

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
técnica

IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas

IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens

VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens

XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia

23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Estabilização de solo com cal para controle de erosões em Plantas Fotovoltaicas

Cecília Ribeiro Tourino Costa

Engenheira Civil, TEC3, Belo Horizonte, Brasil, ctourino@tec3engenharia.com.br

Marcela Laert Moreira

Mestranda, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, marcela.laert09@gmail.com

Aloysio Portugal Maia Saliba

Professor adjunto, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, asaliba@ehr.ufmg.br

RESUMO: A instalação de parques fotovoltaicos demanda extensas áreas que podem sofrer com erosão do solo. Uma solução adequada é a aplicação de cal para melhorar as características do solo, como a resistência mecânica, estabilidade, trabalhabilidade, durabilidade e resistência à erosão interna e superficial. Este tratamento do solo é de particular importância ao lidar com estruturas hidráulicas concebidas nos sistemas de drenagem do parque solar. Os testes de erodibilidade foram realizados em solo de um complexo fotovoltaico em um aparato EFA construído para medir a taxa de erosão de solos coesos e não coesos em diferentes vazões. O ensaio consistiu em medir a erodibilidade do solo natural e com adição de 3% de cal virgem em massa para velocidades de escoamento de 1,0 m/s, 1,75 m/s e 2,5 m/s. As amostras foram preparadas usando as energias de compactação Proctor Normal e 30% Proctor Normal para simular a compactação ideal e de tráfego do equipamento durante o período de instalação. Os experimentos indicaram que a erodibilidade dos solos tratados com cal representaram entre 26% e 12% dos valores obtidos de solos não tratados e sob compactação reduzida. Para compactação controlada os valores variaram de 16% a 7%. Os resultados representam uma redução significativa da erosão do solo tratada com cal mesmo com compactação reduzida, mostrando-se uma solução eficiente, econômica e sustentável para o controle da erosão.

PALAVRAS-CHAVE: Erosão, estabilização do solo, cal, Parque solar.

1 Introdução

A implantação de parques fotovoltaicos no Brasil é bastante recente, caracterizando-se como um empreendimento de elevado destaque, especialmente considerando requisitos ambientais relativos à utilização de energia limpa e renovável. Os parques solares constituem de ambientes diferenciados no que concerne aos aspectos de drenagem pluvial e controle de erosão. Durante a implantação e na fase de operação, alguns tópicos são de grande relevância para compreensão do problema. Cita-se a retirada da cobertura vegetal e cobertura superficial do solo, a formação de locais concentradores de fluxo e as alterações na superfície do parque. Sendo assim, as soluções de controle de erosão devem ser averiguadas de forma particular com o objetivo de abranger todos os aspectos específicos no empreendimento.

Ainda hoje, questões relativas à erosão são consideradas complexas com influência multivariada de fatores, ocasionando diversas consequências socioambientais e econômicas. A erosão consiste em processos em solos ou rochas onde são desagregados, dissolvidos ou desgastados e transportados de um ponto a outro pelos agentes erosivos. Um dos aspectos de grande relevância no entendimento dos processos erosivos é a erodibilidade do solo. Desta forma, configura-se uma opção atrativa a melhoria das condições do solo, garantindo melhor estabilidade, durabilidade e resistência à erosão hídrica (Sales *et al.* (2017).

A estabilização de solos com cal é uma técnica consolidada e utilizada em obras de terraplenagem, incluindo rodovias, aterros, bases de fundações, diques, entre outros (Wilkinson *al.*, 2010). A estabilização química do solo com adição de cal tem como principal resultado o aumento da coesão e resistência mecânica e maior trabalhabilidade e durabilidade do solo, desencadeado pelas reações químicas entre os constituintes mineralógicos do solo, em especial a argila, e a cal (Bell, 1996; Azevedo, 2010; Mehenni *et al.*, 2016). De acordo com Herrier *et al.* (2018), diversos estudos permitiram a avaliação de diques construídos com e sem



adição de cal. As principais conclusões obtidas através dos vários experimentos demonstraram que o solo tratado com cal demonstraram os seguintes benefícios: aumento da estabilidade mecânica, baixa permeabilidade, resistência à erosão interna, proteção da superfície e resistência ao escoamento.

Em virtude disso, o tratamento de solos com cal para os parques fotovoltaicos pode configurar de grande interesse por ter se apresentado como um recurso capaz de dar resposta a três questões fundamentais: “eficiência, economia e sustentabilidade” (NEVES, 2009). Assim, a melhoria da condição do solo é uma opção interessante, garantindo melhor estabilidade, durabilidade e resistência à erosão hídrica (Sales *et al.*, 2017).

2 Estabilização química com a cal

A NBR 6453 (2003) define a cal como sendo um “produto obtido pela calcinação de carbonatos de cálcio e/ou magnésio, constituído essencialmente de uma mistura de óxido de magnésio, ou ainda de uma mistura de óxido de cálcio, óxido de magnésio e hidróxido de cálcio”. Segundo a norma, a cal pode ser utilizada de diferentes formas, destacando-se a cal hidráulica para tratamento do solo.

A estabilização química com adição de cal tem como principal objetivo aumentar a resistência mecânica e adquirir maior trabalhabilidade e durabilidade do solo. Na literatura, esta técnica de tratamento é relacionada apenas a solos de grãos finos como siltosos solos ou solos argilosos (Elandaloussi *et al.*, 2018). A mistura de cal no solo úmido permite que a presença de água imponha a formação de íons de cálcio (Ca^{++}), proporcionando uma grande concentração de cátions livres dispostos a substituir permanentemente outros íons metálicos do solo, caracterizando-se o fenômeno denominado troca catiônica (Dalla Rosa, 2009). Tal reação está ligada com as características mineralógicas do solo e da presença de cátions que podem configurar em uma combinação mais estável, onde menos cátions podem modificar a nova configuração.

Consecutivamente à troca iônica, haverá um aumento da atração iônica entre as partículas, resultando em um agrupamento, modificando a orientação laminar e sucedendo em um comportamento mais isotrópico. Outro fator que favorece o agrupamento das partículas é função da redução da dupla camada iônica. Pode-se considerar que o efeito físico desta floculação entre partículas de argila e cal seja semelhante a um aumento do diâmetro das partículas, com o conseqüente acréscimo de resistência por atrito entre elas (Azevedo *et al.*, 1998). Além disso, verifica-se o deslocamento da curva granulométrica para o lado grosseiro, alteração do índice de plasticidade, redução do valor da densidade máxima seca, aumento do valor da umidade ótima e aumento da capacidade de suporte (Neves, 2009). No entanto, o ganho de resistência normalmente compensará as alterações na compactação ótima, não devendo ser considerado como desvantajoso (Bell, 1996).

Outro processo relevante é a cimentação do solo que se deve à reação química entre a cal, a água e os elementos pozolânicos do solo. As reações dão origem aos compostos de silicatos e alumínio hidratados de cálcio, semelhantes ao produto obtido pela hidratação do cimento Portland no concreto e no solo-cimento (Azevedo *et al.*, 1998). Estas reações são irreversíveis. O aumento da resistência ao cisalhamento e da coesão, em longo prazo, está relacionado com as reações de cimentação citadas. Estudos mostram que a coesão apresenta uma crescente melhoria até dois anos de aplicação, já o ângulo de atrito demonstra-se estável com presença de cal. (Herrier *et al.*, 2014).

O quarto processo identificado é a carbonatação, sendo uma reação entre a cal e o dióxido de carbono. Azevedo (2010) ressalta que a carbonatação deve ser evitada, já que diminui a disponibilidade de cátions de cálcio na superfície das partículas de argila, prejudicando as reações pozolânicas que produzem compostos cimentantes mais resistentes, desse modo, é necessário que a camada estabilizada seja protegida quanto à presença do dióxido de carbono do ar.

A eficiência das reações de tratamento do solo com a cal é afetada por diversos fatores, como a porcentagem de argila no solo, o Índice de plasticidade, as características mineralógicas das argilas e a presença de determinadas substâncias indesejáveis para as reações (sódio, potássio, sulfato e matéria orgânica). Além disso, para ocorrências das reações pozolânicas mencionadas, o pH do meio tem de ser manter alto ($\text{pH} > 10,5$) para que se libertem a sílica e o alumínio da argila (Neves, 2009).

Os métodos de dosagem indicados por Neves (2009) estão dispostos em normas e manuais franceses que estabelecem métodos de dosagem para tratamento do solo utilizado em leito de pavimentos e em aterros. Os procedimentos mais utilizados têm como objetivo identificar a dosagem de cal que condiciona a maior



resistência. O Método do Texas define a percentagem de cal com base na granulometria e Índice de Plasticidade. Já o Eades e Grim (Método do pH) determinar o valor a ser adicionada ao solo de modo a alcançar um aumento do pH até 12,4, comumente utilizado no Brasil para aplicação em estradas (Lovato, 2004). Por fim, o Método do GTS, que utiliza o índice de capacidade de carga imediato do solo com a umidade provável no momento da sua aplicação. Indica que todos os ensaios devem caracterizar o solo, a cal e o composto solo-cal. Destaca-se que a maioria dos solos necessita entre 2% e 5% de cal (NEVES, 2009). Já segundo Jair *et al.* (2018) a quantidade de cal usada está entre 3% e 9%, e o tempo de cura usado varia de 7 a 360 dias.

O efeito do tempo de cura no interno taxa de erosão medida por Hole Erosion Teste (HET), conforme relatado por Herrier *et al.* (2018), apresentou redução expressiva para o coeficiente de erosão para cura mais longa vezes (medido após 3, 7 e 14 dias). A aplicação do tratamento com cal para camadas de cobertura e aterros já é uma técnica difundida. No entanto, este campo ainda está em avaliação quanto ao seu uso para estruturas hidráulicas. Estudos recentes investigaram a aplicação em diques, canais, pequenas barragens e bacias de retenção. Funções como trabalhabilidade, estabilidade e baixa permeabilidade têm sido extensivamente estudado e consolidou referências. No entanto, erosão interna e superficial, assim como problemas de escoamento devem ser mais investigados para expandir o uso desta técnica em obras hidráulicas. Diversos estudos realizados pelo projeto DigueElite, iniciado em 2013, permitiram avaliar diques construídos com adição de cal e natural. Segundo Herrier (2018) as principais conclusões foram:

- Estabilidade: com aumento da estabilidade mecânica possibilita a utilização de taludes mais inclinados. Conferindo vantagens para baixa disponibilidade de materiais e espaço limitado;
- Baixa permeabilidade: os resultados demonstraram que o solo tratado com cal pode manter o mesmo nível de permeabilidade que os solos sem tratamento, não necessitando sistema de estanqueidade;
- Resistência interna à erosão: permite simplificação de filtros e sistema de drenagem. No entanto, continua a ser obrigatório estudar o dispositivo de proteção contra erosão interna na interface de aterro / fundação. Filtros limitados e dispositivo de drenagem podem simplificar a seção para construção e reduzir a necessidade de materiais nem sempre disponíveis no local;
- Proteção de superfície: como o aterro tratado com cal é resistente à erosão, as proteções como rip-rap, gabiões, podem não ser mais necessárias.
- Resistência ao escoamento: resistência em altas velocidades de fluxo pode ser o principal benefício de solo tratado com cal. Assumindo resistência a velocidades, o próprio aterro pode desempenhar o papel de vertedouro.

4 Estudo de caso

O estudo de caso se refere ao Conjunto Gerador Fotovoltaico com potencial de geração de energia nominal de 132 MW e ocupa uma área de aproximadamente 320 ha. O arranjo geral do parque consta 487.080 placas, 36 Inversores transformadores, uma rede de acessos com aproximadamente 16 km e aproximadamente 11 km de cerca. O período de instalação do parque tem previsão de duração de um ano e meio, caracterizando um período de intensa modificação da região. Segundo Sales *et al* (2006), o problema geralmente se inicia na fase de implantação do loteamento com desmatamentos, abertura de ruas sem o devido planejamento de ocupação e falta de implantação de obras de infraestrutura como os sistemas de drenagem. Na área de estudo houve retirada contínua da cobertura vegetal e da camada superficial do solo (Topsoil), que com os primeiros eventos pluviométricos resultaram em processos erosivos e transporte de sedimentos para áreas externas.

A retirada da cobertura superficial do solo, além de implicar na perda de matéria orgânica que aumenta a erodibilidade do solo, resulta na perda do substrato necessário para o crescimento vegetal. Em locais onde o solo superficial não é substituído ou está contaminado com o subsolo, o atraso no reestabelecimento da vegetação pode se estender por anos, deixando-o com maior suscetibilidade à erosão. Adicionalmente, salientam-se as obras de terra, que configuram alterações na topografia do parque para instalação das placas, sendo necessário suavizar a superfície de modo a uniformizar para disposição do arranjo de placas. Tal alteração pode acarretar mudança do regime de escoamento, remodelando caminhos preferenciais da água. Além disso, o material oriundo de obras de terra também pode sofrer processos

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
técnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

erosivo e áreas como bota-fora, devendo-se abranger de adequado manejo e controle de disposição de materiais não consolidados.

Avaliações em pontos concentradores de fluxo também são de grande interesse para estudo do problema. Conforme Sales *et al* (2006), as obras lineares são mais suscetíveis aos processos erosivos. Isso se deve ao fato de essas estruturas concentrarem e acumularem fluxo. Nas plantas fotovoltaicas estão nesse caso acessos, linhas de transmissão, canais e cercas com vigas baldrames. Em geral os requisitos para definir a rede de estradas e cercas pode não levar em consideração a topografia, resultando na localização em áreas menos desejáveis como talvegues naturais. Não obstante, ressalta-se que o controle de geração de sedimentos e poeiras providas do tráfego de maquinários, afetam negativamente diversos aspectos como: sistema de drenagem (projetar estruturas de contenção de sedimentos), eficiência de geração de energia das placas fotovoltaicas (prever lavagem das placas quatro vezes ao ano durante vida útil do parque) e necessidade de umectação dos acessos internos do parque nos períodos secos (contratar caminhão pipa). Todos os pontos mencionados acarretam custos para o empreendimento, podendo ser minimizados por tratamentos do solo.

A aplicação de cal no solo em áreas determinados podem possibilitar uma solução interessante do ponto de vista ambiental e econômico. Além de atender a questões de controle de erosão, dispersão de poeira sobre as sob as placas e em estruturas hidráulicas presentes no sistema de drenagem. Consideram-se como pontos de aplicação promissores os concentradores de fluxos como acessos, cercas, assim como talvegues naturais com declividade elevadas; estruturas hidráulicas do sistema de drenagem como taludes das bacias de detenção, leiras, áreas à jusante de dissipadores de energia, base de muros gabiões e nos canais hidráulicos; possibilitando a alternativa de adotar canais escavados em solos estabilizados a depender das condições de declividade e vazão projetada. Os benefícios destas aplicações teriam como base garantir uma melhor estabilidade e durabilidade, exigindo menos esforços de manutenção e configurando menos riscos de erosão.

Ressalta-se que esta técnica deve ser avaliada para ambientes que também apresentam questões relacionadas à erosão, como áreas de mineração. Conforme descrito por Zhang *et al.* (2015), os processos de mineração modernos podem impactar significativamente a paisagem eliminando vegetação e alterando permanentemente a topografia, solos e estruturas geológicas subterrâneas.

5 Metodologia

A metodologia adotada para comprovar o aumento da resistência à erosão de solos tratados com cal consiste na realização de testes em um aparato desenvolvido no CPH/UFMGO Erosion Function Apparatus é um aparato do tipo pistão, desenvolvido e apresentado por Briaud (2001) capaz de medir a taxa de erosão de solos coesivos e não coesivos sujeitos a diferentes velocidades de escoamento. Os resultados são apresentados em forma gráfica, segundo a taxa de erosão calculada, pela velocidade de escoamento e/ou tensão cisalhante empregada pelo fluxo. A erodibilidade é função dos tempos observados durante a execução do ensaio para se erodir na totalidade uma amostra com altura pré-determinada.

Uma parceria entre a UFES, UFMG e a empresa TEC3 Geotecnia e Recursos Hídricos Ltda., foi desenvolvido no Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH/UFMG), um aparato para determinar a erodibilidade de um solo com a coordenação dos professores Carlos Barreira Martinez (UNIFEI), Aloysio Portugal Maia Saliba (UFMG) e Patrício José Moreira Pires (UFES) e do engenheiro Fernando Portugal Maia Saliba. O aparato de teste foi confeccionado em aço, com caixa de inspeção em acrílico. Consiste em um conjunto moto-bomba, com capacidade máxima até 68 m³/h, e velocidade média de escoamento máxima de 2,5 m/s; (MANTOVANELLI, 2016). No centro desta caixa, foi aberta uma passagem com 45 mm de diâmetro e instalada uma tubulação de PVC como guia para a amostra de solo. O ajuste entre a (amostra) e a tubulação guia se faz através do atrito lateral ao longo das suas áreas superficiais.

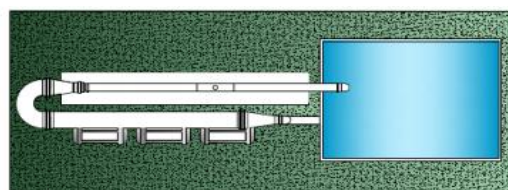
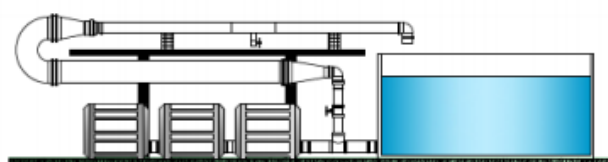


Figura 1: Vista lateral e em planta do aparato de teste – EFA (Fonte: MANTOVANELLI, 2016).

A amostra de solo foi coletada no conjunto gerador fotovoltaico e todas as características geotécnicas referente ao solo foram coletadas segundo o relatório de Sondagem a Percussão (SPT). Conforme relatório, o solo é caracterizado com argila arenosa, vermelho, plástico. Para umidade ótima foi definido valor referente à média determinada de diversos pontos do parque 27,2% valor este que foi utilizado nos ensaios para moldar os corpos de prova sem adição de cal.

Segundo Neves (2009), a maioria solos requerem entre 2% e 5% de cal. No estudo, foi considerado um valor intermediário de 3%. Além disso, os autores consideraram que o teor de umidade ideal aumenta de 0,5% para 1,0% com a adição de cal para a mesma energia de compactação, considerando a necessidade que a cal tem de se hidratar, para iniciar as reações com o solo. (Azevedo *et al.*, 1998).

Investigou-se o comportamento erosivo do solo natural e tratado com cal para diferentes velocidades de fluxo através de um aparato semelhante ao Erosion Function Apparatus - EFA, apresentado por Briaud *et al.* (2001). O ensaio foi realizado com 23 corpos de provas, de modo a medir três resultados referentes a cada velocidade de fluxo para o solo natural e o solo com adição de 3% de cal Hidratada, fornecida pela Lhoist. Os corpos de prova também foram moldados em dois estados de compactação, um na energia de compactação Proctor Normal e em compactação reduzida, com cerca de 30% Proctor Normal. Tal condição simula o estado da área após a instalação, avaliando-se, pontos que se aproxima ao tráfego normal de veículos no período de instalação. Os corpos de prova possuíam dimensões de 40 mm de diâmetro e 165, cm de altura.

A metodologia utilizada para preparo das amostras consistiu em seis etapas: (I) Determinação da umidade natural do solo utilizando microondas, conforme critérios dispostos por Tavares *et al.* (2008); (II) Adição de água para garantir a umidade ótima de compactação ($w_{ot} = 27,2\%$); (III) Adição de 3% em parte da amostra, homogeneizando o solo com a quantidade de água referente a umidade ótima, tomando-se como referência o peso seco do solo + cal; (IV) Compactação dos corpos de prova em 3 camadas de 5,5 cm, utilizando um soquete de 1,075 kg, 5 cm de altura de queda e 76 golpes considerando mesma energia de compactação no ensaio Proctor Normal; (V) Compactação 1/3 da Energia previamente utilizada (26 golpes) (VI) Armazenamento das amostras por uma semana como tempo de cura para os solos com adição de cal, mínimo tempo de cura sugerido por Baldovino *et al.* (2018).

Após preparo dos corpos de prova eles foram submetidos ao ensaio EFA, eleva-se manualmente a amostra com auxílio do pistão à referência de 1,0 mm de altura pré-estabelecida com trena (Figura 2). Em seguida, ajusta-se a vazão necessária à obtenção da velocidade média de escoamento desejada, definindo também as rotações das bombas por meio dos inversores de frequência. Através da inspeção visual, anota-se o tempo necessário para erodir a amostra em sua totalidade, para $t < 5$ min. Com $t = 5$ min, paralisa-se o ensaio de erosão para a velocidade de teste adotada e mede-se a altura final do corpo de prova.

A velocidade de fluxo utilizada levou em consideração a capacidade de vazão da bomba motorizada (68 m³/h), resultando em uma velocidade de 2,50 m/s para as dimensões do equipamento. A velocidade mais baixa foi determinada segundo a velocidade de início para formação de erosão em solos coesos compactados de aproximadamente 1,00 m/s (Chow, 1959). Portanto, os testes incluídos uma medição intermediária no meio deste intervalo de velocidade (1,75 m/s).

A partir dos valores de tempo necessário para que se eroda a altura da amostra de solo exposta a um fluxo com velocidade conhecida, a taxa de erosão será calculada através da razão entre a altura da amostra pelo tempo em horas, segundo a equação a seguir:

$$\dot{Z} = \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{h}{t} \quad (1)$$

Na qual, $\dot{Z}$ é a taxa de erosão do solo para uma velocidade de teste (mm/h); h é a altura da amostra de solo erodida (mm); e, t é o tempo necessário para ocorrer a erosão total da amostra (h).



Figura 2: Posicionamento da amostra para início do teste EFA.

6 Resultados

Os resultados obtidos demonstraram uma redução considerável no fator erodibilidade do solo quando estabilizado com a cal para ambos os ensaios de compactação Proctor Normal e compactação reduzida. A erodibilidade indicada é a média dos corpos de prova submetidos aos mesmos critérios de cada ensaios, conforme apresentado na Tabela 1 e na Figura 3.

Tabela 1: Erodibilidade média para solo natural e com adição de cal em duas condições de compactação e três velocidades de ensaio.

Compactação	Velocidade de ensaio (m/s)	Erodibilidade (mm/h)					
		Solo tratado com cal (adição de 3% de cal)			Solo Natural		
		Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 1	Sample 2	Sample 3
Reduzida (30% NP)	1,00	612	-	-	2340	-	-
	1,75	708	678	897	1920	4428	-
	2,50	840	1644	792	8100	9432	-
Proctor Normal (NP)	1,00	-	-	-	1008	2862	-
	1,75	504	372	-	3384	2113	-
	2,50	228	480	-	3471	1800	8400

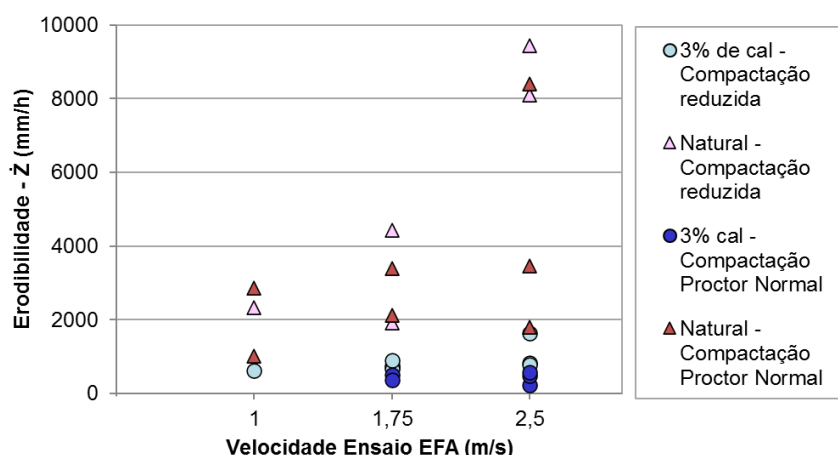


Figura 3: Resultado Ensaio EFA - Erodibilidade do solo natural e com adição de cal (Compactação Proctor Normal e 30% Proctor Normal).

Os resultados apresentados corroboram com três questões principais em torno da erodibilidade do solo, em que se espera maior susceptibilidade à erosão solos expostos a uma maior velocidade de escoamento (ou tensão cisalhante), solos com menor grau de compactação e solos sem tratamento químico. A adição de cal permitiu a redução da erodibilidade de forma significativa para as três condições de



velocidade e as duas condições de compactação. A erodibilidade de solos tratados com cal representa entre 26% e 12% dos valores obtidos de solos sem tratamento e em condição de compactação reduzida. A relação passa de 16% a 7% para a condição de compactação controlada.

O solo tratado com cal e próximo da compactação Proctor Normal, evidenciou valores abaixo de 500 mm/h para velocidades de 1,75 m/s e 2,50 m/s. Quando comparado para a mesma condição de compactação, solos sem adição de cal apresentaram valores entre 1000 mm/h e 4500 mm/h.

Na maioria dos ensaios realizados com a cal pode-se observar a formação de uma superfície hidrodinâmica estabilizada. Para estudos posteriores considerar a utilização de incremento da vazão para analisar a erodibilidade para velocidades superiores. Nos casos da compactação reduzida o solo natural erodia basicamente com a velocidade de ascensão do pistão. Verificou-se também que a dispersão do solo com cal se dava de forma mais coloidal, de modo a mostrar maior coesão entre grãos. Tal efeito pode ser considerado vantajoso por permitir que as partículas destacadas se decantem com maior facilidade, combatendo o aumento da turbidez. Sugere-se que essa hipótese seja investigada em outro trabalho.

O efeito da compactação do solo na erodibilidade é de grande relevância, segundo Saliba (2009) a taxa de erodibilidade é reduzida consideravelmente para uma melhor compactação. Avaliando-se as condições de compactação, os solos sem aplicação da cal, reduziram entre 13% a 48% da erodibilidade para condições de compactação reduzida. Os resultados com adição de cal indicaram que mesmo para a compactação reduzida, a adição de cal proporcionou valores abaixo da erodibilidade para solos rigorosamente compactados. A relevância pode ser de grande valia para locais onde não seja possível realizar a compactação adequada, seja por dificuldade de acesso, falta de maquinário ou condições climáticas inadequadas.

Além disso, os resultados indicados para a compactação Proctor Normal com adição de cal indicam um grande ganho de resistência apenas com uma semana de cura, o que já é um bom indicativo de aplicação nas superfícies citadas para combate à erosão. Segundo estudos, esta erodibilidade tende a diminuir quanto maior tempo de cura para formar as reações pozolânicas da cal, podendo apresentar ganho de resistência após dois anos de aplicação, conforme resultados apresentados por Herrier *et al.* (2014) com aumento de resistência do solo à erosão após dois anos de aplicação.

7 Conclusão

A aplicação da cal no solo tem como benefício garantir funções como trabalhabilidade, estabilidade, baixa permeabilidade, resistência a erosão interna e superficial podem ser indicadores relevantes como forma de solução para contenção de erosão. Os resultados obtidos neste estudo indicaram que a erodibilidade de solos tratados com cal representa entre 26% e 12% dos valores obtidos de solos sem tratamento e em condição de compactação reduzida. A relação passa de 16% a 7% para a condição de compactação controlada.

No caso de parques fotovoltaicos foram elencados pontos de aplicação os locais como acessos, cercas, talvegues naturais com declividade elevadas; estruturas hidráulicas do sistema de drenagem como taludes, leiras, jusante de dissipadores de energia, base de muros gabiões e nos canais hidráulicos. Destaca-se que a aplicação também deve ser avaliada para outros ambientes com questões ligadas a erosão, como mineração.

Vale ressaltar que alguns pontos eventualmente interferiram na análise de resultados, portanto sugere-se para próximos experimentos realizar maior número de ensaios para garantir melhor intervalo de confiança dos resultados observados, instalar um tanque maior que possibilite a realização de maior número de ensaios sem que haja aumento de turbidez significativa e aumento da temperatura da água. Sugere-se também a automatização da ascensão do pistão para quando ocorrer a erosão de 1 mm da amostra, já que resultados podem sofrer alterações devido a quem possa executar o ensaio.

Sugere-se também avaliar a resistência a velocidades acima de 2,5 m/s para ampliar as possibilidades de aplicação dessa técnica de redução da erodibilidade em obras hidráulicas para solos tratados com a cal e determinar a dosagem ideal de acordo com o solo. Adicionalmente, recomenda avaliar os efeitos da dosagem de cal no transporte dos sedimentos erodidos e na turbidez do fluxo.

Por fim, este estudo deve prover de base para avaliação da viabilidade econômica para o empreendimento como um todo, pontos específicos de aplicação e métodos de execução correspondentes.

8 Agradecimento

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
técnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Os autores reconhecem a TEC3 Geotecnia e Recursos Hídricos Ltda. pelo financiamento e desenvolvimento do EFA no CPH e Lhoist Brasil por fornecer cal aos testes de erosão.

9 Referência Bibliográfica

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2003) NBR 6453: *Cal virgem para construção civil* – Requisitos. Rio de Janeiro.
- AZEVEDO, A. L. C., OLIVEIRA, A. JR., PEDROSA, R. A. e RAMALHO, R. W. (2010) *Estabilização de solos com adição de cal*. Belo Horizonte. Dissertação de pós-graduação. Ipc/puc.. 78 p.
- BALDOVINO, J. A.; MOREIRA, E. B.; TEIXEIRA, W.; IZZO, R. L. S.; ROSE, J. L. (2018) *Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in Curitiba, Brazil*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, v. 10, n.1, 1, p. 188-194.
- BELL, F. G. *Lime stabilization of clay minerals and soils*. (1996) Engineering Geology Journal, v. 42, n. 4, p. 223–237.
- BRIAUD, J.; TING, F.; CHEN, H.; CAO, Y.; HAN, S.; KWAK, K. (2001) *Erosion function apparatus for scour rate predictions*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 127, n. 2..
- CHOW, V. T. (1959) *Open-channel flow*. New York: McGraw-Hill. 680p.
- DALLA ROSA, A. (2009) *Estudos dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal*. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- ELANDALOUSSI, R.; BENNABI, A.; DUPLA, J. C.; CANOU, J.; BENAMAR, A.; GOTTELAND, P. (2019) *Effectiveness of lime treatment of coarse soils against internal erosion*. Geotechnical and Geological Engineering, v. 37, p. 139-154.
- HERRIER, G.; PUIATTI, D.; CHEVALIER, C.; FROUMENTIN, M.; BONELLI, S. (2013) *Lime treatment: new perspectives for the use of silty and clayey soils in earthen hydraulic structures*. In: ICOLD EUROPEAN CLUB SYMPOSIUM, 9., 2013, Venice, Italy. Proceedings [...]. Venice, Italy: ICOLD.
- HERRIER, G.; CHARLES, I.; CHEVALIER, C.; DURAND, E., PUIATTI, D.; FLEUREAU, J.-M.; TAIBI, S.; BONELLI, S.; FRY, J.-J. (2014). *A real scale experimental dike in lime-treated soil: evaluation of the methodology, mechanical and hydraulic performance*. Proceedings of the Seventh Int. Conference on Scour and Erosion, Perth, Australia, Dec. 2014: 521-52 p.
- HERRIER, G.; BONELLI, S. (2014) *Internal erosion resistance of soils treated with lime: an evolutive benefit*. Proceedings of the Seventh Int. Conference on Scour and Erosion, Perth, Australia, Dec. 2014. 73-80 p.
- HERRIER, G.; CAMPOS, G.; NERINCX, N.; BONELLI, S.; PUIATTI, D.; TACKER, P.; CORNACCHIOLI F. (2018) *Lime Treatment Of Soils : A Solution For Erosion-Resistant Hydraulic Earthen Structures*. Conference: Dam World 2018 (3rd Int Dam World Conf, Brazil, Foz di Iguaçu, Sept 17-21, 2018) Brazil, Foz di Iguaçu.
- LOVATO, Rodrigo Silveira. (2004) *Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado a pavimentação*. Tese de mestrado: UFRGS. Porto Alegre.
- MANTOVANELLI, Gabriel Baldanza. (2016) *Uma abordagem experimental para a obtenção da taxa de erosão de solos através de um aparato do tipo pistão*. Tese de mestrado: UFES. Vitória.
- MEHENNI, A., O. CUISINIER, F. MASROURI. (2016) *Impact of lime, cement, and clay treatments on the internal erosion of compacted soils*. Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE) 2016. 28 (9):04016071. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001573.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

- NEVES, E. N. S. de A. C.. (2009) *Estudo Laboratorial de Solos Tratados com Cal Modelos de Comportamento. Dissertação de Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*. Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto. Porto, 176 p.
- SALIBA, A. M.. (2009) *Uma nova abordagem para análise de ruptura por galgamento de barragens homogêneas de solo compactado*. Tese de doutorado: Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.
- SALES, M. M.; CARVALHO, J. C. de; MASCARENHA, M. M. dos A.; et al. (2017) *Erosão em borda de reservatório*. Goiânia: Gráfica UFG. xxxiv, 584 p.
- TAVARES, M.a H. F.; CARDOSO, D. L.; et al. (2008) *Uso de forno de microondas na determinação da umidade em diferentes tipos de solo*. Seminário: Ciências Agrárias, Londrina, v. 29, n. 3, p. 529-538..
- WILKINSON, A.; HAQUE, A.; KODIKARA, J.; ADAMSON, J.; CHRISTIE, D. (2010) *Improvement of problematic soils by lime slurry pressure injection: case study*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 136, n. 10, p. 1459-1468.
- ZHANG, L., WANG, J; BAI, Z., CHUNJUAN, L.V. (2015) *Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area*. Catena, v.128, p.44-53. DOI: 10.1016/j.catena.2015.01.016.