetro, cesto com 1.220 mm de profundidade. A caçamba peneiradora trabalha com a rotação dada pelo fluxo de óleo da escavadeira hidráulica, onde a mesma é acoplada e não apresenta variações de produtividade e de consumo se comparados à operação da escavadeira com a concha, ou seja, 192 m<sup>3</sup>/h e 18 L/h respectivamente. O’Brian *et al.* (2017), utilizou de screeners para a mistura de solos *in loco* em uma remediação de área contaminada, apresentando bons resultados e justificando a metodologia de mistura mecanizada (TERRASERVICE, 2018).

Caminhão Constalation de transporte rodoviário modelo 17190, marca Volksvagen, capacidade de 14 m<sup>3</sup>, com desempenho de 3,58 L/km e 214 m<sup>3</sup>/h para uma DMT de 400 m (SINCRO 3, 2008; TERRASERVICE, 2018).

Escavadeira hidráulica da marca Caterpillar, modelo CAT320D, com capacidade de 1,2 m<sup>3</sup>, potência de 148 HP e desempenho 18 L/h. Para materiais de 1ª categoria, produtividade de 192 m<sup>3</sup>/h (SINCRO 3, 2008; TERRASERVICE, 2018).

Trator de Esteira marca Caterpillar, modelo CATD6T, peso de 21 t e desempenho de 26 L/h. Este com 8,7m<sup>3</sup> de capacidade produção de 234

m<sup>3</sup>/h para materiais de 1ª categoria; (SINCRO 3, 2008; TERRASERVICE, 2018).

Rolo compactador da marca Caterpillar, modelo CP533PD, potência de 95 HP e consumo de 9 L/h. Do tipo liso, atingindo 100% Proctor modificado em 8 passadas com produtividade de 168 m<sup>3</sup>/h, alterando-se somente as espessuras de camada e velocidade do rolo (SINCRO 3, 2008; TERRASERVICE, 2018).

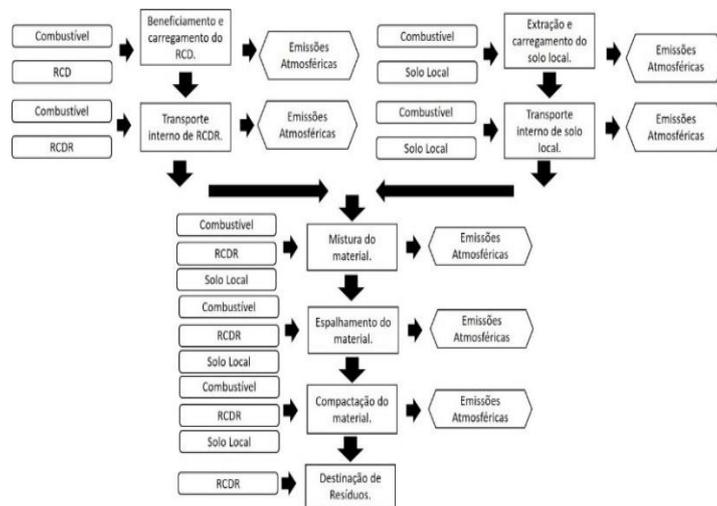


Figura 2 Fluxograma de processos para o cenário 2.

## 4 ANÁLISE DE INVENTÁRIO

Considerando a unidade funcional de 10 m<sup>3</sup> de *liner* executado, espessura de 60 cm e aresta de 4,08 m. Através dos dados apresentados na metodologia realizou-se a análise de inventário, por cenário e por processo, a seguir.

### 4.1 Cenário 1

Extração e transporte da argila: considerando o peso específico aparente seco do LMP e a umidade natural do material se faz necessária 0,06 viagens de caminhão para atender a demanda de volume da unidade funcional, e apontando cum consumo de 7,5 L de combustível diesel para o transporte e 0,0936 L de combustível diesel para o carregamento do caminhão com o uso da escavadeira hidráulica.

Carregamento e transporte interno: considerando que o material deverá ser transportado até um pulmão na área onde deverá



ser utilizado e que ainda deverá ser carregado em caminhões e transportado por pequenas distâncias no interior da área, o estudo considera consumo de diesel de 1,447 L para este processo.

Espalhamento da argila: atividade típica de obras de terraplenagem, o espalhamento do material deverá ser realizado com a utilização de trator de esteira e acusa um consumo de 1,092 L de óleo diesel.

Compactação do material: o LMP é tipicamente argiloso, necessita a utilização e rolo compactador do tipo pé de carneiro e apresenta consumo de 0,531 L de combustível diesel, para a sua compactação em 100% da energia Proctor normal.

Destinação de resíduos: a área definida pela geometria da unidade funcional, dentro dos critérios técnicos encontrados no estudo de caso, pode receber até 169 m<sup>3</sup> ou 47,32 t de RSU.

#### 4.2 Cenário 2

Beneficiamento e carregamento do RCD: deverá haver um consumo de 0,376 L de óleo diesel para o processamento do montante de 6 m<sup>3</sup> de RCD.

Transporte interno do RCD: Muito similar a metodologia aplicada na avaliação do transporte interno do cenário 1, diferindo a DMT, apresentando consumo de 1,022 L de diesel.

Extração e carregamento do solo local: escavadeira hidráulica, a diesel, para a escavação e carregamento do caminhão, consumo de combustível 0,936 L.

Transporte interno do solo local: consumo de 1,022 L de diesel para DMT de 400 m.

Mistura de materiais: consumo de combustível diesel de 0,936 L com escavadeira hidráulica.

Espalhamento de material: igual ao do cenário 1, com consumo de 1,092 L de óleo diesel.

Compactação do material: Segundo Pinto (2002) não existe relação matemática direta entre os a energia de compactação do laboratório com a energia dos equipamentos de compactação de campo; segundo Ricardo e Catalani (2007) para a execução de processos de compactação de solo um aumento na quantidade

de passadas do rolo não apresenta maior energia de compactação, que deve ser obtida com a redução da espessura da camada, com o aumento de peso do equipamento e/ou diminuição da velocidade do rolo nas passadas; dessa forma o estudo prevê uma redução na velocidade do equipamento ou na espessura na camada de 50%, considerando consumo de óleo diesel de 1,062 L.

Destinação de resíduos: 47,32 t de RSU, igual ao cenário 1, acrescidos de 7,9 t de RCD.

Por se tratar das mesmas atividades e na mesma condição geométrica, os valores de entrada para a destinação de RSU são iguais para os dois cenários e o escopo do presente estudo desconsidera essas.

#### 4 LEVANTAMENTO DE AA E IA

A partir da metodologia proposta foi desenvolvido um levantamento ambiental de impactos e aspectos (LAIA) para cada cenário para que se comparasse em termos de eficiência ambiental as duas propostas. Na análise, obteve-se um total de 850 pontos para o cenário 1 e 1475 pontos para o cenário 2.

#### 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando a unidade funcional estabelecida, em comparação, o cenário 2 apresenta-se ligeiramente mais eficiente em termos ambientais. O cenário 1 apresenta consumo de 10 m<sup>3</sup> de argila, insumo não renovável; ao passo que o cenário 2 consome 6 m<sup>3</sup> de solo local, 40% menos consumo de insumo não renovável. Consumindo RCD, para esta unidade funcional, o cenário 2 consegue armazenar 17% a mais em peso de resíduos em comparação com o cenário 1 no interior da célula de resíduos.

O balanço de massa da geração de gases e emissões atmosféricas apontam 56% de redução em peso quando comparamos o cenário 2 ao 1. Consequentemente o cenário 2 consome 56% menos combustível.

O cenário 1 apresentou 34 aspectos ambientais e o cenário 2, 59, de modo que atingiram 365 e 588 pontos respectivamente. Em



função da diferença de quantidades de processos entre os dois cenários foi realizado um ajuste.

Há um sensível decaimento percentual no impacto ambiental Intolerável ou Sério, de 2,74%, o que indica melhoria ambiental no cenário 2; os impactos considerados moderado a isento sofreram aumento de 2,74% no cenário 2, de modo que os impactos severos migram para impactos mais brandos em comparação do cenário 1 e cenário 2. As tabelas 3 e 4 do ANEXO I apresentam os valores e dados consolidados.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É necessária uma reengenharia onde a aplicação de conceitos e de ferramentas de gestão ambiental avançadas possibilitarão a viabilidade e o equilíbrio econômico, social e ambiental. O RCDR, se caracterizado por batelada, pode ser utilizado para fins de preenchimento, construção de artefatos de concreto pré-moldado, pavimentação, etc.

O presente estudo conclui maior eficiência ambiental nas categorias aquecimento global e redução de consumo de recursos naturais não renováveis para o *liner* alternativo, estudado no cenário 2. É evidenciada a relevância do impacto ambiental, nas categorias avaliadas, no processo de transporte rodoviário, de modo que mesmo com um maior número de processos o cenário 2 ainda consome menos combustível.

Agora que evidenciado o impacto ambiental para o transporte rodoviário, seria importante a realização de uma ACV para a aplicação de geocomposto bentonítico (GCL), pois provavelmente apresentará grande impacto na categoria aquecimento global.

No cenário 2, o beneficiamento do RCD aconteceria dentro da própria área do aterro, pois existe disponibilidade de área. E em escala mundial, centrais de resíduos aptas a receber, processar e compatibilizar diferentes resíduos de diferentes fontes geradoras.

Nas duas categorias de impacto ambiental avaliadas: aquecimento global e redução de recursos naturais não renováveis, o cenário 2

apresentou maior eficiência. Diminuição de 56% de geração de gases e 40% menos uso de matéria prima não renovável.

Por fim, é necessário que se teste *in loco* a proposta técnica apresentada para o *liner* alternativo para a sua validação, assim como um estudo financeiro deve ser realizado buscando avaliar a sua completa sustentabilidade.

## BIBLIOGRAFIA

- ABNT. NBR 13.896: Aterros de resíduos não perigosos - critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997.
- ABNT. NBR 14.545: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.
- ABNT. NBR 7.182: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016f.
- ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/download-panorama-2017/>>. Acesso em: 2 dez. 2018.
- ANDRADE, M.R.S. & TURRIONI, J.B.. Uma metodologia de análise dos aspectos e impactos ambientais através da utilização do FMEA, 2001.
- BARROS, M. C. de. Avaliação de um resíduo da construção civil beneficiado como material alternativo para sistema de cobertura. Dissertação de pós-graduação de engenharia da UFRJ grau de mestre em ciência em engenharia civil. Rio de Janeiro, 2005.
- BOSCOV, M. E. G.. Geotecnia ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- BRASIL. Lei no 12.305, de 02 de Agosto de 2010 Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, 2010.
- CRVR, C. R. DE V. DE R. CRVR - Central de Tratamento de Resíduos de São Leopoldo. Disponível em: <<http://crvr.com.br/area-de-atuacao/central-de-tratamento-de-residuos-de-sao-leopoldo/>>. Acesso em: 19 out. 2018.
- DULAC, V.F.; CAMPANI, D.B.; LOGUERCIO, A.P.; RAMOS, G.G C.; RUBERG, C.E.; GONÇALVES, R.S. (2009) Levantamento e plano de ação dos aspectos e impactos ambientais realizado na sede da coordenadoria de gestão ambiental da UFRGS. In: III Seminário sobre Tecnologias Limpas, Anais... Porto Alegre: UFRGS.
- GOMES, L. P.; KOHL, C. A.; SOUZA, C. L. de L.; R., N.; MIRANDA, L. A.; MORAES, C. A. M.. Avaliação Ambiental de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos precedidos ou não de compostagem. Eng Sanit. Ambient, v. 20, n. 3, 2015.
- JUNIOR, A. B. DE C.. Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água:



- prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários. [s.l: s.n.]. 2006.
- JUNIOR, M. A. B da S.; MACEDO, T. F.; LAFAYETTE, K. P. V.. Avaliação de resíduo da construção civil como material de cobertura final de aterros sanitários. III Simpósio sobre sistemas sustentáveis. PE, 2017.
- METSO. Metso Minerals S.A. Manual de britagem. Sorocaba - SP, 2005.
- MITCHELL, J. K.; HOOPER, D. R.; CAMPANELLA, R. G.. Permeability of compacted clay. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, v. 92, n. SM5, p. 490, 1965.
- MORAES, C.A.M.; KIELING, A.G.; CAETANO, M.O.; GOMES, L.P. (2010) Life cycle analysis (LCA) for the incorporation of rice husk ash in mortar coating. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 54, p. 1170-1176.
- MORESCO, J. M.. Análise de fatores que influenciam aspectos financeiros de implantação e operação de usina de reciclagem de RCD. Dissertação de mestrado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UNISINOS. São Leopoldo - RS, 2017.
- PINTO, C. de S.. Curso básico de mecânica dos solos. Oficina de Textos. São Paulo - SP, 2002.
- PIVA, C.D.; BONONI, V.L.R.; FIGUEIREDO, R.S.; SOUZA, C.C. (2007) Sistema de Gestão Ambiental implementado aos moldes da ISO 14001:2004 em um frigorífico de abate de aves, no Município de Sidrolândia – Mato Grosso do Sul. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, v. 3, n. 3, p. 20-53.
- POTRICH, A.L.; TEIXEIRA, C.E.E; FINOTTI, A.R. (2007) Avaliação de impactos ambientais como ferramenta de gestão ambiental aplicada aos resíduos sólidos do setor de pintura de uma indústria automotiva. *Estudos Tecnológicos em Engenharia* v. 3, n. 3, p. 162-175.
- PROSINOS. Plano regional de gestão integrada de resíduos sólidos dos municípios integrantes do consórcio público de saneamento básico da bacia hidrográfica do rio dos sinos pró-sinos (PRGIRS). São Leopoldo/RS: [s.n.].
- RICARDO, G.; CATALANI, H. de S.. Manual prático de escavação – terraplenagem e escavação de rocha. PINI, São Paulo - SP, 2007.
- SGA UNISINOS. (2015) Procedimento de identificação e avaliação de aspectos e impactos ambientais e estabelecimento de objetivos e metas e programa de gestão ambiental. Revisão 16, Unisinos, 26 p.
- SHUCK, T. E.. Alternativa de impermeabilização inferior de aterros sanitários utilizando resíduos de construção e demolição. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do título Graduado em Engenharia Civil, pelo curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. São Leopoldo. 2018.
- SINCRO 3 - DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Geral. Manual de Custos de infraestrutura de Transportes. 1ª ed. Rio de Janeiro - RJ, 2007
- SOUTSOS, Marios e FULT, Matt C. Recycling of demolition waste. Merseyside. *Construction Materials*, v. 169, n. CM2, 2015.
- SUSIN, B.; BRITO, M. A. de; SUSIN, N. J.; SUSIN, P.; TOIGO, P. V.; VIGANÓ, V.. Estudo da permeabilidade de solo local para utilização em *liner* de aterro de resíduos sólidos. Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul GEORS. Caxias do Sul. 2017.
- TERRASERVICE, Terraservice Engenharia e Geologia Ltda.. Banco de dados da empresa. Não publicado. Caxias do Sul - RS, 2018.



## ANEXO I

Tabela 3 Valores consolidados do inventário nos dois cenários estudados.

Aspectos Ambientais	Construção de 10 m <sup>3</sup> de <i>liner</i> mineral			
	Cenário 1 - LMP	Cenário 2 - SL+RCRDR	Unid.	%
Consumo de matéria prima não renovável	10	4	m <sup>3</sup>	40
Consumo de combustível	11,506	6,446	L	56
Geração de CO2	18,086	10,132	kg	56
Emissões atmosféricas	19,342	10,836	kg	56
Capacidade de armazenamento de resíduos	47,32	55,22	t	117

Tabela 4 Dados consolidados dos levantamentos nos dois cenários.

Cenário 1 - LMP					Cenário 2 - SL+RCRDR				
365 pontos					588 pontos				
Grau de Risco	AA	%	Signific.	%	Grau de Risco	AA	%	Signific.	%
Intolerável	0	-	9	26,47	Intolerável	0	-	14	23,73
Sério	9	26,47			Sério	14	23,73		
Moderado	5	14,71	25	73,53	Moderado	9	15,25	45	76,27
Tolerável	16	47,06			Tolerável	28	47,46		
Menor	4	11,76			Menor	7	11,86		
Isento	0	-			Isento	1	1,69		
Total	34	100	34	100	Total	59	100	59	100