

ÁREA TEMÁTICA: RECICLAGEM RECUPERAÇÃO DE MATERIAIS E ENERGIA

ALTERNATIVA TÉCNICO-ECONÔMICA PARA EXTINÇÃO DA POLUIÇÃO PLÁSTICA

*Daltro Garcia Pinatti¹ (pinatti@demar.eel.usp.br), Rosa Ana Conte¹
(rosaconte@demar.eel.usp.br), Thiago Hirosse Cobre Silva¹ (thiago.hirosse.silva@usp.br)*

¹ Escola de Engenharia de Lorena da USP – Departamento de Engenharia de Materiais

RESUMO

As tecnologias atuais visam à reciclagem plástica como polímeros (PRP) alcançando 2% no Brasil e 10% nos países desenvolvidos. Para os plásticos não recicláveis (PNR) foi desenvolvida a tecnologia do seu uso como substituto da pedra britada em concreto de alto desempenho, denominado CADLEVE. A destinação do PNR para esta nova aplicação é caracterizada por doze simetrias, organizadas na forma de uma rede e identificando nela uma rota de percolação. Sem um mercado quase inesgotável do CADLEVE a rota é interrompida e não há percolação para a extinção da poluição plástica (EPP). Calculou-se analiticamente cada simetria, identificando o custo da coleta como ponto crítico, cuja solução é a educação e conscientização ambiental. Uma vez resolvido o ponto crítico, o CADLEVE é aplicado em curvas de nível para recuperação de morros degradados para cultivo de capim elefante e sua utilização em confinamentos de gado, geração de energia térmica, elétrica e veicular. Propõe-se que os três geradores de riqueza identificados contribuam financeiramente para a solução do ponto crítico. A rota proposta pela nova tecnologia mostra que ela não tem dependência crítica dos poderes públicos, embora seu apoio político e em infraestrutura sejam úteis. A rota tecnológica proposta conviverá com os aterros sanitários até sua extinção completa, quando técnicas similares às do PNR forem aplicadas às outras frações dos resíduos sólidos domiciliares. Uma primeira implantação está em andamento no município de Lorena, SP, liderada pelo Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de Lorena da USP, com participação de algumas empresas.

Palavras-chave: Extinção da poluição plástica; Concreto de alto desempenho; Teoria da percolação.

TECHNICAL-ECONOMIC ALTERNATIVE TO EXTINGUISH PLASTIC POLLUTION

ABSTRACT

Current technologies aim at plastic recycling as polymers (PRP) reaching 2% in Brazil and 10% in developed countries. For non-recyclable plastics (NRP) we developed the technology for its use as a substitute for crushed stone in high performance concrete, called CADLEVE. The destination of the NRP for this new application is characterized by twelve symmetries, organized in the form of a network and identifying a percolation route. Without an almost inexhaustible market for CADLEVE, the route is interrupted and there is no percolation for the extinction of plastic pollution (EPP). We analytically calculate each symmetry, identifying the cost of collection as the critical point, whose solution is education and environmental awareness. Once the critical point is resolved, CADLEVE is applied in level curves for the recovery of degraded hills for cultivation of elephant grass and its use in livestock feedlots, thermal, electrical and vehicular energy generation. We propose that the three identified wealth generators contribute financially to the solution of the critical point. The proposed route based on the new technology has no critical dependence on public authorities, although its political and infrastructure support are useful. The proposed technological route will coexist with landfills until their complete extinction, when techniques similar to those of the NRP are applied to other fractions of the domestic solid residues. A first implementation is underway in the municipality of Lorena, SP, led by the Materials Engineering Department of the Lorena Engineering School at USP, with the participation of some companies.

Keywords: Extinction of plastic pollution; High performance concrete; Percolation theory.

1. INTRODUÇÃO

A extinção da poluição plástica (EPP) está desafiando a inteligência de todos os setores em todos os países. O motivo dessa dificuldade é que não vêm sendo consideradas as doze simetrias da reciclagem plástica, a saber: equação da continuidade (fonte = sumidouro); quantidades; densidade; custo da coleta; custo do processamento; geração de riqueza pelo material final, que é o concreto de alto desempenho em perfis leves (CADLEVE); benefícios do uso dos plásticos; contribuição dos fornecedores de resinas fósseis e produtores de plásticos (poliméricos); poluição ambiental; educação e conscientização ambiental; poder público e aterros sanitários. Dentre os vários significados da palavra simetria está a 'harmonia resultante de certas combinações e proporções regulares' (FERREIRA, 1975). O significado literário admite um universo homogêneo, porém a natureza é heterogênea, ou seja, as simetrias existem também para combinações irregulares. Exemplo disto são os fractais, cujo conceito não será elaborado neste trabalho.

O Grupo de Materiais, Meio Ambiente, Energia Renovável (GMMAER) do Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de Lorena da USP está desenvolvendo as tecnologias da EPP ordenando as várias simetrias elencadas acima.

É apresentado neste trabalho o conceito, quantificação e justificativas do ordenamento proposto.

A maioria dos materiais são tratados como homogêneos por meio da ciência e engenharia do contínuo (difusão, comportamento mecânico, dentre outros), porém os materiais são heterogêneos e demandariam seu tratamento pela ciência e engenharia da percolação. A Natureza é heterogênea e a percolação indica quando um sistema é macroscopicamente aberto para a descrição de um dado fenômeno, por exemplo, comportamento do tráfego, condutividade elétrica, transformação de resíduos em produtos úteis. A rota de percolação são as ligações entre os pontos do sistema que possibilitam descrever o fenômeno (SAHIMI, 1994). Os processos e equipamentos usados em polímeros são exemplos do contínuo (apenas em blendas há algumas aplicações da percolação). O processamento de plásticos não recicláveis (PNR) tem de ser tratado como material heterogêneo, especialmente quando substitui a brita na fabricação do CADLEVE. A integração das doze simetrias é uma aplicação da teoria de percolação para a solução da poluição plástica, a qual contém rotas simples e de baixo custo e rotas complexas, cujos custos são reduzidos com identificação de novas simetrias.

Em países desenvolvidos 30% do resíduo plástico são reciclados (10% efetivamente industrializados), 40% são usados como combustível em termoelétricas e 30% são destinados a aterros sanitários. As tecnologias utilizadas são de alto custo, pagas pelo alto poder aquisitivo desses países e ainda não se conseguiu eliminar a poluição plástica (ENKVIST; KLEVNÄS, 2018). Consideram-se duas frações nos resíduos plásticos: o plástico reciclável como polímero (PRP) e o plástico não reciclável como polímero (PNR). Foi identificada uma integração de doze simetrias organizadas de acordo com o conceito de percolação, tanto em nível de material heterogêneo (CADLEVE) como na otimização do fluxograma da integração para gerar R\$ 8 bilhões por ano de riqueza, se todo o PNR nacional for aproveitado.

2. OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é propor e justificar uma alternativa ambiental e economicamente viável para a EPP.

3. METODOLOGIA

Para atingir o objetivo proposto pretende-se reciclar os resíduos aglutinados ou picados de PNR como substitutos de pedra britada em placas de concreto de alto desempenho, denominadas CADLEVE. Estas têm sua utilização como curvas de nível para recuperação de morros degradados com o fim de produzir capim elefante a ser utilizado no confinamento de gado e geração de energia térmica, elétrica e veicular.

Metodologias têm início e fim. Se este é alcançado, a probabilidade de sucesso é 1; se não, é 0. Em percolação, as probabilidades variam entre 0 e 1.

O tópico Metodologia será utilizado para descrever a rede de simetrias, suas integrações e otimizações.

3.1 Descrição das cinco simetrias a serem empregadas na geração do PNR aglutinado

3.1.1 Equação da continuidade

A fonte da equação da continuidade são as resinas virgens. Os sumidouros são o aterro sanitário (custo de R\$ 0,070/kg), a reciclagem como polímero (receita de R\$ 1,20 a 0,80/kg), uso como combustível (receita de R\$ 0,50/kg) e, como proposta desse trabalho, é apresentada a placa de material concreto de alto desempenho com adição de PNR aglutinado (CADLEVE) para utilização como curvas de nível na recuperação de morros degradados. O valor do PNR no CADLEVE é de R\$ 0,086/kg (ver cálculos no item 4.1.1).

O CADLEVE é um concreto de alto desempenho no qual a brita é substituída por aglutinado ou pó de plástico gerando placas cimentícias com resistência mecânica à compressão de 4 a 20 MPa, em função dos parâmetros de processamento. Atualmente a equação da continuidade se restringe aos aterros sanitários, lixões e plásticos espalhados como sumidouro.

3.1.2 Quantidades

A quantidade nacional de geração de resíduos sólidos domiciliares (RSD) pode ser estimada em 1 kg/hab.dia. Considerando 40% de orgânicos, 26% de plástico (VALLE; MILANI, 2009) e 220 milhões de habitantes, a geração de plásticos resulta em 12,5 milhões de toneladas por ano. O percentual de reciclagem como polímero é baixo (2 a 8% no Brasil; a Europa pretende chegar a 30%), o uso como combustível tem alguns entraves e deseja-se a extinção dos aterros sanitários. Por isso, é analisada a possibilidade de o CADLEVE consumir a totalidade dos plásticos como PNR, caso esta tecnologia alcance sua implantação plena. Qualquer contribuição de outras aplicações diminui o volume de CADLEVE.

3.1.3 Densidade

A questão da densidade é crítica no caso dos filmes de embalagem e similares, cuja compactação para a redução de volume é fundamental para a diminuição do custo de coleta. A proposta é alcançar a redução de volume em duas etapas por meio da conscientização ambiental. A primeira etapa é a 'trouxinha de plástico' (TP) onde os filmes de embalagem serão acomodados manualmente o máximo possível nos seus pontos de origem (residências, instituições, empresas, dentre outros). As TPs serão levadas pela população para pontos de coleta ou deixadas para serem recolhidas nas ruas por carrinheiros. Os pontos de coleta serão big bags estacionados em escolas, instituições, estabelecimentos comerciais e industriais, onde será feita a segunda etapa, que é a acomodação com a armação suporte do big bag. Esta atividade é crítica para a EPP e demandará fortíssimo programa de conscientização ambiental, o qual será auxiliado pela geração de riqueza.

3.1.4 Coleta

O maior custo de coleta é a remuneração do carrinheiro, operando um tuk-tuk elétrico de carga, de R\$ 0,032/kg de plástico coletado (ver item 4.1.2). Este valor é menor que metade do valor do PNR como substituto da brita na produção do CADLEVE. A indústria produtora do CADLEVE usará o PNR se ele tiver um custo similar ao da brita. A outra metade cobrirá os custos da aglutinação e moagem. Valores intangíveis (remuneração pelas prefeituras e empresas do mesmo valor que pagam aos aterros sanitários, crédito de carbono, logística reversa) melhorarão a remuneração do carrinheiro e a do empresário usuário do PNR. A opção do tuk-tuk elétrico de carga é o seu baixo custo de investimento, o consumo de energia elétrica de geração própria, sua autonomia de 80 km para a operação diária, o carregamento da bateria chumbo-ácido especial durante 6 horas à noite e a capacidade de carga de 500 kg (4 big bags de 125 kg cada um), alcançada com duas acomodações.

3.1.5 Processamento

O equipamento principal do processamento é o aglutinador, cujo custo típico é de R\$ 30.000,00 para um equipamento de 50 CV (36,75 kW) e produção de 240 kg/h. Com uma taxa de juro de 10% a.a. e depreciação de 10% a.a. o custo anual do investimento será de R\$ 0,006/kg (ver item 4.1.3), operando três turnos por dia. O custo da energia elétrica é de R\$ 0,015/kg, impossível de ser praticado sem geração própria de energia (PINATTI et al., 2019). O custo de mão de obra e encargos é de R\$ 0,047/kg. O custo total do processamento do aglutinado é de R\$ 0,068/kg (1,5 vezes do custo da brita, de R\$ 0,045/kg), e é dominado pelo custo do operador, cujo pagamento tem de vir dos intangíveis. Em toda a tecnologia descrita o custo da mão de obra é o dominante, mostrando a capacidade de geração e de distribuição de riqueza do CADLEVE. A capacidade do aglutinador de 4.320 kg/dia é aproximadamente alimentada por três tuk-tuks fazendo três viagens por dia, coletando 500 kg por viagem, num total de 4.500 kg por dia. Essa quantidade é suficiente para processar o PNR gerado por 28.850 habitantes. Nas cidades maiores, os big bags serão transbordados para uma carreta volumétrica e transportados para um aglutinador industrial anexo a uma micro unidade termoelétrica (MicroUTE) (PINATTI et al., 2019), cuja escala aliviará os custos calculados anteriormente. Notar que a logística adotada é uma operação 'just in time'; o aumento da escala aumenta a lucratividade quanto mais ela se afasta das cenas deprimentes dos atuais depósitos de plástico.

3.2 Descrição das simetrias a serem empregadas nas três tecnologias geradoras de riquezas

3.2.1 Valor do CADLEVE

A geração de riqueza pelo CADLEVE será apresentada com base na sua aplicação como curva de nível na recuperação de morros degradados. A placa de CADLEVE tem dimensões padrão de 3 m x 0,65 m x 0,030 m, volume de 0,0585 m³, 30% dos quais ocupados por PNR, o que dá 0,01755 m³ de PNR/placa. Com a massa específica do plástico de 930 kg/m³, o peso do PNR/placa é de 16,32 kg. São instaladas duas curvas de nível por hectare, consumindo 70 placas por hectare, num total de 1.142,5 kg por hectare, que é igual a 1,14 t de PNR por hectare. Além das curvas de nível há um consumo complementar de placas em cacimbas e canaletas, por exemplo, e que não serão incluídas no presente cálculo básico. O valor de cada placa é R\$ 135,00, resultando num custo de CADLEVE para as 70 placas por hectare de R\$ 9.450,00 por hectare. O custo anual do investimento é de R\$ 1.890,00 (20% do total), comparado com uma receita gerada pelo capim elefante de R\$ 7.360,00 por hectare por ano (ver item 4.1.5).

O País tem dois milhões de quilômetros quadrados de morros degradados, cuja recuperação demandará 228 milhões de toneladas de PNR. A geração nacional de resíduo plástico é de 12,5 milhões de toneladas, ou seja, serão necessários cerca de 18 anos para recuperar os morros degradados. O mercado para utilizar PNR e o PRP pode ser considerado inesgotável devido às seguintes aplicações adicionais: ampliação do uso do PRP, pirólise, complemento das curvas de nível com cacimbas, na construção civil, substituição de parte da madeira amazônica e outras tecnologias a serem desenvolvidas nas próximas décadas.

3.2.2 Benefícios do plástico

São inegáveis os benefícios do uso dos plásticos em todos os setores da vida humana. É fundamental que seja encontrada uma solução técnico-econômica para destinação do seu resíduo. Os pontos críticos da solução proposta estão na questão da densidade dos resíduos, no custo da coleta e no custo do processo de aglutinação dos PNR. Propõe-se que esses pontos críticos sejam financiados pela indústria de resinas e polímeros, de modo similar ao que a ANIP gerencia para a destinação dos pneus inservíveis (BRASIL, 2009). No caso da ANIP, ela tem um interlocutor que é a indústria de cimento, porém esse interlocutor não existe para o caso dos resíduos plásticos. Considerando que o CADLEVE tem um potencial de destinação do PNR uma ordem de grandeza superior às outras destinações, propõe-se que a nascente indústria de CADLEVE seja a interlocutora com a indústria de resinas e polímeros para encaminhar as soluções da poluição

plástica. Existem instituições que podem gerir esta interlocução e catalisar sua expansão para todo o território nacional.

3.2.3 Contribuição de fornecedores de resinas e polímeros

A contribuição dos fornecedores de resinas e materiais poliméricos deve ser um compromisso empresarial e institucional para a EPP, diferente das associações existentes, pois a questão é interdisciplinar; requer ações executivas objetivas e imediatas (e não legalistas ou corporativistas, como tipicamente acontece com a burocracia pública e empresarial); é necessário o ajuste de atuação em cada região, dentre outros requisitos. A proposição é que os fornecedores de resinas e materiais poliméricos contribuam com o 'seed money' para projetos que auxiliem a implantação das primeiras ações executivas envolvendo o CADLEVE e suas aplicações na recuperação de morros degradados. A efetivação real de um projeto lucrativo facilitará a multiplicação para o restante do País, bem como diminuirá demanda futura de 'seed money' das empresas fornecedoras de resinas e polímeros.

3.3 Descrição das quatro simetrias públicas e sociais

3.3.1 Poluição ambiental

A poluição ambiental é um tema muito amplo, complexo e muito caro, de onde decorre seu fracasso generalizado para corrigir a poluição atmosférica, hídrica e do solo. A presente proposta substitui o ambientalismo tolo (FERREIRA, 1975) pelo neoambientalismo gerador de riqueza para parte dela ser aplicada na manutenção do meio ambiente. A presente proposta se limita em substituir a brita por plástico nas placas cimentícias que serão utilizadas na recuperação de morros degradados, produzindo capim elefante, que complementarará a coleta de energia solar térmica para geração de energia elétrica, térmica, veicular e para o confinamento de gado (a produção de leite é uma opção, mas ela não tem mercado para a escala do projeto). A geração de energias distribuídas em grandes quantidades, com qualidade e de baixo custo permitirá a reindustrialização do País (alta rotação econômica).

3.3.2 Educação e conscientização ambiental

Em relação à educação e conscientização ambiental o cérebro de uma população subdesenvolvida é intratável e é sensível apenas quando existe uma efetiva renda. A educação será atacada com as trouxinhas de plástico e com os big bags nas escolas e empresas, que são a única forma de aumentar a densidade das embalagens plásticas e reduzir o custo da coleta. A remuneração desta etapa será feita pelos patrocinadores (poluidor-pagador) e pela riqueza gerada pelo capim elefante. Como o volume de PNR é muito grande há longo prazo para se alcançar a educação e conscientização ambiental, sem desabastecimento dos resíduos para as fases iniciais do projeto. Este prazo pode ser encurtado por meio da renda efetiva implantando alguns hectares com curvas de nível feitas com placas de CADLEVE, produzindo capim elefante inicialmente para pequenos confinamentos, evitando investimentos em geração de energia. Por ex., dois hectares desse capim elefante (40 toneladas de biomassa seca/ha ano) confinam 10 cabeças de gado durante dois anos, gerando um desfrute de R\$ 8.250,00/ha ano (ver item 4.1.4). Este tipo de renda vencerá todas as resistências da efetivação da tecnologia.

A educação e conscientização ambiental são potencializadas pela seguinte sequência de soluções e geração de riqueza: aglutinador-picador + CADLEVE + capim elefante + confinamento de gado + digestor anaeróbico (metano + biocarvão) + geração de energias, que possibilitarão a transferência de parte da indústria urbana para a zona rural (PINATTI et al., 2018).

Propõe-se o uso das escolas rurais abandonadas como salas avançadas do SENAI para desenvolver e operar um curso de educação e conscientização ambiental técnico-industrial rural, com baixo conteúdo agrícola, biológico, literário e social ('hard technology').

3.3.3 Poder público

A presente proposta não depende muito do poder público visto que este não está atendendo às obrigações atuais. O poder público contribuirá não atrapalhando as inovações, pagando pelo PNR o mesmo valor que paga aos RSD enviados aos aterros sanitários, pavimentando e mantendo as estradas vicinais (rurais) com quilometragem da mesma ordem das ruas urbanas, exigindo das concessionárias de eletricidade que as redes rurais tenham a mesma capacidade e qualidade para despachar e receber a geração elétrica distribuída que é praticada nas redes urbanas, dando apoio político à inovação tecnológica na recuperação de morros e outras áreas degradadas. Não é solicitado apoio financeiro porque o poder público não tem esses recursos. Para o projeto os recursos devem sair da prática neoambientalista.

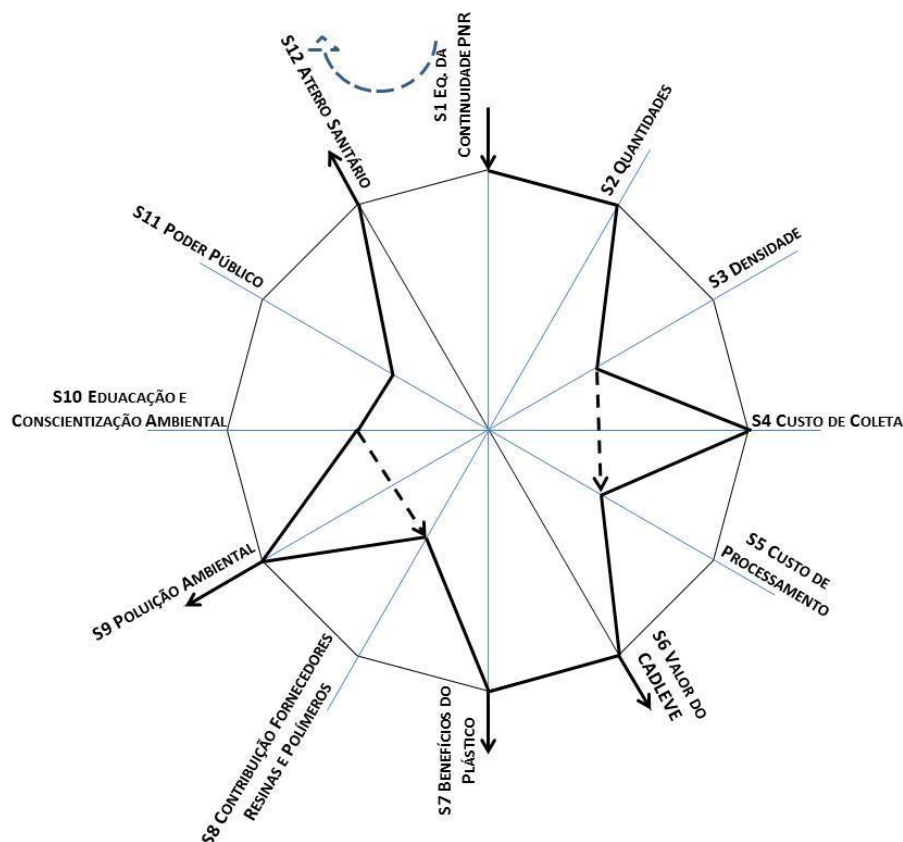
3.3.4 Aterro sanitário

O aterro sanitário persistirá ainda por várias décadas, embora em alguns países não seja mais permitido seu licenciamento. Os defeitos do enterramento dos RSD decorrem de sua gestão e estrutura monopolista. A população e as prefeituras municipais são presas fáceis dos coletores porque têm de se livrar dos RSD. Os coletores ou já são proprietários ou têm uma única opção para enterrar os RSD, já que o proprietário do aterro exerce a função de controlador do monopólio. O vilão do monopólio é o caminhão coletor que mistura todo o tipo de RSD e destrói sua riqueza bruta de R\$ 8 bilhões por ano, o equivalente a 27 megassenas da virada do ano. Várias regiões do mundo (USA, 2013) eliminaram o vilão implantando o sistema de seleção na fonte ('source selection') da biomassa digerível, RDF ('residual derived fuel'), material eletrônico, PRP, PNR, dentre outros. Similar ao que foi descrito neste trabalho para o PNR, basta implantar o sistema para as outras frações dos RSD e suspender a coleta com o caminhão misturador que a população fará a seleção na fonte. Ela fica indignada quando o caminhão coletor mistura tudo o que foi separado seletivamente. Do mesmo modo que o CADLEVE resolve o problema do PNR o GMMMAER do DEMAR da EEL – USP já desenvolveu as tecnologias críticas para cada uma das frações transformando-as em milhões de reais de riqueza. Este assunto está sendo objeto de outras publicações do Grupo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra de modo simplificado um exemplo de rede de percolação das simetrias da EPP. Cada raio (simetria) do dodecágono tem suas unidades próprias.

Figura 1. Rede de percolação das simetrias da extinção da poluição plástica



Seguindo os cálculos apresentados, está marcada uma rota de percolação (linha cheia). Quando o valor da simetria é grande, ele é marcado na aresta do dodecágono; quando é pequeno, ele é marcado próximo da origem, no raio. Abaixo seguem alguns resultados para discussão. Análise completa dessa integração será objeto de outro trabalho visto que a teoria e a aplicação da percolação são muito ricas.

Oposto ao raio do PNR (S1) estão os grandes benefícios do uso dos plásticos (S7). Os resultados do presente trabalho mostram que a utilização do PNR no CADLEVE aumenta os benefícios que os plásticos trazem.

A grande quantidade de PNR (S2) decorre do baixo índice de reciclagem do PRP e de seus problemas técnicos, e da baixa remuneração de seu uso como combustível em unidades termoelétricas (UTE). Oposto ao raio da quantidade está a contribuição dos fornecedores de resinas e polímeros (S8) para a extinção da poluição plástica, o que atualmente é praticamente nula.

A densidade (S3) dos resíduos plásticos é baixa, de onde decorre o alto custo da coleta (S4). É necessária uma solução deste problema e, neste trabalho, é proposta a 'trouxinha de plástico' coletada em big bags e estes, coletados por tuk-tuks elétricos até um ponto de transbordo (qualquer outra solução mais econômica é bem-vinda). Oposto aos raios da densidade e de custo de coleta estão a poluição ambiental (S9) e a educação e conscientização ambiental (S10). As linhas pontilhadas indicam qual a rota de percolação a ser alcançada se as quatro simetrias forem implementadas.

O custo de processamento (S5) é baixo (aglutinador-picador); no raio oposto está o poder público (S11). Este par não vem funcionando satisfatoriamente no caso das cooperativas de catadores porque o índice alcançado de reciclagem como PRP é muito baixo (2 a 8 % no Brasil, 10% na Europa, tendendo a 30%). No caso dos PNR a contribuição dos poderes públicos poderá aumentar significativamente como consequência do aumento do PIB industrial a ser gerado pelo CADLEVE. O CADLEVE (S6) é a grande valorização do PNR, primeiro como substituto da brita no concreto. Segundo, na produção de capim, cujo valor anual é de R\$ 370,00/hab. ano no nível da produção de capim elefante (ver item 4.1.6). Sua transformação em confinamento, energia térmica, elétrica e

veicular rotaciona a economia por um fator de cinco, resultando em R\$ 1.850,00/hab.ano (USD 440.00/hab.ano), o que corresponde a 6,3% do PIB nacional, que é de USD 7.000.00/hab.ano. Oposto ao raio do valor do CADLEVE está o aterro sanitário, que cobra para enterrar o resíduo, não rende nada, é poluente e inutiliza a terra que ocupa.

As cinco primeiras simetrias (S1 a S5) são relacionadas à produção do aglutinado-picado. As três seguintes (S6 a S8) são as geradoras de riqueza e as quatro últimas (S9 a S12) são de natureza político-social. A rota de percolação mostra que praticando as simetrias S1 a S8 elimina-se a poluição (S9) e gera-se riqueza independentemente do que se conseguir com as simetrias político-sociais, que são complicadas e ineficientes. Isto coloca maior responsabilidade nas mãos dos setores tecnológicos e empresariais.

Do ponto de vista econômico é feita uma comparação dos custos de reciclagem como polímero na Europa e da reciclagem usando o CADLEVE desta proposta, conforme a Tabela 1 a seguir.

Tabela 1. Custo da reciclagem na Europa (como polímero) e da reciclagem usando CADLEVE

	Custo, R\$/kg ⁽¹⁾					
	Coleta	Separação	Logística	Reciclagem	Investimento	Total
Europa ⁽²⁾	0,856	0,879	0,069	2,019	0,428	4,251
CADLEVE	(0,037+0,068)	Zero	0,024 ⁽³⁾	1,530 ⁽⁴⁾	0,030 ⁽⁵⁾	1,689

(1) 1€ = R\$ 4,60; (2) (ENKVIST; KLEVNÄS, 2018); (3) Ver item 4.1.7; (4) ver item 4.1.8; (5) ver item 4.1.9

O custo europeu da coleta e separação é alto devido à mecanização, automação, ausência de mão de obra e necessidade de alta pureza para a reciclagem como PRP. No projeto aqui proposto estes custos são baixos por conta da conscientização e educação ambiental, da etapa de acomodação via TP, da segunda acomodação em big bags e coleta com tuk-tuk e pelo CADLEVE aceitar qualquer tipo de mistura plástica.

Os custos da reciclagem são similares, porém em materiais e consumo energético eles são completamente distintos: no europeu, a reciclagem se baseia em tecnologia de polímeros (extrusão, percentual de resina virgem, acabamentos); a proposta apresentada se baseia na tecnologia de pré-fabricados de concreto (cimento, sílica ativa, areia, maior percentual de mão de obra).

O custo do investimento europeu é mais alto por conta dos equipamentos da reciclagem: extrusora, injetoras, sopradores, peleteiras; nesta proposta os custos são em aglutinadores, betoneiras e fôrmas.

Enquanto o retorno do produto reciclado como polímero é apenas na venda da peça manufaturada, com forte concorrência, o CADLEVE, além da venda da placa, dá a opção de o produtor aplicá-la em curvas de nível de morros degradados, em parceria com os proprietários da terra, e ter um retorno uma ordem de grandeza superior ao da simples produção de peças.

A não ser os produtos contrabandeados, qualquer produto nacional tem o mesmo custo da inserção do produto estrangeiro no País (impostos e nivelamento pelo fabricante nacional). No presente caso, o CADLEVE tem um custo 40% inferior ao do PRP europeu. A ampliação da escala e automação da produção de CADLEVE reduzirá seu custo. Não há, portanto, o que temer sobre investir nesta tecnologia desde que os pontos críticos da rota de percolação recebam apoio financeiro das três simetrias geradoras de riqueza, principalmente porque custo do PNR é muito baixo (R\$ 0,037 + R\$ 0,068/kg + R\$ 0,024/kg = R\$ 0,129/kg), ou seja, 2,15% do custo de R\$ 6,00 /kg da resina virgem.

Finalmente, merece ser lembrado que o PRP gera, no final, um PNR enquanto o CADLEVE é um tipo de 'carbon capture sequestration – CCS', embora esta questão não faça muito sentido no Brasil visto que nosso percentual de emissão de CO₂ é desprezível comparado com o resto do mundo.

4.1 Cálculos dos valores apresentados no texto

4.1.1 Valor do PNR no CADLEVE

- Peso de plástico/m³ de CAD: $(1000 \text{ kg de brita/m}^3 \text{ de CAD}) / (\rho_{\text{brita}} = 2.500 \text{ kg/m}^3) = 0,4 \text{ m}^3 \text{ de brita/m}^3 \text{ de CAD}$. Fazendo $0,4 \text{ m}^3 \text{ de brita} = 0,4 \text{ m}^3 \text{ de PNR}$ resulta em $(0,4 \text{ m}^3 \text{ de PNR} \times \rho_{\text{PNR}} = 930 \text{ kg/m}^3) = 372 \text{ kg de PNR/m}^3 \text{ de CADLEVE}$;
- Valor do PNR por m³ de CADLEVE: $(R\$ 80,00/\text{m}^3 \text{ de brita}) / (\rho_{\text{brita}} = 2.500 \text{ kg/m}^3) = R\$ 0,032/\text{kg de brita}$. O valor para $1.000 \text{ kg de brita/m}^3 \text{ de CAD}$ é de $R\$ 32,00/\text{m}^3 \text{ de CAD}$;
- Considerando o valor do PNR igual ao da brita tem-se:
 $(R\$ 32,00/\text{m}^3 \text{ de CAD}) / (372 \text{ kg de PNR/m}^3 \text{ de CADLEVE}) = R\$ 0,086/\text{kg de PNR}$.

4.1.2 Custo da coleta

- Remuneração do par trouxinha-big bag (ver item 3.3.2);
- Remuneração do carrinheiro (operador do tuk-tuk) que, coletando PNR, receberia um salário mínimo oficial de R\$ 1.045,00 para uma coleta de 1.500 kg/dia (33 t/mês) de PNR, o que resulta em R\$ 0,032/kg de plástico coletado;
- Tuk-tuk: $(R\$ 9.000,00 \times 20\%) / (3 \text{ viagens/dia} \times 500 \text{ kg/viagem} \times 5 \text{ dias/semana} \times 50 \text{ semanas/ano}) = R\$ 0,005/\text{kg}$;
- Custo específico da coleta: R\$ 0,037/kg.

4.1.3 Custo do processamento do aglutinado de PNR

- Aglutinador: equipamento R\$ 30.000,00; produção 240 kg/h; 3 turnos; 5 dias/semana; 50 semanas/ano; juro + depreciação 20% a.a.:
 $(R\$ 30.000,00 \times 20\%) / (240 \text{ kg/h} \times 18 \text{ h/dia} \times 5 \text{ dias/semana} \times 50 \text{ semanas/ano}) = R\$ 0,006/\text{kg}$;
- Custo do operador + encargos: $(R\$ 2.000,00/\text{mês}) / (240 \text{ kg/h} \times 22 \text{ dias/mês} \times 8 \text{ h/dia}) = R\$ 0,047/\text{kg}$
- Custo da energia elétrica: $(36,75 \text{ kW} \times 1 \text{ h} \times R\$ 0,10/\text{kWh}) / (240 \text{ kg/h}) = 0,015/\text{kg}$;
- Custo específico do processamento do aglutinado: R\$ 0,068/kg.
- Obs.: Custo total da coleta + processamento: $R\$ 0,037/\text{kg} + R\$ 0,068/\text{kg} = R\$ 0,105/\text{kg}$;
Custo volumétrico: $R\$ 0,105/\text{kg} \times (\rho_{\text{PNR}} = 930 \text{ kg/m}^3) = R\$ 97,65/\text{m}^3$, próximo do custo da brita de R\$ 80,00/m³. Se o custo do PNR for maior que o da brita, os produtos de CADLEVE continuarão a usar a brita.

4.1.4 Geração de riqueza em 2 ha com 10 cabeças de gado (bezerro 6@; recria 17 @)

- [10 cabeças (17 - 6) @ x R\$ 150,00/@]/2 anos = R\$ 8.250,00/ano;
- Consumo de capim no confinamento: $10 \text{ cabeças} \times 12 \text{ kg capim/cabeça dia} \times 365 \text{ dias/ano} = 43.800 \text{ kg}$;
- Produção de capim: $40.000 \text{ kg/ha ano} \times 2 \text{ ha} \times 2 \text{ anos} = 160.000 \text{ kg}$;
- 1. -DIFERENÇA $(160.000 - 43.800) \text{ KG} = 116.200 \text{ KG}$, CUJO VALOR PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA COBRIRÁ OS CUSTOS DOS ADITIVOS FUBAZÃO, FARELO DE TRIGO E SAIS MINERAIS.

2.

4.1.5 Valor energético do capim elefante

- 3. $-40.000 \text{ KG/HA ANO} \times 18,4 \text{ MJ/KG} \times R\$ 10,00/\text{GJ} = R\$ 7.360,00/\text{HA ANO}$. (R\$ 10,00/GJ = USD 2.50/GJ, QUE É O VALOR ENERGÉTICO DO CARVÃO MINERAL, QUE É O MENOR DO MERCADO).

4.

4.1.6 Valorização do CADLEVE pela produção de capim elefante

- (1 kg RSD/hab.ano x 60% (inorgânico) x 26% de PNR x 365 dias/ano)/(16,2 kg PNR/placa) = 3,515 placas/hab.ano;
- Valor do capim por habitante por ano: $[(3,515 \text{ placas/hab.ano}) / (70 \text{ placas/ha}) \times 40.000 \text{ kg/ha ano} \times (\text{PCI } 18,4 \text{ MJ/kg}) \times R\$ 10,00/\text{GJ} = R\$ 370,00/\text{hab.ano}$;
- 5. -ACRÉSCIMO DO PIB PER CAPITA COM A RECUPERAÇÃO DOS MORROS DEGRADADOS:
R\$ 370,00/HAB.ANO X

5 (ROTAÇÃO DA ECONOMIA) = R\$ 1.850,00/HAB.ANO (USD 440.50/HAB.ANO) = 6,3% DO PIB NACIONAL PER CAPITA DE USD 7,000.00/HAB.ANO.

4.1.7 Custo da logística

-Caminhão de 35 t gasta 2,8 L de diesel/km (R\$ 3,00/L). Diesel representa 40% do custo do frete. Admitindo um percurso de 20 km e encargos de 100%:
 $[2,8 \text{ L/km} \times \text{R\$ } 3,00/\text{L} \times 20 \text{ km} \times 2]/(35.000 \text{ kg} \times 40\%) = \text{R\$ } 0,024/\text{kg}$

4.1.8 Custo da reciclagem via CADLEVE

-Volume da placa CADLEVE - 0,0585 m³;
 -Custo da placa – 0,0585 m³ x R\$ 2.300/m³ = R\$ 135,00;
 -Peso da placa – 0,0585 m³ x 2.500 kg/m³ = 146,0 kg;
 -Custo específico do material – R\$ 135,00/146,0 kg = R\$ 0,92/kg;
 -Custo específico total, sendo material 60%; mão de obra 40% - (R\$ 0,92/kg)/60% = R\$ 1,530/kg.

4.1.9 Custo do investimento para reciclagem via o CADLEVE

-Aglutinador: equipamento R\$ 30.000,00; produção 240 kg/h; 3 turnos; 5 dias/semana; 50 semanas/ano; juro + depreciação 20% a.a.:
 $(\text{R\$ } 30.000,00 \times 20\%)/((240 \text{ kg/h} \times 18 \text{ h/dia} \times 5 \text{ dias/semana} \times 50 \text{ semanas/ano}) = \text{R\$ } 0,006/\text{kg}$
 -Betoneira: equipamento R\$ 85.000,00; produção 1,30 m³/h; densidade do CADLEVE 1.800 kg/m³:
 $(\text{R\$ } 85.000,00 \times 20\%)/(1,30 \text{ m}^3/\text{h} \times 18 \text{ h/dia} \times 5 \text{ dias/semana} \times 50 \text{ semanas/ano} \times 1.800 \text{ kg/m}^3) = \text{R\$ } 0,002/\text{kg};$
 -Fôrmas: R\$ 700,00/fôrma: $(\text{R\$ } 700,00 \times 20\%)/(2 \text{ placas/semana} \times 50 \text{ semanas} \times 146 \text{ kg/placa}) = \text{R\$ } 0,010/\text{kg};$
 -Custo específico de investimento + instalação: $(\text{R\$ } 0,018/\text{kg})/60\% = \text{R\$ } 0,030/\text{kg}.$

5. CONCLUSÃO

Admite-se que a poluição plástica é um enorme problema nacional e mundial; as técnicas existentes são incapazes de resolver o problema. Identificaram-se as doze simetrias para extinção da poluição usando o PNR no CADLEVE, que tem várias aplicações, salientando-se as placas para curvas de nível na recuperação de morros degradados. Além de esta aplicação resolver este segundo problema ela oferece volume de mercado para atuar como sumidouro da poluição plástica. O ponto crítico é o PNR entrar no CAD como substituto da brita, cujo valor é muito baixo, obrigando que a coleta e a aglutinação-picagem sejam de baixíssimo custo. Isso só é alcançado por meio da educação e conscientização ambiental, seleção na fonte (residências, instituições, empresas), coleta sequencial e, principalmente, contribuição financeira das três simetrias geradoras de riqueza (fornecedores de resinas e polímeros, empresas utilizadoras do plástico e aplicação do CADLEVE). As doze simetrias foram organizadas numa rede dodecagonal e identificada uma rota de percolação. Ambas serão objeto de desenvolvimento, mas já foi suficiente para mostrar que a atual ciência e engenharia do contínuo (materiais e sistemas homogêneos) necessita significativa evolução na direção da teoria e cálculo da percolação (ciência e engenharia de materiais heterogêneos (SAHIMI, 1994)).

É interessante calcular a riqueza futura em termos do valor da energia térmica contida no capim elefante se todos os morros degradados do País fossem recuperados. O valor do capim é de R\$ 7.360,00/ha ano (similar ao da soja + milho no Centro-Oeste). Esse valor multiplicado por 220 milhões de hectares de morros degradados (AB'SÁBER, 2003), resulta em R\$ 1.619 bilhões por ano, que convertidos em confinamentos, energia térmica, elétrica e veicular, escalonarão com um fator de cinco de rotação da economia, ou seja, o País alcançará o patamar econômico dos países desenvolvidos.

6. REFERÊNCIAS

AB'SÁBER, Aziz. Os domínios da natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003, 159 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução No. 416, de 30 de setembro de 2009. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/a3p/arquivos/conama_416_09_36.pdf.

ENKVIST, Per-Anders and KLEVNÄS, Per. The climate potential of a circular economy. Ch 1. In: The circular economy: a powerful force for climate mitigation. Executive Summary. Stockholm: Material Economics Sverige AB, 2018, 176 p.

FERREIRA, Aurélio B.H. Novo dicionário da língua portuguesa. 1ª ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1975. 1516 p.

PINATTI, D.G.; CONTE, R.A.; BRAZ, C.A.; SILVA, T.H.; APARECIDO, F.C. Viability of renewable energies and industrialization of rural areas using high-performance concrete. Renewable Energy & Power Quality Journal. Vol.1, n.16, p.127-132, 2018.

PINATTI, D.G.; CONTE, R.A.; SILVA, T.H.; MIGUEL, L.; MOREIRA, P.R.O. Integration of tropical renewable energies. Journal of Energy and Power Engineering. V.13, p. 91-96, 2019.

SAHIMI, Muhammad. Applications of percolation theory. London: Taylor & Francis, 1994, 258 p.

USA. Town of Millbury, Massachusetts. Organics to energy feasibility study, 2013. Disponível em: <https://files.masscec.com/research/Millbury.pdf>.

VALLE, M.A.; MILANI, P.H. Caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos domiciliares do município de Santo André. Revista Limpeza Pública. N.70, p.6-11, 2009.