AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE UM SOLO MELHORADO COM CAL DOLOMÍTICA E CINZA VOLANTE

MATHEUS DA COSTA SCHWANTZ[1]; ANDRÉ LUÍS SOARES DA SILVA[2]; GUILHERME OLIVEIRA DA SILVEIRA[3]; GUSTAVO AMARAL ROCKEMBACH[4]; PRISCILA MILECH THEISEN[5]; FABIULA DANIELLI BASTOS DE SOUSA[6]

[1]Universidade Federal de Pelotas – matheuscschwantz@gmail.com
[2]Universidade Federal de Pelotas – andrelssilva89@gmail.com
[3]Universidade Federal de Pelotas – guilhermeosilveira2@gmail.com
[4]Universidade Federal de Pelotas – gustavo.rockembach@hotmail.com
[5]Universidade Federal de Pelotas – priscila.milech@gmail.com
[6]Universidade Federal de Pelotas – fabiuladesousa@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

A engenharia geotécnica tem como material mais empregado o solo, conhecido por ser uma matéria-prima complexa e muito variável, que nem sempre satisfaz as necessidades da obra à qual será aplicada, conforme Dalla Rosa (2009). Nesse sentido, a estabilização e o melhoramento de solos com agentes cimentantes são ações que vêm sendo amplamente empregadas em pesquisas e obras civis como destaca Rockembach (2019), pelo fato de utilizarem o material existente no local, evitando gastos com transportes de solos adequados e com a extração de reservas virgens, o que poderia inviabilizar o projeto do ponto de vista econômico e ecológico (SCHNEIDER NETO, 2013).

Sob outro aspecto, a destinação de resíduos industriais, possuindo grande relevância ambiental, é objeto de preocupação frequente. Dar uma destinação favorável para os resíduos é o objetivo principal da aplicação de tais no melhoramento de solos conforme Rockembach (2019), sem ignorar o fato de alguns resíduos possuírem participação importante nas reações químicas pozolânicas, ressaltado por Dalla Rosa (2009). Assim, a cinza volante – resíduo industrial proveniente da queima do carvão mineral, com propriedades pozolânicas e gerado em grande quantidade em termelétricas, conforme Dalla Rosa (2009) –, pode ser reaproveitado, sem gerar um problema ambiental ou econômico de uma disposição convencional em aterros sanitários, destarte cumprindo o que está estabelecido na Política Nacional de Resíduos Sólidos (MMA, 2010), sobre a disposição adequada dos residuos.

Nesse sentido, o presente trabalho objetiva, por meio do uso da cal dolomítica e da cinza volante aplicados a um solo de Caulim Rosa e utilizando-se dos resultados das características mecânicas apresentadas por Rockembach (2019), estabeler a relação das misturas com os impactos ambientais gerados pela sua utilização com seu desempenho, na construção de 1 m³ da sub-base de um pavimento. Sendo assim, fora feito uso da ferramenta chamada Análise do Ciclo de Vida (ACV) de consequências, instrumento científico qualitativo e quantitativo, que avalia todos os estágios do ciclo de vida, considerando os impactos ambientais que determinadas técnicas geram no meio ambiente, servindo, desde modo, para a tomada de decisões do ponto de vista ambiental, determinando, neste caso uma mistura ideal, ou seja, aquela com menor impacto ambiental e bom desempenho mecânico, conforme Kanazava Villalva (2015), Quiñónez Samaniego (2015) e Barbosa Júnior, et al. (2008), embasados nas normativas dessa ferramenta, sobretudo a NBR ISO 14040.

2. METODOLOGIA

O solo utilizado para o estudo fora o Caulim Rosa – destacado por Feuerharmel (2000) como sendo composto por silicatos de alumínio hidratados cristalinos, contendo principalmente caulinita e haloisita e em menor proporção ilit – obtido da empresa Inducal, localizada na Vila Monte Castela, no município de Pantano Grande-RS. A cal que fora utilizada é classificada como cal hidratada dolomítica, designada CH II (NBR 7175 – ABNT, 2003), comercialmente chamada de "Primor Extra", produzida pela empresa Dagoberto Barcelos, na cidade de Caçapava do Sul-RS. Esse produto foi escolhido com o intuito de seguir a tendência da literatura atual e permitir a comparação de resultados com outros autores. As porcentagens de cal utilizadas no estudo seguem as especificações de Nicholson (2015), quanto à economia e a experiência de Dalla Rosa (2009), no qual foi escolhido os valores de 3%, 5% e 7% em peso. A Cinza Volante que fora utilizada é oriunda do carvão mineral, proveniente da Usina da CGTEE/Eletrobrás situada na cidade de Candiota-RS. As porcentagens de cinza seguiram os valores adotados por Schulz (2018), sendo de 0%, 12,5% e 25%. A moldagem dos corpos de prova e os ensaios mecânicos e de caracterização foram feitos por Rockembach (2019) no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Católica de Pelotas (UCPel), e serviram de base para este estudo.

Para a Análise do Ciclo de Vida (ACV), estruturou-se o estudo conforme a ABNT NBR ISO 14040/2009. Além disso, fora feito uso de recursos computacionais como o *software Sima Pro*®, versão 9.0, por facilitar a modificação de dados e por relacionar os dados a diferentes categorias de impacto segundo diferentes metodologias.

As misturas utilizadas na avaliação da construção de uma sub-base estão descritas na Tabela 1. A coleta de dados para a análise do inventário fora realizada a partir de bases de dados internacionais e nacionais que contém todas as informações da cal hidratada, desde a extração das matérias primas até o empacotamento dos sacos de cal hidratada, sofrendo algumas modificações para a realidade brasileira conforme dados fornecidos pela empresa Dagoberto Barcelos. Ademais, para os transportes dos materiais, apenas considerou-se o uso de diesel. A cinza volante fora considerada como um resíduo, não enquadrando seu processo de produção na avaliação. Por fim, considerou-se todos os procedimentos necessários para a construção da sub-base de um pavimento.

Tabela 1: Características misturas avaliadas (fonte: ROCKEMBACH, 2019)

Caracterizações	***Misturas***								
	SC3-1	***SC3-2***	***SC3-3***	***SC5-1***	***SC5-2***	***SC5-3***	***SC7-1***	***SC7-2***	***SC7-3***
Peso Específico Aparente Seco (kN/m³)	*15*	*15*	*15*	*15*	*15*	*15*	*15*	*15*	*15*
% Cal	*3*	*3*	*3*	*5*	*5*	*5*	*7*	*7*	*7*
% Resíduo	*25*	*12.5*	*0*	*25*	*12.5*	*0*	*25*	*12.5*	*0*
Umidade (%)	*21*	*21*	*21*	*21*	*21*	*21*	*21*	*21*	*21*

O sistema adotado até a obtenção do produto final foi construído conforme a técnica do "berço ao portão", considerando a extração de matérias primas (berço) até a finalização do pavimento ("portão"). Observe a Figura 1, que mostra o fluxograma produzido.

Para determinar quais impactos iria se avaliar, utilizou-se a regulamentação da norma inglesa Building Research Establishment (2013), que determinava as categorias de impacto ambiental mais relevantes para estudos de Análise de Ciclo de vida em produtos utilizados na construção civil. As metodologias aplicadas são a

da CML (2001) - seguindo a experiência de outros autores neste assunto, como Kanazawa Villalba (2015) e Quiñonez Samaniego, (2015)-, o cálculo proposto por IPCC (2007) e a Demanda de Energia Acumulada (CED).

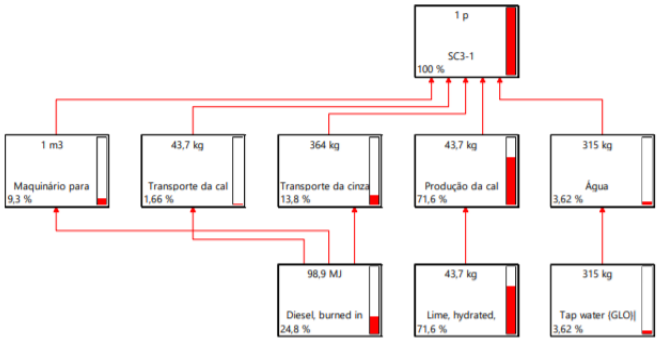

Figura 1: Sistema de produto "do berço ao portão" da construção de 1 m³ de uma camada de solo-cal-cinza (Fonte: ROCKEMBACH, 2019)

Desse modo, com a obtenção dos impactos gerados por cada tipo de mistura e com os resultados mecânicos fora determinada a melhor mistura, por meio da interpretação dos dados resultantes da avaliação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com os resultados avaliaram-se os processos mais potencialmente impactantes durante a construção de uma sub-base de solo-cal e solo-cal-cinza. Para analisar a diferença dos impactos entre as misturas, adotou-se a mistura SC3-3 como referência, por ter o menor teor de cal e de cinza volante. Observe a Tabela 2 e a Figura 2.

Tabela 2: Avaliação dos impactos ambientais do processo de construção de uma Sub-base de Solo-cal-cinza (Fonte: ROCKEMBACH, 2019)

Misturas	***Aquecimento Global (kg CO2 -eq) IPCC 2007***	***Depleção da Camada de Ozônio (kg CFC -11 - eq) CML 2001***	***Oxidação Fotoquímica (kg C2H4 - eq) CML 2001***	***Acidificação (kg SO2 -eq) CML 2001***	***Eutrofização (kg PO4 -eq) CML 2001***	***Depleção de Recursos Não Renováveis (kg Sb -eq) CML 2001***	***Demanda de Energia Acumulada (MJ -eq) CED***
SC3-1	*1,03E-11*	*4,82E-14*	*1,27E-12*	*4,78E-12*	*2,11E-12*	*1,12E-11*	*403,256*
SC3-2	*9,79E-12*	*4,30E-14*	*1,21E-12*	*4,09E-12*	*1,77E-12*	*1,00E-11*	*363,523*
SC3-3	*9,28E-12*	*3,78E-14*	*1,15E-12*	*3,41E-12*	*1,43E-12*	*8,86E-12*	*323,99*
SC5-1	*1,57E-11*	*6,74E-14*	*1,94E-12*	*6,32E-12*	*2,71E-12*	*1,57E-11*	*573,12*
SC5-2	*1,52E-11*	*6,24E-14*	*1,88E-12*	*5,65E-12*	*2,38E-12*	*1,46E-11*	*533,486*
SC5-3	*1,47E-11*	*5,73E-14*	*1,82E-12*	*4,98E-12*	*2,04E-12*	*1,35E-11*	*494,953*
SC7-1	*2,09E-11*	*8,60E-14*	*2,58E-12*	*7,81E-12*	*3,28E-12*	*2,01E-11*	*735,35*
SC7-2	*2,05E-11*	*8,10E-14*	*2,53E-12*	*7,15E-12*	*2,95E-12*	*1,90E-11*	*697,82*
SC7-3	*2,00E-11*	*7,60E-14*	*2,47E-12*	*6,49E-12*	*2,63E-12*	*1,79E-11*	*659,08*

Analisando os resultados, notou-se que os impactos são mais susceptíveis ao teor de cal do que a variação do teor de cinza volante no caso da categoria aquecimento global. Dentre os processos mais significativos nesses impactos, destaca-se a produção da cal, a construção da sub-base e o transporte dos insumos até o local. Com relação a demanda de energia por fonte, percebeu-se que as energias fósseis são as mais utilizadas.

Para a comparação entre a avaliação ambiental e mecânica fora escolhido a categoria “Aquecimento Global”, impacto mais conhecido atualmente, uma vez que a cal é o material mais impactante neste estudo, com a emissão de dióxido de carbono

na calcinação do calcário. É possível visualizar na Figura 3 uma tendência de decréscimo de resistência a cada três misturas devido a quantidade de cinza volante existente em cada uma das misturas. Nota-se que a mistura SC5-3 possui valores de resistência próximos da SC7-3, porém, com menor impacto potencial gerado.

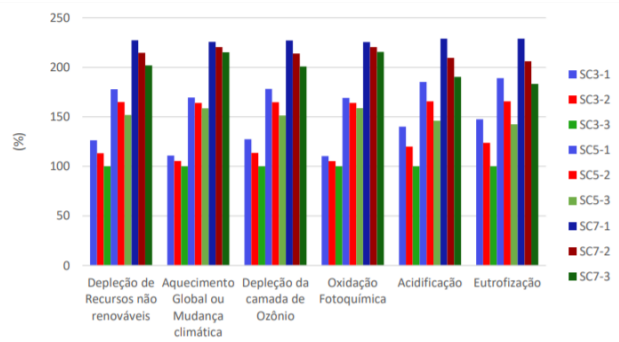

Figura 2: Relação entre impacto e misturas (Fonte: ROCKEMBACH, 2019)

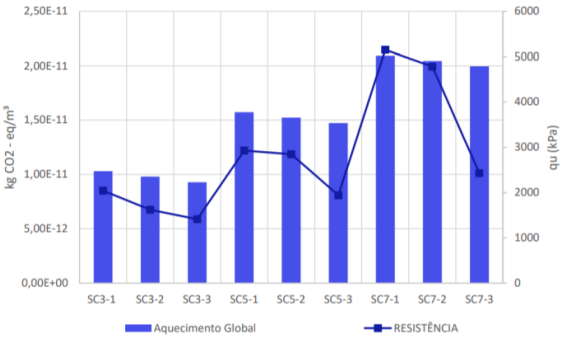

Figura 3: Comparativo entre RS e AQ (Fonte: ROCKEMBACH, 2019)

4. CONCLUSÕES

Em suma, fora demonstrado a potencialidade dessa ferramenta para tomada de decisões do ponto de vista ambiental, permitindo diversas conclusões. Nesse sentido, essa análise instiga o projetista a melhorar os processos, visando reduzir os impactos ambiental. Assim, notamos que nem sempre a mistura que gera um menor impacto ambiental apresenta o melhor comportamento quanto a seu desempenho mecânico.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações (2009) e princípios e estrutura (2009b).

BARBOSA JÚNIOR, A. F. et al. Conceitos e aplicações de Análise do Ciclo de Vida (ACV) no Brasil. **Revista Ibero-Americana de Estratégia**, São Paulo, v.7, n.1, p. 39-44, 2008.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS: Lei 12305/2010**. Presidente, Brasilia, 02 ago. 2010. Especiais. Acessado em 20 set. 2020. Online. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm

QUIÑÓNEZ SAMANIEGO, R.A. **Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.

ROCKEMBACH, G. A. **Influência de ciclos de molhagem e secagem na resistência à compressão simples e avaliação do ciclo de vida de um solo melhorado com cal e cinza volante**. 2019. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso da Engenharia Civil), UCPel.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.

SCHNEIDER NETO, R. G. **Estabilização de solos finos utilizando cal hidratada**. 2013. Dissertação(Trabalho de Conclusão de Curso da Engenharia Civil),UniPampa.