

# ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM CAL EM OBRA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO

## SOIL STABILIZATION AS LIME IN SANITARY SEWAGE WORK - CASE STUDY

Jéssyca Diniz de Lima<sup>1</sup>  
André Vinícius Azevedo Borgatto<sup>2</sup>  
Thalita Maria Ramos Pôrto de Moraes<sup>3</sup>

### RESUMO

As obras lineares, como a implantação de redes coletoras de esgoto sanitário, são caracterizadas pela grande movimentação de terra durante sua execução. Dessa forma, o reaproveitamento do solo na etapa do reaterro é uma prática a ser executada, sempre que as características geotécnicas do material escavado permitirem a sua reutilização. Quando isto não se aplica, é realizado o uso de material proveniente de jazida, o que acarreta um acréscimo de gastos decorrentes de bota-fora de material, transporte do novo insumo para o canteiro e/ou frente de serviço, seu custo de compra, entre outros valores envolvidos na sua logística. O beneficiamento de solo com o uso da cal surge como possível solução eficaz, econômica e sustentável para esta questão. O presente artigo estuda a incorporação de cal no solo visando a sua estabilização para composição na sub-base do reaterro das valas. O solo analisado foi proveniente da escavação das obras de Rede Coletora de Esgoto (RCE) do Sistema de Esgotamento Sanitário (SES) do Cabo de Santo Agostinho. Neste estudo, à princípio, foram analisadas as características mecânicas do solo através de uma simulação na qual foi realizada a incorporação de 1%, 2% e 3% de cal em amostras coletadas no trecho 146 da Bacia E1. Após análise dos resultados foi definida uma porcentagem ótima, a fim de, adotá-la na estabilização dos demais trechos de RCE. Para isto, foi procedida a mistura solo-cal utilizando esta porcentagem ótima em 3 amostras provenientes do canteiro de obras, local onde os solos que eram oriundos de distintos trechos eram armazenados. Verificou-se que as propriedades mecânicas normativas foram atendidas, possibilitando que o material beneficiado constitua a camada da sub-base do reaterro. Além do atendimento da resistência do solo, este beneficiamento contribuiu com a redução de custos na obra e atuando em prol da sustentabilidade.

**Palavras-chave:** beneficiamento; escavação; sub-base; saneamento.

### ABSTRACT

Linear works, such as the implementation of sanitary sewage collection networks, are characterized by the large movement of earth during their execution. Thus, the reuse of soil in the backfill stage is a practice to be performed, whenever the geotechnical characteristics of the excavated material allow its reuse. When this does not apply, the use of material from the

---

<sup>1</sup> Bacharelanda em Engenharia Civil pela Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2022.

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Civil na modalidade sanduíche entre as instituições COPPE/UFRJ e Technische Universität zum Braunschweig, 2010.

<sup>3</sup> Doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande, 2010.

deposit is carried out, which leads to an increase in expenses arising from the disposal of material, transport of the new input to the construction site and/or service front, its purchase cost, among other values involved in its logistics. Soil improvement with the use of lime emerges as a possible effective, economic and sustainable solution to this issue. The present article studies the incorporation of lime in the soil aiming at its stabilization for composition in the sub-base of the backfill of the trenches. The analyzed soil came from the excavation of the Sewage Collector Network (RCE) works of the Sanitary Sewage System (SES) of Cabo de Santo Agostinho. In this study, at first, the mechanical characteristics of the soil were analyzed through a simulation in which the incorporation of 1%, 2% and 3% of lime was carried out in samples collected in stretch 146 of Basin E1. After analyzing the results, an optimal percentage was defined in order to adopt it in the stabilization of the other CER stretches. For this, the soil-lime mixture was carried out using this optimal percentage in 3 samples from the construction site, where the soils that came from different sections were stored. It was verified that the normative mechanical properties were met, making it possible for the processed material to form the sub-base layer of the backfill. In addition to meeting the resistance of the soil, this improvement contributed to the reduction of costs in the work and working towards sustainability.

Keywords: improvement; excavation; subbase; sanitation.

## INTRODUÇÃO

A construção civil é responsável pela produção de grande volume de resíduos sólidos que em considerável escala são destinados à locais impróprios como terrenos baldios, áreas de preservação ambiental, vias públicas acarretando a contaminação da natureza. Através do reaproveitamento do solo é possível alcançar a sustentabilidade e economia, objetivos almejados no mundo moderno<sup>1</sup>.

Em obras de infraestrutura, dentre elas as de saneamento, usualmente é envolvido grande volume de movimentação de solos durante o processo executivo. Na implantação de uma rede coletora de esgoto, por exemplo, diversos tipos de solos podem ser encontrados, não sendo incomum que o material natural não se enquadre nas especificações técnicas, principalmente, para seu uso nas últimas camadas, que engloba o pavimento.

Os solos utilizados nestas camadas são obtidos fora da área de construção, acarretando impactos ao meio ambiente na

sua extração, e em alguns casos podendo inviabilizar a obra devido à distância para obter este novo material, elevando os custos dela<sup>2</sup>.

Neste cenário, a estabilização do solo surge como uma alternativa para modificar as propriedades do material natural e torná-lo apto para o seu uso. Essa modificação pode ser realizada a partir de processos mecânicos, granulométricos e químicos<sup>3</sup>.

A estabilização compreende a modificação das propriedades geotécnicas dos solos, como a mecânica, permeabilidade, compressibilidade e durabilidade tornando-os aptos para atendimento das especificações normativas. Para fins rodoviários, as técnicas de estabilização podem ser divididas por empregar os meios mecânicos e químicos. O primeiro método ocorre a correção da granulometria e da plasticidade por meio da inclusão ou retirada de partes do solo. Já o segundo, é realizado através do uso de aditivos orgânicos ou inorgânicos como cal, cimento, silicatos de sódio e outros<sup>4</sup>.

O uso da cal como estabilizante é uma prática muito antiga estando presente em construções como a Pirâmide de Shersi há 5000 anos, a muralha da China em 228 a.C, na Via Ápia em 312 a.C. No Brasil, o emprego desse material misturado ao solo, tem obras rodoviárias datadas entre o ano de 1970 a 2000<sup>5</sup>. No Rio de Janeiro, 18 km da Rodovia Sernambetiba, foram construídas com base de solo-cal. Na base dos hangares da antiga Varig, no Aeroporto de Congonhas (SP), a mistura solo-cal também foi utilizada<sup>6</sup>.

A cal é um aglomerante resultante da calcinação dos carbonatos de cálcio (CaO) e de cálcio-magnésio (CaO-MgO)<sup>7</sup>. Com a sua hidratação é obtida a cal hidratada (CH), disposta em forma de pó e a depender da quantidade de água na reação, a cal apresenta textura de creme, lama ou solução saturada<sup>8</sup>. É considerado, um dos estabilizantes mais utilizados e econômicos para o beneficiamento de solos, aplicados à pavimentos e aterros<sup>9</sup>. A cal hidratada pode ser classificada de acordo com sua composição química, podendo ser: CH I, CH II e CH III. O que distingue cada tipo de CH são os teores de cálcio (maior, mais próximo de CH I) e nos teores de carbonatos (menor, quanto mais próximo do CH I)<sup>6</sup>.

A incorporação da cal hidratada ao solo provoca, em suas propriedades geotécnicas, alterações benéficas como a melhora da textura e estrutura do solo, reduzindo a plasticidade e aumentando a resistência mecânica<sup>10</sup>.

. A argila fina (colóides) aglomera e forma partículas maiores, as partículas mais largas (torrões) desintegram e formam partículas menores. Ocorre também um efeito de secagem causado pela absorção de água da hidratação da cal, de modo que a umidade higroscópica do solo é reduzida. Além destes, a mistura solo-cal aumenta as

propriedades de resistência com o tempo de cura<sup>11</sup>.

Os fatores que influenciam o desempenho mecânico do solo beneficiado são variados, como por exemplo: quantidade de cal, porosidade, tempo de cura e teor de umidade. Conhecendo os parâmetros, métodos de dosagem podem ser criados ou adaptados<sup>12</sup>. O tempo e a temperatura de cura são determinantes no crescimento da resistência mecânica de um solo beneficiado com a cal. Comumente, há um acelerado aumento de resistência no início da cura e a velocidade do aumento está ligada com a temperatura. A resistência da mistura solo-cal tem como efeito crucial, o desenvolvimento de produtos pozolânicos, que resulta em mais ligações de cimentação para manter as partículas de solo em contato e em benéfica alteração mineralógica ao aumento da resistência mecânica<sup>4</sup>.

Conforme literatura, as dosagens para estabilização do solo podem ser determinadas em relação à massa de solo seco com teores de 4% a 10% de cal. Para solos granulares, essa porcentagem encontra-se entre 2% a 5%. Em solos plásticos, a incorporação gira em torno de 5% a 10% e para estabilização de subleitos, bases e sub-bases esse teor está na ordem de 2% a 4%<sup>3</sup>.

O presente estudo tem por objetivo analisar a estabilização do solo com a cal, visando verificar as propriedades físicas e mecânicas, determinando a percentagem ótima da cal. Já os objetivos específicos se dividem em verificar o aumento da resistência do solo com a incorporação da cal, encontrar o percentual ótimo de cal para o beneficiamento, verificar os benefícios financeiros e ambientais resultantes do reaproveitamento do solo escavado.

## METODOLOGIA

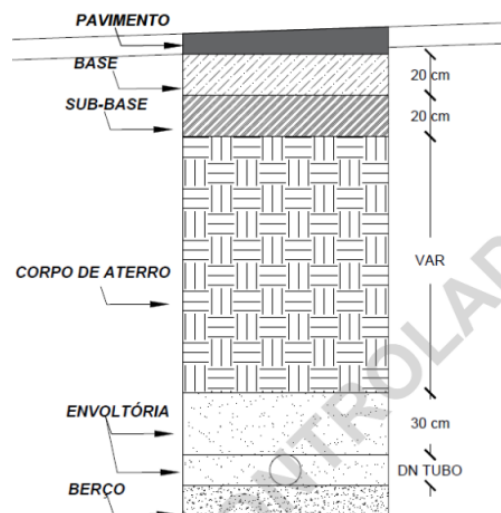
### Contextualização da área de estudo

Este artigo apresenta um estudo de caso de uma obra realizada pela BRK Ambiental, empresa de capital privado com grande atuação no mercado nacional de saneamento. A obra em questão, tratava-se da implantação da Rede Coletora de Esgoto (RCE) do Sistema de Esgotamento Sanitário (SES) do município de Cabo de Santo Agostinho.

A partir do grande volume de solo gerado nas etapas de escavações do terreno, para implantação das redes coletoras de esgoto sanitário, foi identificada a necessidade de se encontrar uma alternativa viável para reutilização deste material. A fim de, reduzir os custos da obra e de mitigar possíveis impactos adversos ao meio ambiente, foram conduzidos estudos com o solo escavado para sua reutilização na camada de reaterro das redes sanitárias.

Para melhor ilustrar, na Figura 01, temos a representação das camadas do reaterro da RCE. O reaterro das valas dava-se na seguinte ordem, a partir da cota de fundo: colchão, envoltória, corpo de aterro, sub-base, base (BGS) e pavimentação. Na obra, já era praticado o reaproveitamento de solo para uso na camada do corpo de aterro por atender aos parâmetros geotécnicos daquela fase do reaterro. Porém, era desejável que a camada da sub-base também pudesse receber o material natural.

Figura 01: Camadas do reaterro

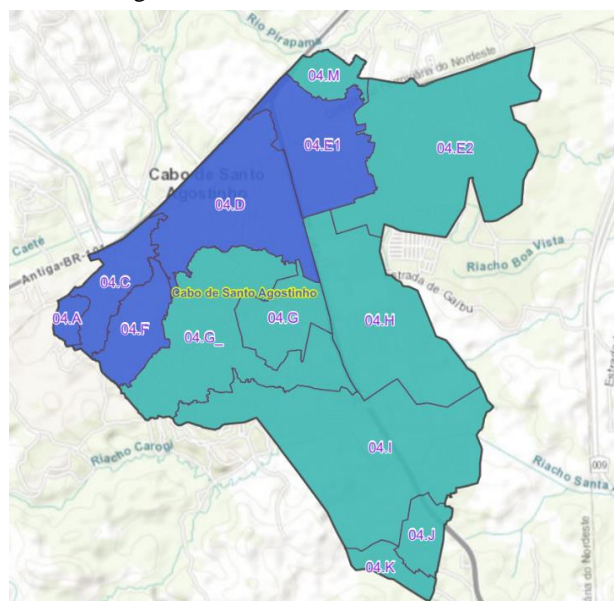


Fonte: BRK Ambiental, 2020

### O Solo

Os solos analisados foram provenientes do Sistema de Esgotamento Sanitário (SES) do Cabo de Santo Agostinho, em específico das sub-bacias A, C, D, E1 e F, localizadas em partes dos bairros da Charnequinha, Malaquias, COHAB, Alto Bela Vista, Santo Inácio, São Judas Tadeu e Centro em destaque na região de cor azul da Figura 02.

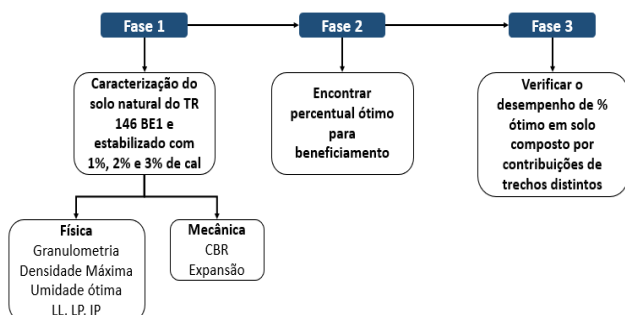
Figura 02 - Bacias do SES Cabo



Fonte: BRK Ambiental, 2022

Com o propósito de estudo para reaproveitamento do solo excedente da escavação das valas foi realizada uma análise referente ao reaproveitamento do solo, através da incorporação da cal no material escavado, para a camada de sub-base do reaterro das valas. O estudo da incorporação da cal ao solo foi realizado em fases, conforme representado na Figura 03.

Figura 03 - Fluxograma do estudo



Fonte: Autora, 2022

Inicialmente, foi coletada uma amostra de solo proveniente do trecho 146 da Rede Coletora de Esgoto da Bacia E1 e executada uma simulação de beneficiamento deste material com 1%, 2% e 3% de cal. Para análise das características físicas e mecânicas das amostras, foram realizados os ensaios indicados no Quadro 01.

Quadro 01 - Ensaios de caracterização

Ensaios	Norma
Análise granulométrica	NBR 7181:1984
Determinação do Limite de Liquidez	NBR 6459:2016
Determinação do Limite de Plasticidade	NBR 7180:2016
Ensaio de compactação	NBR 7182:1986
Índice Suporte Califórnia	NBR 9895:2016

Fonte: Autora, 2022

Todo solo excedente do processo executivo era direcionado ao canteiro de obras, sendo feita inicialmente a análise da amostra natural visando conhecer suas características físicas e mecânicas.

Sendo assim, na Fase 2, foi avaliado qual porcentagem apresentava valores de parâmetros (CBR e expansão) de acordo com as normas do DNIT, determinando assim a porcentagem ótima de cal.

Visto que os solos depositados no canteiro eram compostos por materiais provenientes de trechos distintos, na Fase 3, foi necessária a validação do uso da porcentagem ótima de cal, definida na fase anterior, neste cenário da amostra de solos com diferentes características físicas e mecânicas. Com isto foram realizados ensaios em 3 amostras aplicando o percentual de cal definido na Fase 2.

Para que o solo possa ser reaproveitado nas camadas finais do reaterro da vala, em especial na sub-base, ponto focal do estudo, alguns parâmetros devem ser validados de acordo com definições do DNIT<sup>13</sup>. No Quadro 02 e Quadro 03, são apresentados, respectivamente, os valores mínimos do CBR e os valores máximos de expansão permitidos de acordo com cada camada do pavimento. Estas duas características são encontradas através do ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) que visa mensurar a expansão volumétrica do solo e a sua capacidade de suporte, levando em consideração a granulometria, dureza e coesão, tendo como referência a rocha de origem<sup>14</sup>.

Quadro 02 – Valores mínimos do CBR

Camada de pavimento	CBR mínimo (%)
Subleito	≥ 2
Reforço do subleito	≥ Subleito
Sub-base	≥ 20
Base	≥ 80

Fonte: DNIT, 2006

Quadro 03 – Valores máximos da expansão

Camada de pavimento	Expansão máxima (%)
Subleito	2,0
Reforço do subleito	1,0
Sub-base	1,0
Base	0,5

Fonte: DNIT, 2006

## A Cal

A cal adotada para o beneficiamento foi a Cal Hidratada Callev CH-I, conforme ilustrado na Figura 04. A CH deve atender parâmetros normativos relacionados a condições químicas e físicas. O controle de qualidade é aplicado em toda etapa da produção da cal para garantir um produto puro e que esteja em conformidade com a norma ABNT NBR 7175:2003- Cal hidratada para argamassas<sup>15</sup>.

Figura 04: Cal aplicada no beneficiamento



Fonte: BRK Ambiental, 2021

No Quadro 04 são demonstrados os limites relativos às exigências químicas. Em seguida, no Quadro 05, estão indicadas as exigências físicas definidas por norma.

Quadro 04 - Exigências químicas CH-I

Compostos		Limite
Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )	Na fábrica	≤ 5%
	No depósito	≤ 7%
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO + MgO)		≤ 10%
Óxidos totais na base de não-voláteis (CaO + MgO)		≥ 90%

Fonte: Adaptado da NBR 7175:2003

Quadro 05 - Exigências físicas CH-I

Compostos		Limite
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600mm	≤ 0,5%
	Peneira 0,075mm	≤ 10%
Retenção de água		≤ 75%
Incorporação de areia		≥ 3,0%
Estabilidade		-
Plasticidade		≥ 110%

Fonte: NBR 7175:2003

A cal hidratada escolhida, de acordo com informações do fabricante, atendeu os parâmetros químicos (Quadro 06) e físicos (Quadro 07) estabelecidos pela norma, conforme indicado abaixo.

Quadro 06 - Análise química – Cal Hidratada CH-I

Característica	%
Perda ao fogo	< 23%
Anidrido Carbono	< 1,8%
Anidrido Sulfúrico	< 0,5%
Óxido de Cálcio Total	> 70%
Óxido de Magnésio	< 70%
C <sub>a</sub> O + Mg Não Hidratados	< 3%
Óxidos totais na base não voláteis	> 90%

Fonte: Mineração ouro branco, 2012

Quadro 07 - Análise física – Cal Hidratada CH-I

Característica	%
Retenção peneira 0,600mm	< 0%
Retenção peneira 0,075mm	< 2%
Densidade Aparente Aprox.	0,5g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Mineração ouro branco, 2012

### Estabilização do solo-cal no canteiro de obras

A mistura foi realizada no canteiro de obras, e, em até 2 dias, o material beneficiado retornava para ser aplicado em campo. Essa prática foi replicada em 43 trechos, abrangendo as sub-bacias A, C, D, E1 e F, totalizando aproximadamente 1,4 km.

Nas Figuras 05, 06 e 07 podemos observar o processo de preparação, lançamento e mistura da cal ao solo natural.

Na Figura 05, os operadores despejam a cal na concha da escavadeira.

Figura 05: Preparação da cal para mistura



Fonte: BRK Ambiental,2021

Para realizar a incorporação da cal (Figura 06), foi realizada a “cubação” da concha da escavadeira, e em função do volume calculado foi determinada a quantidade a ser adicionada por concha. A cubação consiste em um método, comum no meio agrário, para medir a área de uma terra<sup>16</sup>.

Figura 06: Lançamento da cal ao solo



Fonte: BRK Ambiental,2021

Após finalizado o despejo da cal no solo natural, é efetuada a mistura dos dois materiais (Figura 07), a fim de, efetuar a incorporação e destinar novamente para a obra.

Figura 07: Mistura do solo com a cal



Fonte: BRK Ambiental,2021

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Estabilização com 1%, 2% e 3% de cal - Amostra do trecho 146 da Bacia E1

Após realizados todos os ensaios, os resultados dos índices físicos da amostra de solo natural coletada do trecho 146 da RCE da Bacia E1 foram determinados. Assim como, suas propriedades após o acréscimo de 1%, 2% e 3%. A seguir podemos observar os resultados.

### Densidade Máxima e Umidade Ótima

Da Tabela 01, observa-se que houve aumento da densidade máxima conforme a dosagem da cal era elevada. Quanto maior a porcentagem de cal hidratada à mistura, maior é a densidade do grão<sup>10</sup>.

Tabela 01 – Índices Físicos do solo - Densidade máxima e umidade ótima das amostras do Trecho 146 da Bacia E1

Solo	Natural	Cal		
		1%	2%	3%
D. M. (g/cm <sup>3</sup> )	1,86	1,88	1,90	1,93
U. O. (%)	11,90	11,20	11,70	12,70

Fonte: Tecomat, 2021

Em análise realizada no solo da caixa de empréstimo nas imediações do aeroporto de Brasília, foram realizados ensaios laboratoriais para caracterizar o solo e verificar suas propriedades com a adição de 2% e 4% de cal<sup>17</sup>. Conforme esperado, as densidades das amostras ensaiadas apresentaram aumento de acordo com a elevação da concentração da cal, tendo resultados como 1,39 g/cm<sup>3</sup> (natural), 1,42 g/cm<sup>3</sup> (2% de cal) e 1,45 g/cm<sup>3</sup> (4% de cal). Logo, observa-se neste estudo que a adição de porcentagens da cal, proporcionaram um aumento da densidade, cenário esse visualizado também nesta pesquisa.

O acréscimo da cal hidratada na mistura gera aumento do teor de umidade ótima, pois a cal atua de forma a absorver água, evitando que o solo seja saturado<sup>10</sup>. Porém, os valores da Tabela 01 refletem comportamento diferente do esperado conforme a dosagem da cal vai aumentando, podendo ter sido ocasionada por erro de ensaio. Para 1% a umidade reduz em 0,7% em comparação com a amostra natural. Na dosagem de 2%, a redução é 0,2% menor do que a amostra natural. Já a amostra com 3% de cal reagiu conforme teoria, apresentando um aumento de 0,8% em relação ao solo natural.

Em pesquisa efetuada no Ceará para verificar a viabilidade de solo argiloso estabilizado com cal para fins de pavimentação, as autoras analisaram a amostra em seu estado natural e estabilizadas com teores de 3%, 5% e 7%. Os resultados obtidos no ensaio de compactação, referente à umidade ótima foram 9,8% (natural), 9,5% (3% de cal), 10,5% (5% de cal) e 10% (7% de cal). Notou-se que para os teores de 5% e 7% houve aumento em relação à amostra natural, porém quando se trata da adição de 3% o valor da umidade ótima reduz<sup>18</sup>.

### LL, LP e IP

Comparando-se os valores da amostra natural com os da amostra melhorada, na Tabela 02, verifica-se que o Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP) sofrem aumento com a adição da cal. Os resultados de LL mostraram que a estabilização com 1% de cal comparada ao do solo natural, trouxe um aumento 3,3%, com 2% do estabilizante o acréscimo foi de 4,4% e com a adição de 3% de cal o aumento do LL foi de 8,6%. Em relação ao LP, os valores adicionais que as dosagens influenciaram foi de 4,9% (para 1% de cal), 6,2% (para 2% de cal) e 8,8% (3% de cal). O Índice de Plasticidade (IP) reduz até a adição de 2%, em 1,6% (1% de cal) e 1,8% (2% de cal) apresentando um aumento para dosagem de 3% de cal, porém ainda 0,2% menor que a amostra natural.



Em solos com predominância de silte na fração fina, há o aumento do LL e LP<sup>19</sup>. O limite de liquidez muda sutilmente, enquanto o limite de plasticidade aumenta consideravelmente e, por consequência, o IP reduz<sup>11</sup>, acarretando a melhora da trabalhabilidade<sup>10</sup>.

Tabela 02 - Índices Físicos do solo - Limites de Atterberg das amostras do Trecho 146 da Bacia E1

Solo	Natural	Cal		
		1%	2%	3%
LL (%)	32,80	36,10	37,20	41,40
LP (%)	19,40	24,30	25,60	28,20
IP (%)	13,40	11,80	11,60	13,20

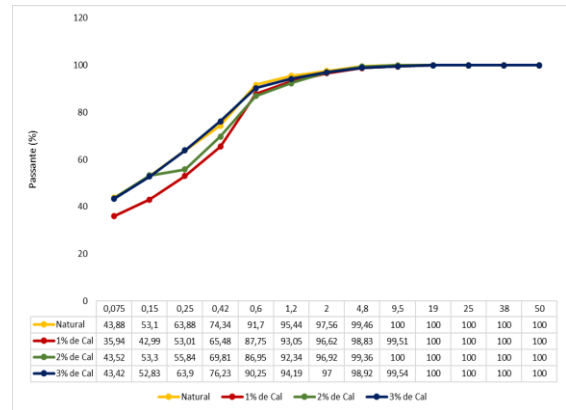
Fonte: Tecomat, 2021

Um estudo realizado na área do APM Manso, no Mato Grosso do Sul, o qual teve como objetivo a análise das propriedades físicas do solo com adição da cal, obteve valores próximos aos observados nesta pesquisa. Com adição de 3%, o autor obteve aumento nos valores de LL e LP, comparado com a amostra natural de, respectivamente, 6% e 3%. Os valores de IP não apresentaram variação significativa<sup>19</sup>.

### Granulometria

Através deste ensaio foi possível traçar as curvas granulométricas, na Figura 08, e avaliar o comportamento do solo de acordo com as porcentagens da cal. O resultado mostra que houve um aumento no percentual retido nas peneiras 1,2 mm e 0,6 mm nos teores da cal de 1% e 2%, indicando um aumento no diâmetro dos grãos. A adição de cal na amostra produz um efeito de aglomeração e floculação por troca iônica em finas partículas de argila, resultando em um solo mais grosseiro, permeável e friável<sup>19</sup>.

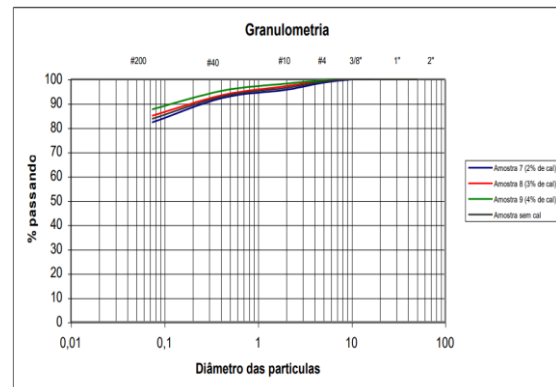
Figura 08 - Curvas granulométricas



Fonte: Tecomat, 2021

Os resultados obtidos com a amostra de solo natural com adição de 3% não foram o esperado, havendo a possibilidade de falha na execução do ensaio. Um caso semelhante ocorreu no ensaio de granulometria representado abaixo da Figura 09, onde o autor justificou que, se os ensaios de granulometria por sedimentação com ou sem defloculante tivessem sido executados, mais evidente seria a atuação da cal no processo de floculação<sup>20</sup>.

Figura 09 - Gráfico da variação da granulometria com teor de cal

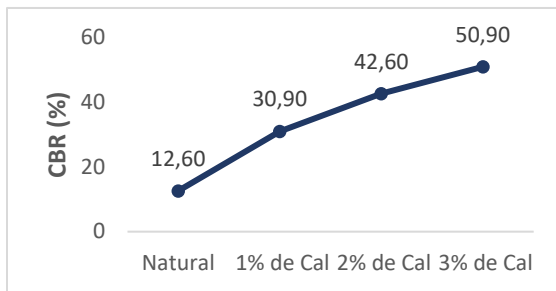


Fonte: Azevêdo, 2010

### Índice de Suporte Califórnia

De acordo com os dados apresentados na Figura 10, houve um acréscimo significativo nos valores de CBR à medida que a adição da cal crescia, sendo todas acima de 20%, atendendo às especificações normativas para camada da sub-base.

Figura 10 - CBR das amostras



Fonte: Tecomat, 2021

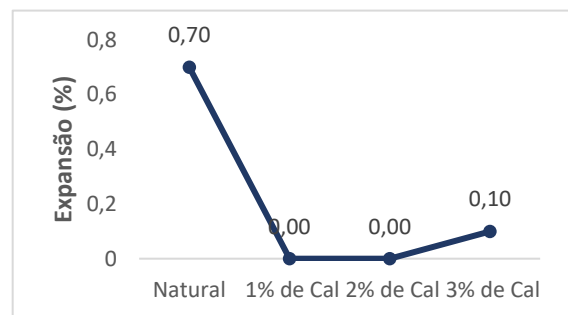
Pode-se constatar que a evolução da resistência mecânica não é linear com o teor da cal<sup>21</sup>. Conforme demonstrado no Gráfico 03, ao relacionar os resultados de CBR do solo natural com os solos que foram beneficiados com 1%, 2% e 3%, tem-se respectivamente um acréscimo de 145%, 238% e 304%. Comparando o crescimento entre as dosagens, observa-se que na primeira dosagem, houve um incremento 18% de CBR. A diferença de resistência entre a amostra de 2% e 1% foi de 11,70% e, por fim, entre a adição de 3% e 2% resultou num acréscimo de 8,3%.

Em pesquisa desenvolvida, nas jazidas Luiz Gonzaga (Jazida 01) e Vila Andorinha (Jazida 02), no município de Caruaru, foram submetidas a ensaios de caracterização das propriedades físicas e mecânicas, solo natural e amostras com adição de 1%, 3% e 5% de cal. Em relação aos valores de CBR, foi notável a crescente de resistência conforme a adição era elevada. Para a Jazida Luiz Gonzaga, os valores de CBR das amostras foram: 13,05% (natural), 13,24% (1% de cal), 64,28% (3% de cal) e 72,98% (5% de cal). Em se tratando da Jazida Vila Andorinha, os resultados do CBR foram os seguintes: 14,02% (natural), 20,3% (1% de cal), 27,07% (3% de cal) e 100,53% (5% de cal). Constatando que os incrementos no percentual da cal geraram ganhos de resistência nos solos, podendo apresentar crescimento de CBR na margem de 600%. Portanto, através dos resultados das caracterizações da pesquisa às jazidas 01 e 02 podemos concluir que condiz com os resultados identificados no presente estudo,

onde o valor de CBR acompanha a tendência de crescimento da incorporação de cal no solo<sup>22</sup>.

A Figura 11 apresenta os valores de expansão de cada amostra. A expansão normalmente diminui à medida que a concentração da cal aumenta. Este comportamento é ocasionado pela redução da afinidade das argilas saturadas por água, devido ao íon de cálcio e pela formação de uma matriz cimentante<sup>19</sup>.

Figura 11 - Expansão das amostras



Fonte: Tecomat, 2021

Nota-se que há uma queda na expansão até a adição de 2% de cal. Porém, a partir deste ponto, a expansão sofre um sutil crescimento. Apesar das amostras pertencerem ao mesmo trecho, há a possibilidade desta última ter propriedades de inferior qualidade em relação às duas primeiras, ocasionando esta elevação, podendo também ter ocorrido erro de execução, visto que não seguiu o comportamento esperado.

Considerando o estudo citado anteriormente, das jazidas Luiz Gonzaga e Vila Andorinha, pôde-se observar que nas amostras da Jazida 01, todas as expansões reduziram a zero o seu valor. Na Jazida 02, semelhante ao ocorrido neste estudo de caso, nas adições de 1% e 3% a expansão foi igual a zero, já com adição de 5% de cal resultou em valor maior, de 1,4%.

### Escolha da porcentagem ótima

Os principais parâmetros a serem aferidos para designar aplicação do solo beneficiado para camada de sub-base são os de CBR e Expansão dispostos na Tabela 03.

Nota-se que todas as amostras apresentaram valores dentro dos parâmetros normativos, onde o CBR deve ser maior ou igual a 20% e a expansão máxima é de 1%. Para garantir uma margem de segurança em comparação com adição de 1% e, por ser mais econômica que a de 3%, foi designada como porcentagem ótima a dosagem de 2% de cal.

Tabela 03 - Propriedades mecânicas – CBR e Expansão das amostras do Trecho 146 da Bacia E1

Solo	Natural	Cal		
		1%	2%	3%
CBR(%)	12,6	30,9	42,6	50,9
Exp.(%)	0,7	0,0	0,0	0,1

Fonte: Tecomat, 2021

#### Aplicação da porcentagem ótima em amostras de solo no canteiro de obras

O solo excedente das escavações das redes de esgotamento sanitário, transportados e armazenados temporariamente numa área do canteiro de obras, trata-se de um material não-controlado. Esta caracterização deve-se a aleatoriedade de sua proveniência, oriunda de vários trechos do contrato. Para verificar se o percentual ótimo atende neste cenário foram realizados ensaios em 3 amostras desse solo.

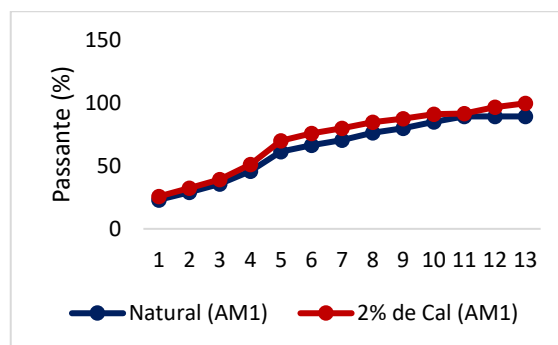
A Tabela 04 e a Figura 12 mostram os resultados das características físicas e mecânicas da amostra de Solo 01 natural e com a incorporação de 2% de cal que contém contribuição de distintos trechos.

Tabela 04 - Índices físicos e propriedades mecânicas (Amostra 01)

Solo 1	Natural	Com 2% de cal
Local de Coleta	Canteiro	Canteiro
CBR(%)	38,00	41,80
Exp.(%)	0,10	0,20
D.M. (g/cm <sup>3</sup> )	2,06	1,93
U.O. (%)	8,90	10,60
LL (%)	30,00	28,40
LP (%)	14,10	20,20
IP (%)	15,90	8,30

Fonte: Tecomat, 2021

Figura 12 - Curva Granulométrica (Amostra 01)



Fonte: Tecomat, 2021

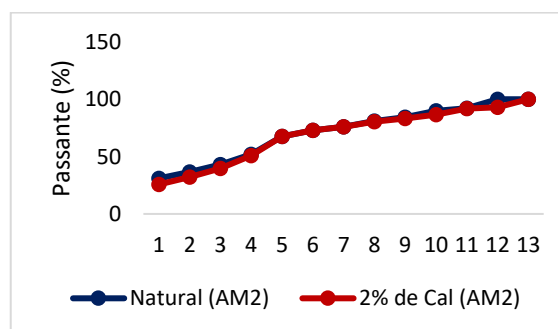
A Tabela 05 e a Figura 13, mostram os resultados das características físicas e mecânicas da amostra de solo 02.

Tabela 05 - Índices físicos e propriedades mecânicas (Amostra 02)

Solo 2	Natural	Com 2% de cal
Local de Coleta	Canteiro	Canteiro
CBR(%)	17,20	29,30
Exp.(%)	0,40	0,20
D.M. (g/cm <sup>3</sup> )	1,96	2,08
U.O. (%)	11,10	8,90
LL (%)	31,70	27,10
LP (%)	19,50	19,20
IP (%)	12,10	7,90

Fonte: Tecomat, 2021

Figura 13 - Curva Granulométrica (Amostra 02)



Fonte: Tecomat, 2021

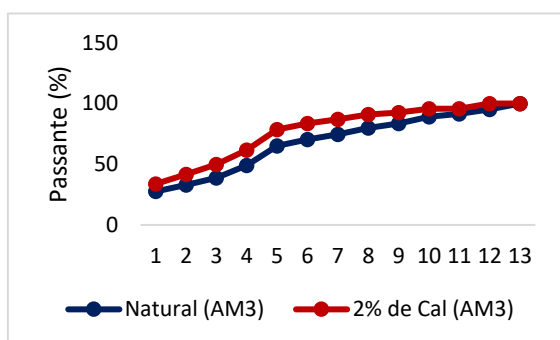
A Tabela 06 e a Figura 14, mostram os resultados das características físicas e mecânicas da amostra de solo 03.

Tabela 06 - Índices físicos e propriedades mecânicas (Amostra 03)

Solo 3 Local de Coleta	Natural Canteiro	Com 2% de cal Canteiro
CBR(%)	20,60	24,20
Exp.(%)	0,30	0,20
D.M. (g/cm <sup>3</sup> )	2,00	1,95
U.O. (%)	9,90	10,70
LL (%)	27,40	27,10
LP (%)	18,40	18,30
IP (%)	8,90	8,80

Fonte: Autora, 2022

Figura 14 - Curva Granulométrica (Amostra 03)



Fonte: Autora, 2022

Conforme resultados encontrados, o incremento de 2% de cal nas amostras de solo 1, 2 e 3 atenderam os requisitos normativos para os valores de CBR e Expansão a serem destinados para a camada de sub-base do reaterro. Os valores de CBR atingiram respectivamente para os solos 1, 2 e 3 valores como 41,80%, 29,30% e 24,20% e os de Expansão apresentaram valores abaixo do especificado como 0,20% em todas as amostras. Os índices físicos, Densidade Máxima, Umidade Ótima, LP e Granulometria apresentaram resultados com tendências distintas entre as amostras, onde em algumas amostras houve aumento e em outras a redução. Apenas o LL e IP que obtiveram redução em todos os solos ensaiados.

## CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Os dados obtidos a partir das análises físicas e mecânicas do solo com a estabilização utilizando a cal, permitiram avaliar quais misturas foram mais viáveis. Através da simulação para beneficiamento do solo com adição de 1%, 2% e 3% de cal foram realizadas as análises dos resultados e verificação de atendimento aos requisitos de resistência mecânica requeridos por norma.

Foi definido como percentual ótimo o uso de 2% de cal. Embora os 3 tipos de dosagens tenham atendido à norma, a escolha foi baseada em critérios de margem de segurança em relação à adição de 1% e, por ser mais econômica comparada a de 3%.

No presente estudo, o uso da cal como estabilizante do solo tem-se apresentado como uma forma eficaz para o aproveitamento do solo excedente da atividade de escavação das redes de esgotamento sanitário analisadas. Este reaproveitamento trouxe benefícios ao contrato objeto deste estudo, tanto na vertente econômica quanto na ótica da sustentabilidade. Após análise econômica realizada em contrato desta obra, e que por questões de Compliance não puderam ser apresentadas, foi observada uma redução do custo de aproximadamente 77% na etapa de reaterro das RCE com a utilização do reaproveitamento do solo excedente *versus* uso de material de jazida, de emissões de carbono e uso de aterros, promovendo a sustentabilidade do projeto.

Pode-se concluir que a incorporação da cal no material primitivo aumentou a sua resistência e reduziu sua expansibilidade permitindo que houvesse reutilização do solo escavado, por atender as características do solo a ser utilizado na sub-base do reaterro de redes coletoras de esgoto.

Com isso, é possível aplicar essa prática nos demais trechos da obra, visto que a análise realizada para este artigo foi referente à 1,4 km de rede coletora do Cabo de Santo Agostinho. Tendo em vista que a BRK Ambiental atua na Região Metropolitana do Recife, os impactos poderão ser de grande relevância para a empresa e sociedade.

## REFERÊNCIAS

1 MAIA, F. L. **O reaproveitamento de resíduos sólidos oriundos da construção civil**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade de Taubaté, Taubaté, 2019. Disponível em: <http://repositorio.unitau.br/jspui/bitstream/20.500.11874/3657/1/000241502pdfa.pdf>. Acesso em: 3 set. 2022.

2 LIMA, Ricardo Paganelli de *et al.* Estabilização de solo laterítico utilizando cinza do bagaço da cana de açúcar e cal hidratada. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro v. 27, n. 1, mai. 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/q7FWrgFdGQbKzDdkWQhVpGj/?lang=pt#> . Acesso em: 3 set. 2022.

3 GRASSE, Bianca et al. Avaliação do comportamento geotécnico de um solo laterítico estabilizado com cal e rejeito de flotação de minério de ferro. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 33., 2019, Balneário Camboriú. **Anais [...]** . Balneário Camboriú: Anpet, 2019. p. 1902-1913. Disponível em: [https://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Infraestrutura/Materiais%20e%20Tecnologias%20Ambientais%20III/2\\_660\\_AC.pdf](https://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Infraestrutura/Materiais%20e%20Tecnologias%20Ambientais%20III/2_660_AC.pdf). Acesso em: 3 set. 2022.

4 ROCHA, Gissele. **Efeito da cal na resposta mecânica de um solo residual maduro: análise da resistência à**

**compressão não confinada, permeabilidade, compressibilidade e efeito da cura acelerada na resistência mecânica**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2018. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/18660/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 10 set. 2022

5 SOUZA, A. **Estudo de Mistura Solo-Cal para Base de Pavimento Rodoviário**. 2014 Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília, 2014. Disponível em: <https://repositorio.uniceub.br/jspui/bitstream/235/6415/1/21041437.pdf>. Acesso em: 10 set. 2022.

6 ARAÚJO, A. F. **Avaliação de misturas de solos estabilizados com Cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do Estado do Ceará**. 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/1447>. Acesso em: 10 set. 2022.

7 LOVATO, Rodrigo. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/6646/000444396.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 10 set. 2022.

8 OLIVEIRA, Eduardo. **Emprego da cal na estabilização de solos finos de baixa resistência e alta expansão: estudo de caso no município de Ribeirão das Neves/MG**. 2012. Dissertação (Mestrado

em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, 2012. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/93651>. Acesso em: 10 set 2022.

9 QUARIQUASI, José. Estudo da capacidade de suporte da estabilização de solos para pavimentação rodoviária. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 2018, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: Abms, 2018. p. 1-18. Disponível em: <https://marcosporto.eng.br/wp-content/uploads/2018/01/Estudo-da-Capacidade-de-Suporte-da-Estabiliza%C3%A7%C3%A3o-de-Solos-para-Pavimenta%C3%A7%C3%A3o-Rodovi%C3%A1ria.pdf>. Acesso em: 3 set. 2022.

10 GUÉRIOS, Eduan. **Estudo do Melhoramento de Soloco com Adição de Cal Hidratada para seu Uso em Pavimento Urbano**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção Civil) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012. Disponível: [https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8388/2/CT\\_EPC\\_2012\\_2\\_17.PDF](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8388/2/CT_EPC_2012_2_17.PDF). Acesso em: 15 set. 2022

11 TEIXEIRA, Wagner. **Comportamento mecânico de misturas solo, cal e RCD para uso em pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019. 100 f. Disponível em: [https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/4201/1/CT\\_PPGEC\\_M\\_Teixeira%20C%20Wagner\\_2019.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/4201/1/CT_PPGEC_M_Teixeira%20C%20Wagner_2019.pdf). Acesso em 15 set. 2022.

12 TEIXEIRA, Wagner. . Estabilização de um solo silte arenoso da Formação Guabirotuba com cal para uso em pavimentação. In: CONGRESSO

BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 2018, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: Abms, 2018. p. 1-7. Disponível em: <https://marcosporto.eng.br/wp-content/uploads/2018/01/Estudo-da-Capacidade-de-Suporte-da-Estabiliza%C3%A7%C3%A3o-de-Solos-para-Pavimenta%C3%A7%C3%A3o-Rodovi%C3%A1ria.pdf>. Acesso em: 3 set. 2022.

13 DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (Brasil). **Manual de pavimentação, 2006**. Rio de Janeiro, 3.ed. 274p. Disponível em: <https://marcosporto.eng.br/wp-content/uploads/2018/02/Manual-de-Pavimentacao-719-DNIT-2006.pdf>. Acesso em: 16 set. 2022

14 SUPORTE Solos. **O ensaio ISC - Índice de Suporte Califórnia, também conhecido como CBR - California Bearing Ratio e suas normas técnicas**. São Pedro, 2021. Disponível em: <https://www.suportesolos.com.br/blog/o-ensaio-isc-indice-de-suporte-california-tambem-conhecido-como-cbr-california-bearing-ratio-e-suas-normas-tecnicas/236/>. Acesso em: 16 set. de 2022.

15 MINERAÇÃO Ouro Branco. **Ciclo do Calcário**. Rosado, 2012. Disponível em: [http://www.mineracaoourobranco.com.br/rodutos\\_callev.html](http://www.mineracaoourobranco.com.br/rodutos_callev.html). Acesso em: 16 set de 2022.

16 SILVA *et al.* Análise Sistemática do Método Empírico de Medição de Terras. – **Revista de Educação Matemática e Tecnológica Iberoamericana**. v. 12, n. 1, 2021. Disponível em: [https://periodicos.ufpe.br/revistas/emteia/article/download/248369/pdf\\_1](https://periodicos.ufpe.br/revistas/emteia/article/download/248369/pdf_1). Acesso em 16 set 2022.

17 JÁCOME, Diego Aires, *et al.* Estudo do uso da cal para reduzir a umidade e aumentar o CBR. 2018. 28 f. Artigo (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ucb.br:9443/jspui/handle/123456789/11878>. Acesso em: 16 set. 2022.

18 OLIVEIRA, Viviane, *et al.* Análise mecânica de um solo areno-argiloso estabilizado com cal para fins de pavimentação. **Conexões Ciência e Tecnologia**. Fortaleza, v. 3, n. 3, p. 24 -32, dez. 2019. Disponível em: <http://conexoes.ifce.edu.br/index.php/conexoes/article/download/1274/1343>. Acesso em: 22 set. 2022.

19 PEREIRA L.A; CARVALHO D.C. O uso da cal para a estabilização dos solos utilizados na engenharia. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v.15, n. 6, 2021, pp. 144-165. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/solos-utilizados>. Acesso em: 16 set 2022

20 AZEVEDO, André. **Estabilização de solos com adição de cal:** um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2281>. Acesso em 16 set. 2022.

21 PORTELINHA, Fernando. **Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários:** mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, 2008. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/3695/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em 16 set. 2022.

22 CABRAL, Alexandre. Análise de melhoramento de solos com adição de cal hidratada para utilização em base e sub-base de pavimentos. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA., 75., 2018, Maceió. **Anais [...]**. Maceió: Confea, 2018. p. 1-5. Disponível em: [https://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2018/civil/26\\_admdscadc hpuebesdp.pdf](https://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2018/civil/26_admdscadc hpuebesdp.pdf). Acesso em: 16 set. 2022.

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Elda, em memória, por ser o farol da minha vida. Ao meu pai, Aguinaldo, pelo suporte e dedicação. À minha irmã, Juliana, pela torcida e carinho. À minha sobrinha, Mariana, por tornar meus dias mais coloridos. À minha noiva, Emilly, pelo incentivo e companheirismo. Aos funcionários da BRK Ambiental, Diogo Dantas, Fellipe França e Paulo Bandeira, pelo auxílio técnico. Ao meu orientador, Dr. André Borgatto e a coorientadora, Dra. Thalita Porto, pelos direcionamentos e ensinamentos.