

USO DE SOLUÇÃO DE CAL PARA MITIGAÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS EM UM SOLO DA UHE DE ITUMBIARA

*USE OF LIME SOLUTION FOR EROSION PROCESSES'S MITIGATION IN A SOIL OF
ITUMBIARA ' S PLANTS*

Rafael de Oliveira NASCIMENTO¹, Laís Martins OLIVEIRA¹, Marcia Maria dos Anjos MASCARENHA¹, Renato Resende ANGELIM¹, Renato Batista de OLIVEIRA², Maurício Martines SALES¹, Marta Pereira da LUZ²

¹Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) da Universidade Federal de Goiás. Av. Universitária, 1488. Qd 86, Lt Área. St. Universitário, Goiânia-GO. CEP: 74605-220. Emails: engrafael@live.com; laissmart@gmail.com; marciamascarenha@gmail.com; tecnoeng@gmail.com; sales.mauricio@gmail.com

²Eletrobras-Furnas, BR 153 Km 510 SN, CEP: 74923-650, Aparecida de Goiânia-GO. Emails: renatoba@furnas.com.br; martaluz@furnas.com.br

Introdução
Materiais e métodos
 Coleta e preparação do solo
 Ensaio de erodibilidade
 Ensaio e caracterizações complementares
Análise dos resultados
 Influência da concentração
 Influência do tempo de cura
Conclusões
Referências

RESUMO - O presente estudo tem como objetivo geral estudar e propor uma alternativa, por meio da aplicação de solução de cal sobre o solo, para mitigação dos processos erosivos em margens de reservatórios. A região que foi selecionada pertence à Usina Hidrelétrica de Itumbiara. Foram realizados os ensaios de Inderbitzen, Desagregação, Microscopia Eletrônica de Varredura, Difração de Raios-X e Granulometria a laser em amostras de solos estabilizados com concentrações de cal de 1%, 2% e 4% e tempos de cura de 1, 7, 28 e 56 dias. Verificou-se que o tratamento aumentou a resistência do solo quanto a erodibilidade superficial e à estabilidade estrutural. Em relação à erodibilidade superficial, a concentração da solução de cal de 1% se mostrou adequada. No entanto, para que se tenha um ganho na estabilidade estrutural foi necessária concentração da solução de cal superior a 2% e tempo de cura maior que 28 dias. Sendo assim, o tratamento do solo estudado, por meio da aplicação de solução de cal, apresentou-se como uma boa técnica na prevenção aos processos erosivos laminares.

Palavras-chave: Erodibilidade. Ensaio de Inderbitzen. Ensaio de Desagregação. Tratamento com Cal. Aspersão de Cal.

ABSTRACT - The present study has as general objective to study and to propose an alternative, through the application of lime solution on the soil surface, to mitigate the erosive processes in reservoir banks. The region that was selected belongs to the Itumbiara Hydroelectric Power Plant. To analyze the results, Inderbitzen, Slaking, Scanning Electron Microscopy, X-Ray Diffraction and Laser Granulometry tests were performed in samples of stabilized soils with lime concentrations of 1%, 2% and 4% and its curing times of 1, 7, 28 and 56 days. The treatment increased soil resistance for surface erodibility and structural stability. Regarding the surface erodibility, the concentration of lime solution of 1% was adequate. However, to gain in structural stability it was necessary to concentrate the lime solution higher than 2% and the cure time greater than 28 days. Thus, the treatment of the studied soil with the application of lime solution presented itself as a good technique in the prevention of laminar erosive processes.

Keywords: Erodibility. Inderbitzen test, Slaking test, Lime stabilization, Lime spray.

INTRODUÇÃO

Erosão é definida como um mecanismo de destacamento, desprendimento e transporte dos materiais do solo por meio de agentes erosivos (Elisson, 1947). Trata-se de um fenômeno ou agente natural que modifica o solo, participando da sua formação. No entanto, as ações antrópicas aceleram este processo por meio da supressão da vegetação, do uso inadequado e da ocupação indevida.

Buscar medidas para mitigar e prevenir processos erosivos ganha maior importância

devido ao impacto que as erosões causam no ambiente e na economia. Isto porque parte do solo carregado devido a processos erosivos acaba atingindo as nascentes e os cursos d'água como rios e reservatórios, causando o assoreamento dos mesmos e prejudicando o bom desenvolvimento da vida aquática e da vida útil e potencial de armazenamento nos casos de reservatórios.

De acordo com Dias (2011), uma simulação feita na usina hidrelétrica de Três Irmãos em São

Paulo, realizada pela Escola de Engenharia de São Carlos, mostrou que o assoreamento foi responsável pela diminuição da geração média mensal de 377 Megawatt-hora (MWh) entre 1993 e 2008. Diante desta problemática, ações preventivas e corretivas no controle de erosões acabam se tornando um investimento a médio e longo prazo.

Nesta circunstância, existindo a necessidade de entender melhor as dinâmicas dos processos erosivos, principalmente na extensão das margens dos reservatórios de usinas hidrelétricas, a empresa Eletrobrás Furnas, sob coordenação da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) da Universidade Federal de Goiás (UFG) e apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa (FUNAPE), desenvolveram um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) intitulado Monitoramento e Estudo de Técnicas Alternativas na Estabilização de Processos Erosivos em Reservatórios de UHEs (Sales, 2012).

Esse projeto teve o intuito de estudar e propor técnicas alternativas para mitigação dos processos causadores de erosões em margens de reservatórios. Dentro destas propostas consta a estabilização química de solos, que pode se tornar uma alternativa necessária quando as características geotécnicas naturais do solo envolvido não são adequadas para resistir aos processos erosivos impostos pela ação das ondas e variação do nível de operação dos reservatórios.

Esse processo pode ser realizado com a adição ou remoção de componentes que interagem com o solo e melhoram suas propriedades. Segundo Krishnan et al. (2014), estabilizações utilizando técnicas químicas são melhores que as estabilizações que fazem uso de técnicas físicas, pois aquelas conferem ao solo maior resistência e durabilidade.

Existem vários estudos na literatura clássica que trabalham com melhorias das propriedades hidráulicas dos solos por meio da adição de algum estabilizante químico. Dentre esses estudos, podem ser citados os trabalhos de Bell (1996), Zhang & Cao (2002); Angelim (2005); Ahmed et al. (2011); Dash & Hussain (2012); Paiva et al. (2016) e James & Pandian (2016).

Quando a cal hidratada é adicionada a um solo argiloso, ocorrem reações que podem ser

classificadas de curto e longo prazo. De acordo com Bell (1996), as primeiras incluem trocas de íons, floculação e carbonatação, que proporcionam uma melhora na plasticidade e um pequeno aumento da resistência (não curada). As segundas são as reações pozolânicas que acontecem ao longo do tempo e são responsáveis pela formação de novos minerais que interferem na resistência e durabilidade do solo. Segundo Rezende (2003), a floculação (agregação) ocorre se o valor do pH da mistura for superior ao ponto de carga zero do solo (PCZ). Caso contrário, ocorrerá dispersão (ou desagregação).

Se houver floculação, o tratamento com cal reduz o peso específico seco e aumenta a umidade ótima do solo, ocorrendo o contrário, há dispersão. Além disso, ocorre redução na plasticidade, caso o solo possua em sua composição o argilomineral montmorilonita, e aumento, se for a caolinita. (Bell, 1996; Harichane et al., 2011; James & Pandian, 2016; Dash e Hussain 2012; Angelim, 2005).

Vários pesquisadores observaram que a adição de cal a um solo que possui argila em sua composição proporcionou ganhos de resistência a compressão simples e aumento do módulo de elasticidade, quando submetidos a um tempo de cura suficiente (Bell, 1996; Angelim, 2005; Harichane et al., 2011; James & Pandian, 2016; Dash & Hussain, 2012)

No caso de solos expansivos foi constatada uma redução da expansão livre e da tensão de expansão devido ao fato de que a cal reduz a absorção de água das argilas saturadas com cálcio (Zhang & Cao, 2002; Dash & Hussain, 2012; James & Pandian, 2016, Paiva et al., 2016).

Em relação à erodibilidade, Herrier et al. (2014) executaram ensaios de crumb test em uma amostra de solo siltoso misturado com 2% de cal. Esse solo não apresentou dispersão mesmo depois de 45 horas de submersão, enquanto que o mesmo solo sem tratamento desagregou completamente após 15 minutos de ensaio.

É importante ressaltar que os trabalhos citados, com exceção do trabalho de Herrier et al. (2014), tiveram como finalidade a estabilização do solo para aplicação em pavimentação. Além disso, a cal era misturada ao solo na forma de pó e compactada, exceto Angelim (2005), que

também utilizou cal diluída na água de compactação (forma líquida).

Quando se trata de erosão, o solo *in situ* se encontra no estado natural, estruturado, compondo o maciço, dificultando o uso de misturas. Neste caso, a alternativa viável a ser adotada é a efusão de solução de cal na superfície do terreno, para que penetre por percolação no solo, no estado que ele se encontra no campo, com várias vantagens do ponto de vista técnico – econômico.

Santos (2009) propôs uma técnica denominada Cal-Jet, no qual ele pulverizou calda de cal na proporção de 3:1 (relação de 3 litros de água e 1 quilograma de cal) em taludes propensos a erosão. Segundo o autor, esta é uma solução de baixo custo quando comparada a outras já existentes no controle de erosões. Contudo, a eficiência e concentração de cal na

solução dependem do tipo de solo a ser tratado.

Neste sentido, sabendo-se que o tratamento do solo com aditivos químicos, destacando-se a cal, apresentam potencial de uso, o presente trabalho objetivou verificar a eficiência do tratamento do solo por meio de efusão de solução de cal em amostras indeformadas de um solo natural.

Uma vez que a grande maioria dos trabalhos existentes na literatura têm como foco estabilizar o solo para aplicá-lo em algum tipo de obra geotécnica, no qual se destaca a pavimentação, esta pesquisa se diferencia por buscar solucionar problemas relacionados a erosões laminares de margens de reservatórios, verificando a influência da concentração da solução de cal e do tempo de cura no desempenho da camada de solo superficial tratada.

MATERIAIS E MÉTODOS

O solo utilizado nessa pesquisa é uma areia siltosa, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos, e um solo argiloso laterítico plástico, pouco ativo e composto por caulinita, de acordo com a classificação de Nogami & Villibor (1995). As características físicas do solo estudado são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1. Características físicas do solo.

Parâmetros	Com defloculante	Sem defloculante
P (%)	2,9	2,8
A (%)	47,5	62,0
S (%)	26,2	35,2
Ar (%)	23,4	0,0
Classificação	Argila siltosa	Areia siltosa
w _L (%)		39
W _P (%)		27
I _P (%)		12
Classificação		SM
ρ _s < 4,8mm		2,83
W <i>in situ</i> (%)		19,5

P: pedregulho; A: areia; S: silte; Ar: argila; w_L: limite de liquidez; w_P: limite de plasticidade; IP: índice de plasticidade; ρ_s: massa específica dos sólidos passante na peneira de 4,8mm; W *in situ*: umidade de campo; e: índice de vazios.

A cal hidratada utilizada na pesquisa foi a dolomítica do tipo CH-III, da marca ITAÚ, que atendeu todos os requisitos técnicos da norma NBR 7175 (ABNT, 2003), escolhida por ser de grande disponibilidade no mercado regional. A composição química do lote da cal utilizada nesta pesquisa disponibilizada pelo fabricante é apresentada na tabela 2.

Tabela 2. Composição química da cal hidratada

Nome Químico	Faixa de concentração (%)
Hidróxido de cálcio	65-78
Hidróxido de magnésio	15-25
Carbonato de cálcio	<15
Óxido de cálcio	<15

Coleta e Preparação do Solo

A coleta da amostra do solo estudado está localizada em uma margem do reservatório próxima ao barramento da UHE-Itumbiara de Furnas, cujas coordenadas são: 18°23'1.76"S e 49° 3'26.02"O (Figura 1). A escolha do local por Luz et al. (2015), dentro do projeto P&D mencionado na introdução, foi porque o recuo e posterior oscilação do nível do reservatório provocou erosão laminar em faixa extensa, plana, com leve caimento para o lago.

A topografia (terreno plano e extenso) e as condições de acesso à área eram ideais para tratamento com solução de cal hidratada na superfície do solo, como medida de mitigação.

Para determinar a suscetibilidade à erosão do material da margem foram coletadas amostras indeformadas em moldes de 10 cm de comprimento, 10 cm de largura e 5 cm de altura para realização de ensaios de laboratório tipo Inderbitzen. Foi escavada uma trincheira rasa, com profundidade máxima de 30 cm e, em seguida, os moldes foram cravados delicadamente no solo, tomando cuidado para preservar a estrutura original do mesmo (Figura 2).



Figura 1. Local do estudo (coordenadas: 18°23'1.76"S e 49° 3'26.02"O).



Figura 2. Coleta de amostra para ensaio de Inderbitzen.

Em seguida, o conjunto solo-molde foi retirado e protegido com filme plástico de PVC e papel alumínio e acondicionados em caixa de isopor para preservar a umidade de campo no momento da coleta. Assim que chegaram ao laboratório, os corpos de prova foram desembalados, os excessos de solo do topo e da base do molde foram aparados e utilizados para verificar a umidade de campo e, por fim, tratados com a solução de cal (Figura 3). Sousa & Reis (2016) executaram ensaios de erodibilidade em amostras tratadas com soluções com concentrações que variaram de 0,5% a 6% e tempo de cura de um dia. Os autores observaram que para concentrações superiores a 2%, para uma argila laterítica de baixa plasticidade, não houve variação significativa dos resultados. Assim, neste trabalho, realizaram-se ensaios de erodibilidade preliminares com amostras tratadas com soluções de cal variando a concentração de

0,5% a 4% e tempo de cura de um dia (exposição ao ar em ambiente de laboratório). Como após o tratamento a amostra era saturada por capilaridade, adotou-se um dia de cura, o qual foi suficiente para nortear o desempenho de cada teor entre as amostras testadas. Com bases nesses resultados os teores de cal definidos, em volume de solução, foram 0% (de referência), 1%, 2% e 4%.

Para fazer a aspersão, a massa de cal referente a cada concentração era adicionada à 100 ml de água. Essa solução era misturada e agitada com um bastão de vidro em um béquer de maneira a não formar corpo de fundo. Imediatamente após a agitação o volume de toda essa solução era distribuído uniformemente em toda a área superficial do corpo de prova.

Para entender a influência do tempo de cura, as amostras foram deixadas em repouso com a face tratada voltada para cima e expostas ao ar por 1, 7, 28 e 56 dias, em ambiente de laboratório com



Figura 3. Preparo da amostra com solução de cal.

Para entender a influência do tempo de cura, as amostras foram deixadas em repouso com a face tratada voltada para cima e expostas ao ar por 1, 7, 28 e 56 dias, em ambiente de laboratório com temperatura controlada de 22 ° C. Os primeiros 7 dias foram para verificar os efeitos das reações de curto prazo (troca de íons, floculação e carbonatação) e os dias subsequentes foram para entender as reações de longo prazo (pozolânicas). Cabe salientar que em sistemas porosos parcialmente saturados a carbonatação pode se estender por mais tempo, se houver disponibilidade de hidróxidos de cálcio e magnésio para reação com o gás carbônico, que difunde pela amostra conforme a água dos poros vai secando e sendo substituída pelo ar renovado (frente de carbonatação), avançando na espessura da amostra. Segundo Guimarães (1998), a carbonatação é limitada no tempo e no espaço e, por si só, não produziria as substanciais alterações nas propriedades físicas do solo, aumentando sua resistência. De forma complementar à carbonatação, têm-se as ações da troca iônica e ação pozolânica.

As amostras foram nomeadas de acordo com a concentração de solução com a qual foram tratadas, conforme apesentado na tabela 3.

Tabela 3. Nomenclatura das amostras

Nome das amostras	Teor de cal da solução (%)	Tempo de cura (Dias)
REF	0	
AM-1	1	1,7,28 e 56
AM-2	2	
AM-4	4	

Também foram coletadas amostras indeformadas para a realização de ensaio de desagregação em laboratório na forma cúbica com

aproximadamente 10 cm de aresta e embaladas com filme de PVC e papel alumínio.

Posteriormente foram acondicionados em caixa de isopor para transporte, a fim de preservar as condições de campo.

No laboratório, no momento do ensaio, estas amostras foram moldadas em cubos de arestas de aproximadamente 6 cm, e então tratadas com as mesmas porcentagens de solução de cal e metodologia de aplicação utilizadas para os ensaios de Inderbitzen e expostas ao ar durante o mesmo tempo de cura.

Ensaio de Erodibilidade

Foram realizados ensaios de Inderbitzen com o objetivo de verificar a resistência do solo quanto a erosão superficial. Para as amostras REF (solo) foram realizados dois ensaios: um saturado e outro não saturado. No caso das amostras AM-1, AM-2 e AM-4 (Tabela 3) foram executados ensaios em quatro tempos de cura (1, 7, 28 e 56 dias) para a condição saturada e apenas para um dia de cura para a condição não saturada, totalizando 17 ensaios. Foram utilizados corpos de provas distintos para cada tempo de cura. A saturação do corpo de prova foi executada por capilaridade, sendo que a amostra era mantida 24h em contato com a água.

Os ensaios foram realizados utilizando o aparelho de Inderbitzen construído por Aguiar (2009).

A metodologia empregada na execução dos ensaios e nas análises dos resultados foi a de Almeida et al. (2013), que correlaciona a massa de solo que não fica retida na peneira com a curva granulométrica do solo (Equação 1).

$$M_T = \frac{100 \times M_{R200}}{100 - P_{P200}} \quad (1)$$

onde: *MT* : massa total erodida (%), *MR200*: massa lavada retida na peneira nº 200 (0,075 mm) e *PP200*: porcentagem passante na peneira nº 200 (0,075 mm), conforme curva granulométrica.

Para a execução dos ensaios, os corpos de prova foram pesados antes de serem colocados no aparelho de Inderbitzen e, em seguida, era aplicado silicone na interface entre o molde e a base do equipamento para vedar a entrada de água. Posteriormente foi colocada peneira de nº 200 (0,075 mm) em um suporte abaixo do vertedouro do equipamento para coleta das partículas dos solos removidas por erosão, que eram trocadas nos intervalos de tempo de 1; 2,5; 5; 7,5; 10; 15; 20; 30; 40; 50 e 60 minutos (sem interrupção do fluxo de água), sendo que a cada substituição a massa de solo retida na peneira era coletada e transferida para outro recipiente.

A declividade utilizada na rampa foi de 10% e a vazão de 50 l/min, resultando em uma tensão cisalhante hidráulica de 0,007 kPa, obtida por meio das Equações 2 e 3.

$$y = \left(\frac{nQ}{bS_0^{0.5}} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (2)$$



Figura 4. Rasgos na superfície da amostra.

Após o término do ensaio, o corpo de prova foi pesado e o material retido nas peneiras de nº 200 foi colocado em uma estufa com temperatura de 105 °C a 110 °C por um período mínimo de 24 h. A perda de massa foi estimada a partir da metodologia proposta por Almeida et al. (2013).

Ensaio de desagregação foram realizados com o objetivo de entender a resistência estrutural do solo quando submetido ao contato com a água, simulando o solo próximo à borda de reservatório sujeito a variação do nível de água do lago.

Para o ensaio de desagregação foram realizados um total de 13 experimentos, nos quais as amostras

$$\tau_0 = \gamma R_h \text{sen} \theta \quad (3)$$

onde: *y* é altura de lâmina d'água em metros, *n* é o coeficiente de Manning, *Q* é a vazão em m³/s, *b* é a largura da calha em metros, *S*₀ é a declividade de fundo, *τ*₀ é a tensão cisalhante hidráulica média em kPa, *γ* é o peso específico da água em kN/m³, *R*_h é o raio hidráulico em metros e *θ* é o ângulo entre o canal e a horizontal.

Uma alteração metodológica foi executada nas amostras com concentração de 2 e 4% de cal, a fim de verificar se a redução da perda de massa era devido à impermeabilização do solo pela película de cal carbonatada ou ao ganho de resistência ao longo do seu perfil. Nesse caso, após os 60 minutos iniciais de ensaio, o fluxo foi interrompido e rasgos longitudinais à direção do fluxo foram feitos na superfície da amostra (Figura 4) no sentido de violar a capa formada pela cal depositada e endurecida, e expor parcialmente a superfície do solo à ação da água, que estava impermeabilizada por película de cal carbonatada. Imediatamente após, o fluxo de água foi reiniciado (com as mesmas características do início do ensaio) para os tempos de 5, 10, 20 e 30 minutos.

foram tratadas com solução de cal com as concentrações 0%, 1%, 2% e 4%.

A metodologia proposta por Santos (1997) prevê que os ensaios sejam realizados com imersão total e parcial. No primeiro caso o corpo de prova é totalmente inundado, simulando uma elevação súbita do nível de água. Já no ensaio com imersão parcial é simulada uma elevação gradual do nível do reservatório. Na imersão parcial, o corpo de prova é colocado em uma pedra porosa e mantido por 30 minutos com o nível de água na sua base. Após esse tempo é adicionada água até 1/3 (um terço) da altura da aresta do corpo de prova, 2/3

(dois terços) e depois a completa imersão do corpo de prova, com intervalos de 15 minutos em cada etapa (Figura 5). Nessa pesquisa optou-se por utilizar a imersão parcial por retratar a situação de campo mais comum e devido a quantidade de amostras disponíveis.

Uma alteração da metodologia proposta por Santos (1997) foi desenvolvida por meio da aplicação de parafina nas laterais do cubo, deixando apenas a face tratada exposta à ação da água, conforme mostrado na figura 6. Essa modificação foi necessária porque o solo, com alto teor de areia e alta porosidade, desagregava completamente frente à ação da água.

Assim, embora a aplicação da parafina altere as características originais do solo, possibilitou uma comparação qualitativa entre as amostras utilizadas nesta pesquisa. Além disso, no campo, a face da superfície tratada é a que fica exposta à ação da água, o que está de acordo com a metodologia adotada.

Terra et al. (2015) verificaram a influência da carga hidráulica na geração de poropressão em ensaios de imersão total, recomendando que nesses ensaios a carga hidráulica fosse constante para permitir comparações. Assim, nessa pesquisa, a coluna de água foi fixada em $4/3$ (quatro terços) da altura da aresta do corpo de prova.

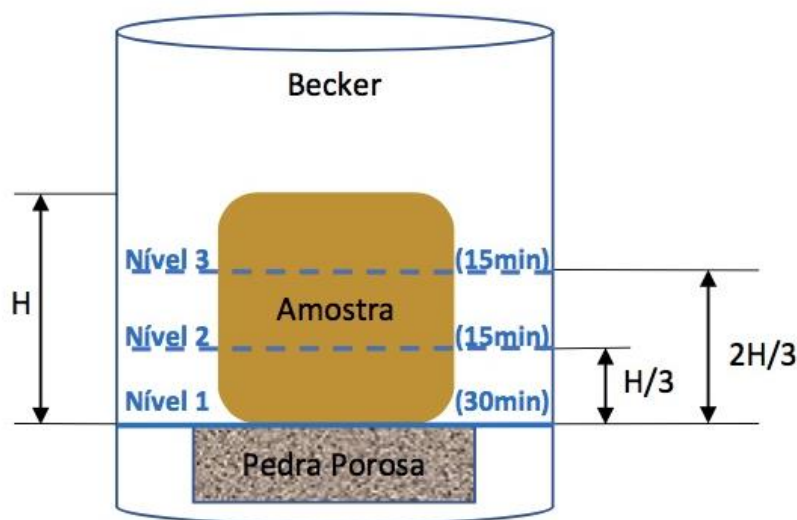


Figura 5. Ensaio de desagregação (imersão parcial).



Figura 6. Processo de tratamento para desagregação.

Ensaio e Caracterizações Complementares

Caracterizações por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difração de Raios-X (DRX) e ensaios de granulometria a laser foram realizados com o restante do material contido no molde do Inderbitzen. Essas caracterizações e ensaios

tiveram como objetivo verificar a influência do tratamento e do tempo de cura na estrutura, na mineralogia e na granulometria do solo. Vale destacar que o ensaio de granulometria a laser não foi feito com o intuito de classificar o solo.

Para as análises por MEV e DRX foram

utilizadas as amostras REF, AM-1 e AM-4 com tempo de cura de 56 dias de cura. Escolheu-se apenas o último dia de cura para verificar como esse tratamento interferiu na estrutura e mineralogia do solo.

As caracterizações mineralógicas por DRX foram executados no Laboratório de Microscopia e Difração de Raios-X da Eletrobrás Furnas. Essas análises foram feitas em difratômetro com goniômetro theta/2theta, anodo de cobre (Cu), sob uma voltagem de 40 kV, amperagem de 30 mA e uma velocidade de varredura de 0,05 graus em 2 theta/seg. As amostras foram desagregadas com o uso de um moinho orbital até a obtenção de 100% do material passante na peneira de 0,045 mm.

Os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram também realizados no Laboratório de Microscopia e Difração de Raios-X da Eletrobrás-Furnas.

Esse ensaio consiste na emissão de feixes de elétrons de alta energia sobre a superfície da amostra, onde os elétrons interagem com a superfície do material analisado, gerando sinais que são coletados por detectores específicos para cada tipo de informação a ser obtida. O detector utilizado para a análise de imagem foi o de SE (elétrons secundários).

Os ensaios de granulometria a laser foram

executados no laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás. Trata-se de um ensaio que não possui norma brasileira que o regulamenta. Sendo assim, foi preciso utilizar a metodologia indicada pelo fabricante do aparelho com adaptações desenvolvidas para solos tropicais apresentadas por Ribeiro et al. (2014). Os CPs foram retirados de amostras REF, AM-2 e AM-4 (1 e 56 dias de cura) após a realização dos ensaios de Inderbitzen. Elas passaram por peneiramento na peneira de 2 mm – limite superior do equipamento. Vale destacar que o material das amostras testadas passou pela peneira, não ficando nada retido.

Visto que em solo tropical é comum a presença de agregações dos grãos, foi realizada leitura no material após uso de ultrassom por 60 segundos na sua potência mais baixa (30W) e para confirmar se as agregações foram desfeitas fez-se uma segunda aplicação de ultrassom por mais 60 segundos (120 no total). Devido à proximidade das curvas (Figura 7), considerou-se que 60 segundos de aplicação de ultrassom eram suficientes para a desagregação dos grãos.

Como a composição mineralógica do solo detectou a presença de mais de um tipo de mineral presente, o índice de refração adotado para o material como um todo foi de 1,81.

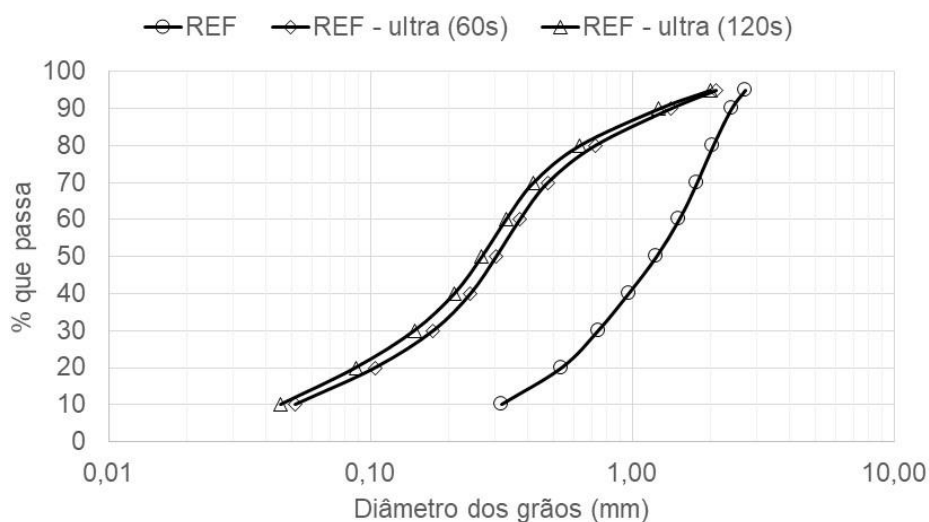


Figura 7. Curvas granulométrica do solo com e sem ultrassom.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na análise dos resultados consta a influência da concentração de cal na erodibilidade do solo, saturado e não saturado, e na sua granulometria, e a influência do tempo de cura na erodibilidade do solo, considerando a influência da

mineralogia neoformada pela aplicação do tratamento.

Influência da Concentração da Solução de Cal

A influência da concentração da solução de cal foi analisada a partir da perda de massa e da

estabilidade frente à ação da água, a partir dos ensaios de Inderbitzen e de Desagregação, realizados nas amostras estabilizadas e na de referência (REF).

Na figura 8 constam as imagens do ensaio de desagregação por imersão parcial da amostra que não recebeu tratamento por aspersão de solução de cal (REF).

No primeiro estágio com coluna d'água a 1/3 da altura do CP (Figura 8a), o solo começou a se desagregar e 15 minutos depois, na segunda etapa, com elevação da coluna d'água a 2/3 da

altura do CP a amostra se desagregou completamente (Figura 8b).

A amostra AM-1, independente do tempo de cura, se desagregou completamente ao final do ensaio, sendo que a desagregação iniciou no primeiro estágio do ensaio (Figura 9a).

O ganho de resistência à desagregação foi notório apenas para as amostras tratadas com soluções com concentrações de 2% e 4% e tempo de cura superior a 28 dias (Figuras 9b e 9c), o que será melhor comentado ao se analisar o efeito do tempo de cura.

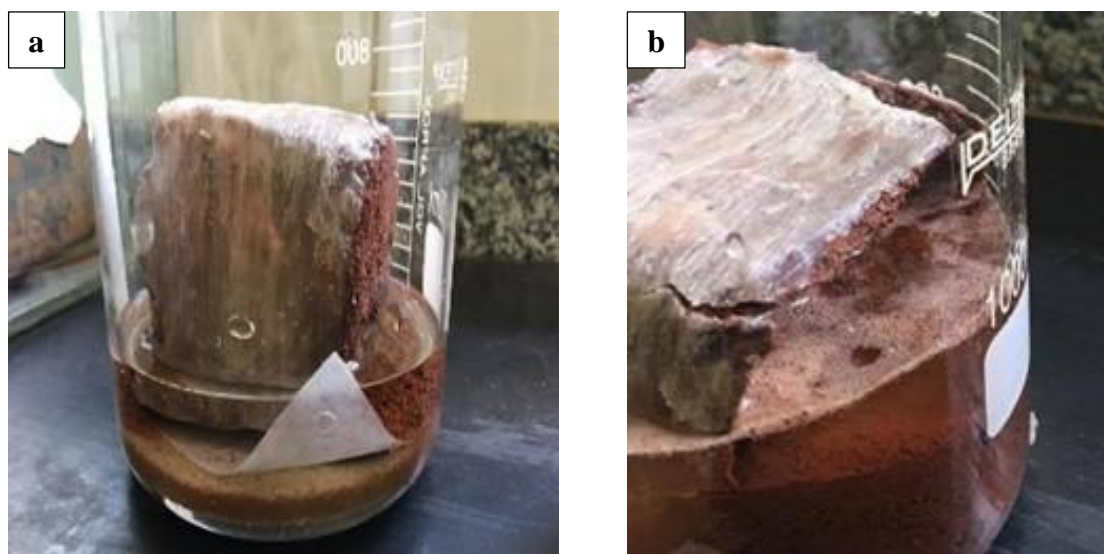


Figura 8. Ensaio de desagregação da amostra REF: a) primeiro estágio e b) segundo estágio.

Nas Figuras 10 a 13 estão apresentadas a relação entre a porcentagem da perda de massa total e o tempo de ensaio (PM *versus* T) em amostras estabilizadas com diferentes concentrações das soluções de cal para tempos de

cura de 1, 7, 28 e 56 dias, respectivamente. O valor da perda de massa total é a porcentagem da massa do solo seco perdida (calculada de acordo com a equação 1) em relação à massa do solo seco inicial.

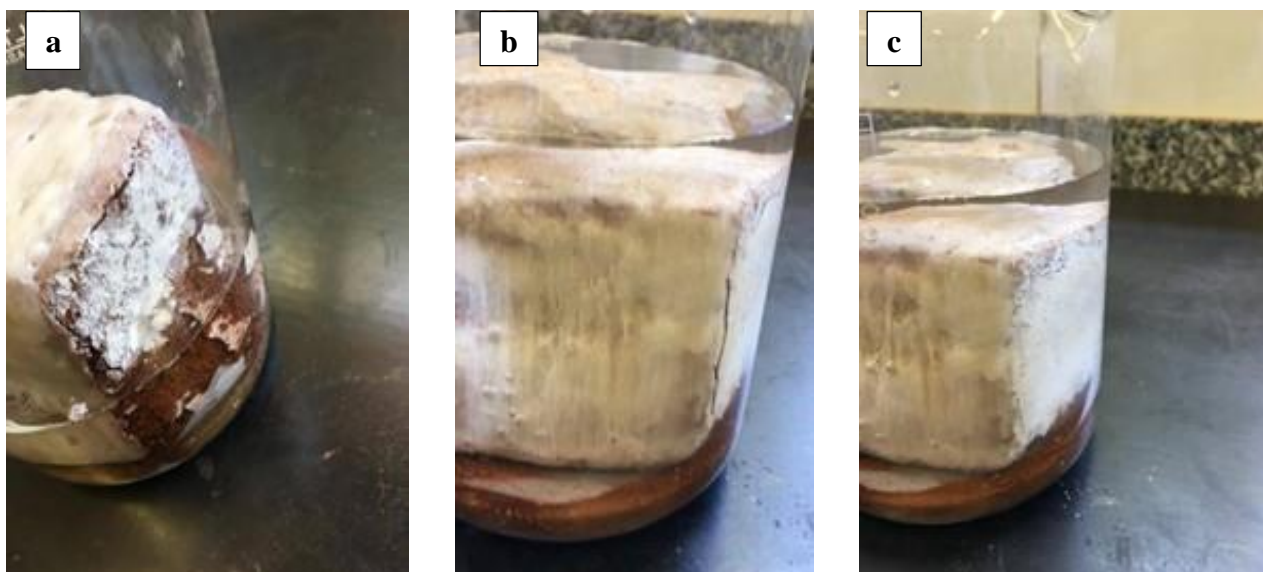


Figura 9. Ensaio de desagregação aos 28 dias de cura: a) 1º estágio do ensaio de imersão parcial de AM-1; b) 4º estágio do ensaio de imersão parcial do AM-2; c) 4º estágio do ensaio de imersão parcial do AM-4.

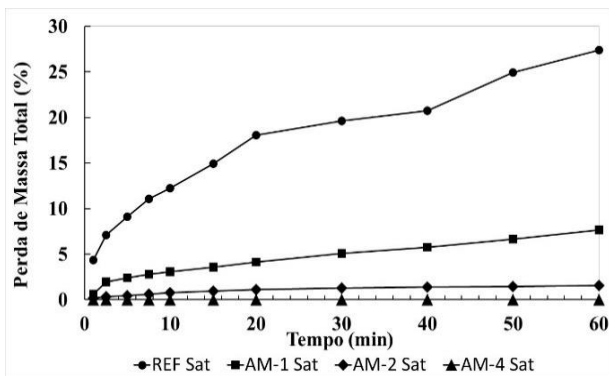


Figura 10. Influência da concentração para o tempo de cura de 1 dia.

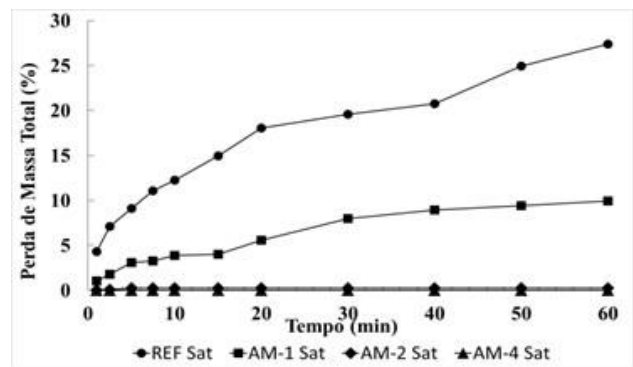


Figura 11. Influência da concentração para o tempo de cura de 7 dia.

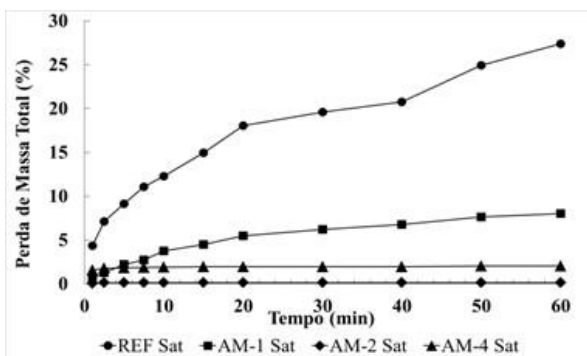


Figura 12. Influência da concentração para o tempo de cura de 28 dia.

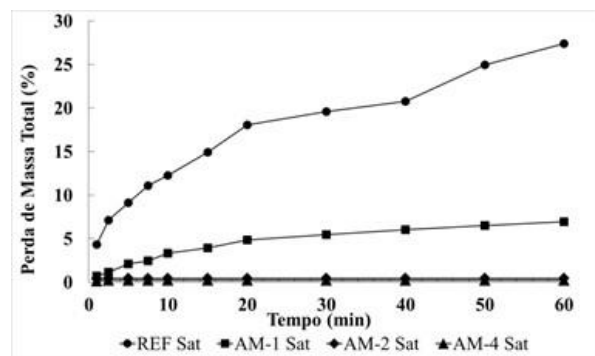


Figura 13. Influência da concentração para o tempo de cura de 56 dia.

Em geral, as amostras tratadas com a solução de cal apresentaram menor valor de perda de massa no ensaio Inderbitzen. A amostra AM-1, com apenas 1 dia de cura, apresentou uma redução de 72% quando comparada à amostra REF. Cabe salientar que as amostras com maiores concentrações de cal (AM-2 e AM-4) apresentaram valores de perda de massa semelhantes, com redução superior a 94% em relação à amostra não estabilizada (REF), para todos os tempos de cura.

O ganho de resistência em amostras estabilizadas com cal foi observado por Bell (1996); James & Pandian (2016); Rocha & Resende (2016), dentre outros, a partir de ensaios de resistência a compressão simples (RCS) em misturas solo-cal compactadas. É importante ressaltar que, devido a cal ser misturada com o solo para posterior compactação, a quantidade de cal utilizada no tratamento dos solos das pesquisas citadas é diferente da que foi usada nesta pesquisa.

Os autores previamente citados usaram teores que variaram entre 2% e 13% de cal em relação à massa seca. Os ganhos de resistência a compressão simples apareceram de forma mais notória para as misturas superiores a 2%, sendo o

teor ótimo de 6% para Rocha & Resende (2016); 7% para James & Pandian (2014); 4% para Bell (1996). Nesta pesquisa, a relação cal/massa seca de solo variaram entre 0,2% e 0,8%, ressaltando que essa variação não é constante ao longo do perfil.

Outro aspecto importante está ligado à formação da fina camada de cal endurecida na superfície tratada dos CPs que a impermeabilizou, protegendo-a do ataque erosivo. A perda de massa total após a retirada da capa, em função da área total do corpo de prova, é apresentada nas figuras 14 e 15. Vale ressaltar que, nessa situação, o fluxo se concentrou na área do rasgo, e, ao considerar essa porcentagem em função dessa área (3,0 x 0,1 x 10,0 cm²), os valores obtidos são maiores que 100%, mostrando que a solução de cal não penetrou na amostra.

No que diz respeito à saturação, Almeida et al. (2015) e Bastos et al. (2001) verificaram que o aumento do valor de sucção inicial do solo provoca um acréscimo no valor da perda de massa inicial. Dessa forma, foram realizados ensaios de Inderbitzen em amostras não saturadas (em torno de 45 % de grau de saturação) com tempo de cura de um dia para todas as amostras. Os resultados são apresentados na figura 16.

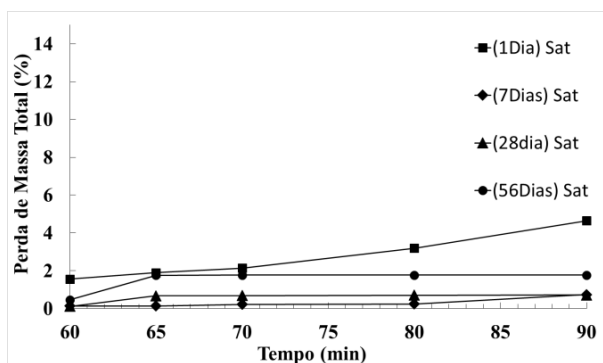


Figura 14. Perda de massa após a quebra da capa de cal para concentração de 2%.

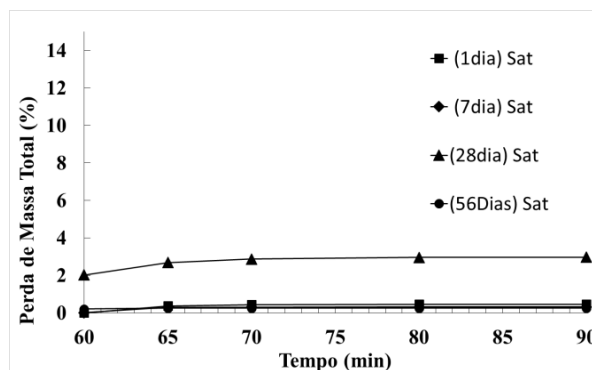


Figura 15. Perda de massa após a quebra da capa de cal para concentração de 4%.

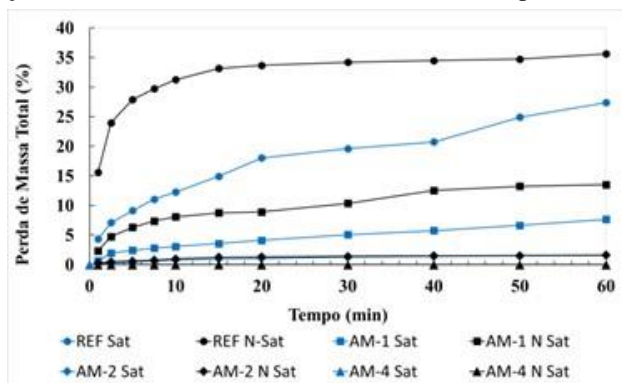


Figura 16. Influência do tempo de cura e saturação para concentração de 1%.

Para a amostra AM-1, houve uma redução de 43% da perda de massa do solo saturado em comparação com o estado não saturado. Essa diferença diminuiu com o aumento da concentração da solução, sendo que as amostras AM-2 e AM-4 apresentaram diferenças menores que 5%. Observa-se, portanto, que a concentração de 1% se mostrou adequada para reduzir significativamente a perda de massa em relação aos solos naturais, tanto na condição saturada (72%) quanto na não saturada (62%). Em relação à estabilidade estrutural do solo, a estabilização surtiu efeito apenas para amostras

tratadas com soluções com mais de 2% de concentração, e tempo de cura de 28 dias, o que será melhor discutido no próximo item.

Na figura 17 constam as curvas granulométricas das amostras REF, AM-2 e AM-4 com 1 dia de cura ensaiados com e sem o uso de ultrassom. Os valores apresentados consistem na média de três determinações (leituras). A utilização do ultrassom tem como objetivo quebrar as agregações típicas de solos lateríticos. Por meio da figura 17 pode-se observar que essa quebra ocorreu tanto para o solo puro quanto para o solo estabilizado.

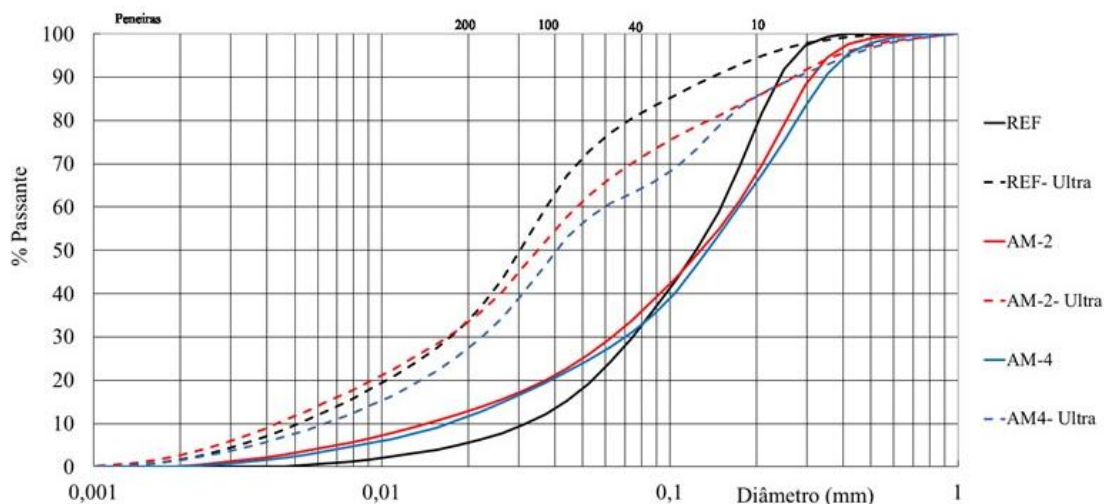


Figura 17. Ensaio de Granulometria a laser.

No caso dos ensaios que não utilizaram ultrassom, os resultados mostram que a adição de cal provoca uma diminuição nas agregações e, conseqüentemente, um aumento no teor de finos, como se a cal tivesse atuado como um brando defloculante.

Entretanto, ao ser aplicado o ultrassom para desfazer completamente as agregações, percebeu-se que o solo tratado com cal fica mais grosso que o solo natural. Ou seja, ou a cal reveste individualmente os grãos de solo, ou provoca cimentação entre frações de diversos tamanhos, aumentando a granulometria de forma integral.

É importante ressaltar que a cal não foi misturada ao solo solto e sim em amostra indeformada e apenas aspergida em solução diluída em água, penetrando espontaneamente nos vazios da estrutura do solo, ficando disponível para reagir com os minerais argílicos presentes no solo por onde se difundiu.

Influência do Tempo de Cura

A análise da influência do tempo de cura embasou-se nos ensaios de Inderbitzen e desagregação nas amostras ensaiadas com tempo de cura de 1, 7, 28 e 56 dias. Esses ensaios foram realizados para verificar o efeito da formação de calcita no ganho de resistência do solo.

Dessa forma, para observar o efeito do tempo de cura nos ensaios de Inderbitzen, foi construído o gráfico relacionando a perda total de massa ao longo do tempo de cura para todas as amostras (Figura 18).

Na figura 18 é possível observar uma queda gradual da perda de massa com o tempo de cura, porém pequena quando comparada ao efeito da concentração da solução. Para o primeiro dia de cura, para concentração de 1%, a redução da perda de massa foi superior a 72%, em relação ao solo não estabilizado. Aos 56 dias, a redução de perda de massa, em relação ao tempo de cura de um dia, variou de 7,65% para 6,93% (AM-1); 1,56% para 0,46% (AM-2) e 0% para 0,21% (AM-4).

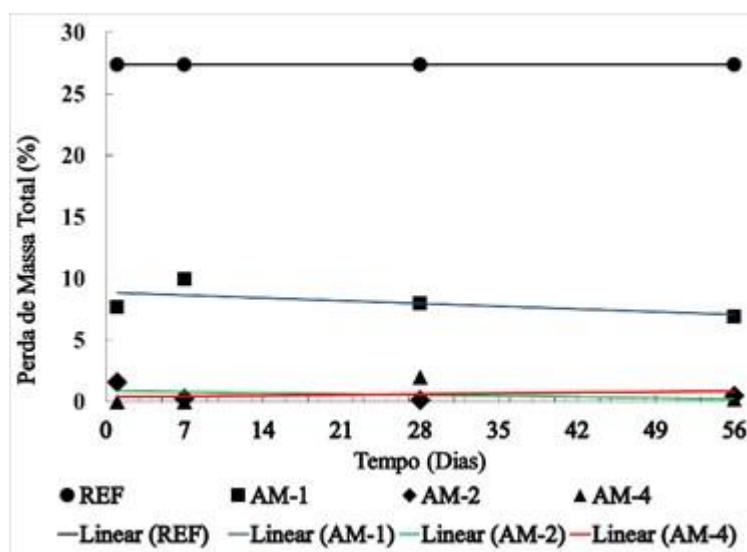


Figura 18. Influência do tempo de cura para cada uma das concentrações.

Vale ressaltar que as amostras AM-4, com tempo de cura de 28 dias e 56 dias, apresentaram comportamentos atípicos. Na primeira situação com 28 dias, a amostra teve maior perda de massa do que a amostra AM-2 no mesmo período de cura. Na segunda situação com 56 dias, a amostra teve maior teor de massa perdida comparada à mesma amostra com tempo de cura de um dia. Isto aconteceu porque a contração do solo durante a etapa de cura, típico de solos tropicais, de acordo com Villibor et al. (2000), retirou a capa junto às bordas, expondo a superfície do solo (Figura 19). Destaca-se que a formação da capa protege a superfície do solo mas, ao ser

danificada, expõe o solo estabilizado, que passará a reagir ao efeito da água.

O ensaio de desagregação foi o que mais mostrou a interferência do tempo de cura no efeito do tratamento. As amostras com tempo de cura de apenas 1 e 7 dias não apresentaram ganho de resistência estrutural considerável, demonstrando uma grande suscetibilidade a desagregação.

As que foram curadas com 28 e 56 dias se mostraram menos propensas a se desagregarem, conforme verificado na figura 14 para o tempo de cura de 28 dias.

Para verificar se esse ganho de resistência

estrutural estava relacionado à formação de algum agente cimentante ao longo do tempo de cura, foram realizadas as análises por MEV e DRX no solo e nas amostras AM-1 e AM-4 com tempo de cura de 56 dias.

Os difratogramas obtidos a partir das

caracterizações mineralógicas por difração de Raios-X executados no solo natural (REF) e nas amostras estabilizadas com soluções de concentração de 1% (AM-1) e 4% (AM-4) com 56 dias de cura são apresentados nas figuras 20, 21 e 22, respectivamente.

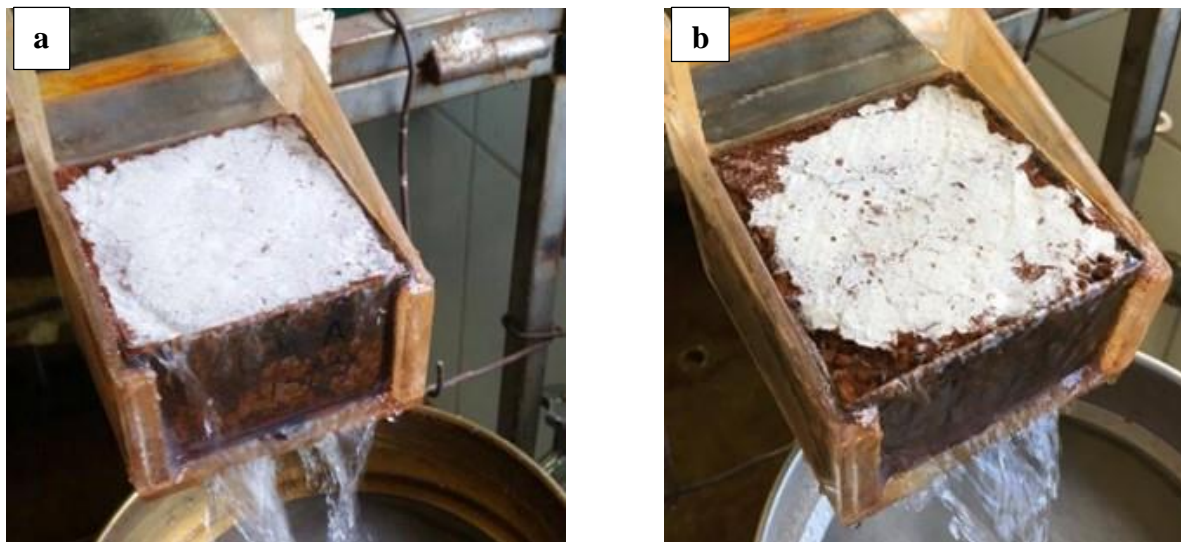


Figura 19. Bordas danificadas devido à retração: a) Amostra AM-2 e b) Amostra AM-4.

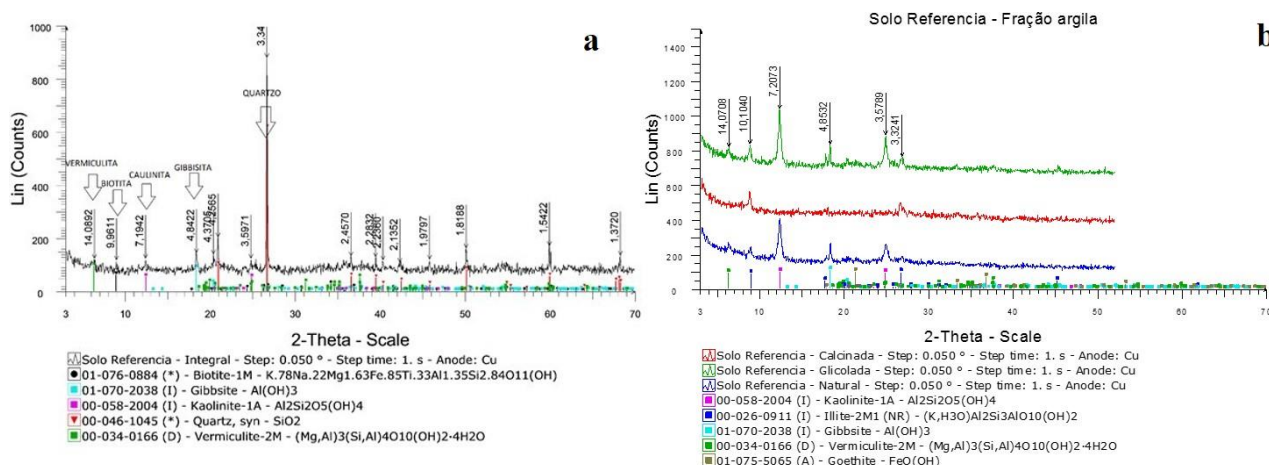


Figura 20. Caracterização mineralógica por DRX - Diagramas da amostra REF. a) Análise da amostra integral, b) Análise da fração fina (argilas).

A partir da análise dos primeiros difratogramas (Figuras 20a e 20b) foi possível verificar a presença no solo de minerais primários como quartzo e biotita (mica); e minerais secundários como as argilas (caulinita, vermiculita e illita), gibbsita (hidróxido de alumínio) e goethita (hidróxido de ferro).

A presença destes vários minerais secundários, produtos do intenso processo de intemperismo na região de extração das amostras, é típica de solos lateríticos (Nogami & Villibor, 1995).

Esse resultado está de acordo com a

caracterização do material apresentado em materiais e métodos.

Esses mesmos minerais estão presentes na amostra tratada com solução de cal com concentração de 1% e com tempo de cura de 56 dias, diferenciando-se do solo natural (REF) apenas pela presença do mineral anatásio (Figura 21), não proveniente da cal, de origem do próprio solo.

A presença de calcita (CaCO_3) foi detectada apenas na amostra tratada com solução de cal 4%, sendo que os demais minerais permaneceram inalterados, como pode ser visto na figura 22.

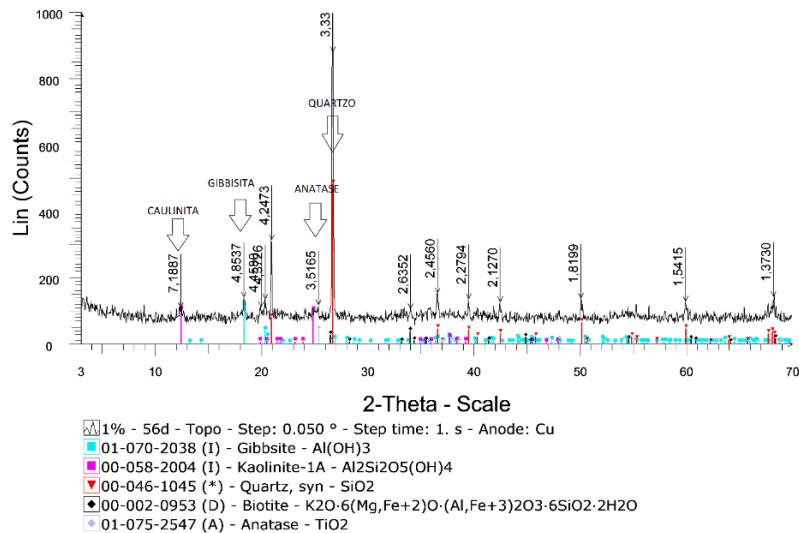


Figura 21. Caracterização mineralógica por DRX - Diagrama da amostra AM-1 com 56 dias de cura.

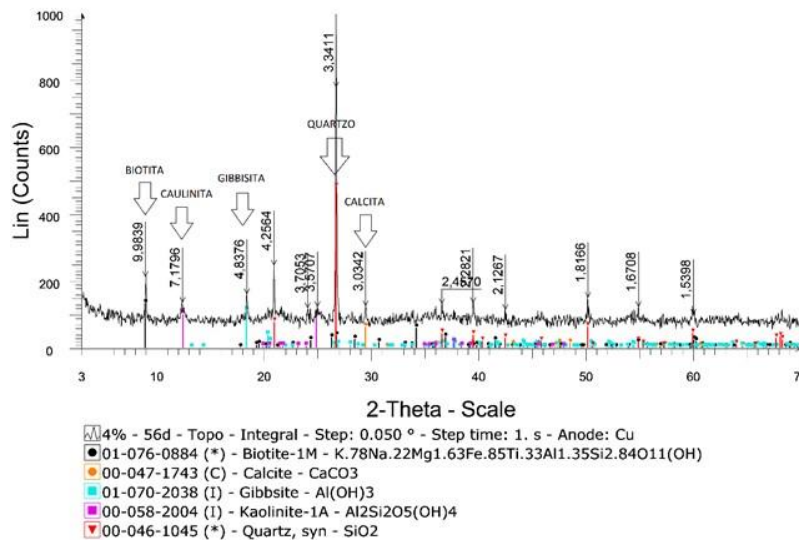


Figura 22 - Caracterização mineralógica por DRX - Diagrama da amostra AM-4 com 56 dias de cura.

Vale ressaltar que as amostras para as análises foram retiradas da superfície do corpo de prova.

Dash & Hussain (2012) realizaram a análise de difração de Raios-X em uma amostra de solo (argila de alta plasticidade tendo como principal argilomineral a montmorilonita) estabilizada com 13% de cal (relação com a massa seca) aos 28 dias de cura.

Os autores observaram no solo sem tratamento a presença de alguns minerais comuns ao tipo de solo e, nas amostras estabilizadas, o surgimento de compostos cimentantes, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), e hidróxidos de aluminossilicato de cálcio hidratado (CASHH).

Vale ressaltar que os tipos de compostos formados dependem da composição química e mineralógica primária do solo, do teor de cal adicionado e de outros fatores como tempo, umidade e temperatura do solo. A eficiência do

tratamento no ganho de estabilidade estrutural do solo pode ser verificada a partir da figura 23.

Verificou-se que o lado da amostra AM-4 que recebeu o tratamento (Figura 23b) não desagregou, após tempo de cura de 56 dias, ao contrário do lado da amostra que não recebeu nenhum tipo de tratamento (Figura 23a).

A microestrutura da amostra de solo tratado com 1% de cal (AM-1) e com 4% (AM-4), ambas com 56 dias de cura, são apresentadas na figura 24. A partir da figura 24a, obtida na amostra de solo referência (REF) não tratada, observam-se a presença das agregações de argilas, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, típicas de solos lateríticos, o que resulta na existência de macroporos e microporos compondo a matriz, conforme verificado por Cozzolino & Nogami (1993). Essa mesma microestrutura foi verificada na amostra tratada com 1% (Figura 24b)

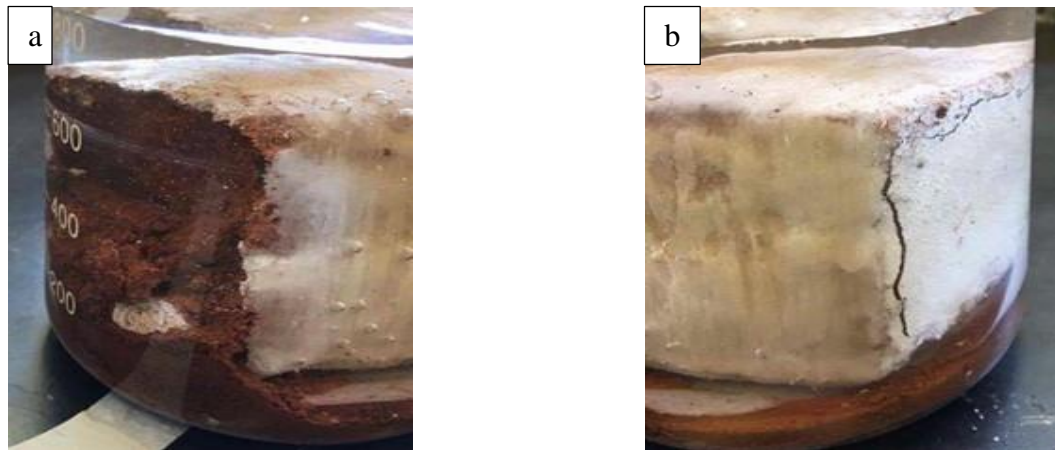


Figura 23 - Ensaios de desagregação: a) 4º estágio do ensaio de imersão parcial do CP 4% e 56 dias de cura (lado sem tratamento) e b) 4º estágio do ensaio de imersão parcial do CP 4% e 56 dias de cura (lado com tratamento).

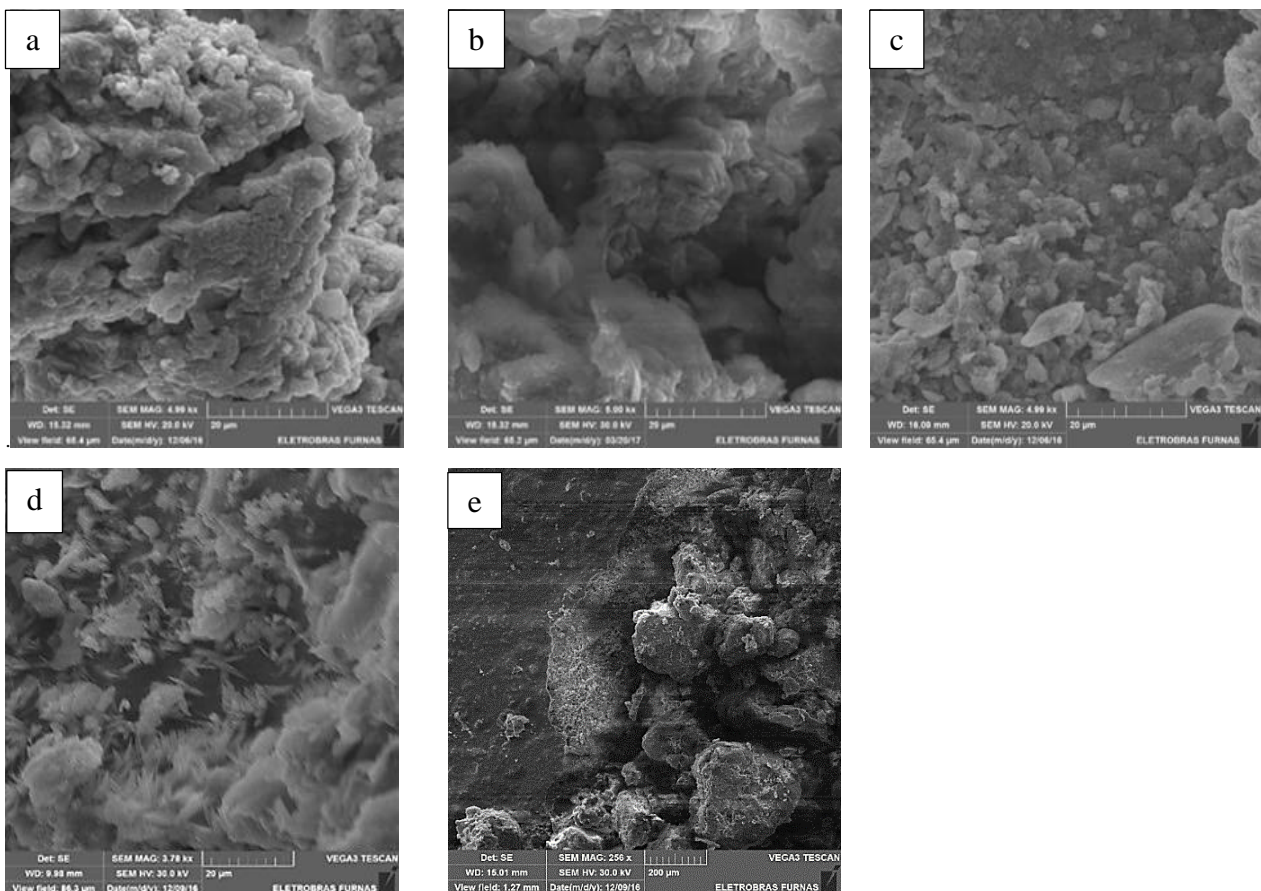


Figura 24 - Imagens microscópicas obtidas por MEV com detector SE: a) solo referência (REF); b) amostra (AM-1) com 56 dias de cura; c) amostra (AM-4) com 56 dias de cura – ponto 1; d) amostra (AM-4) com 56 dias de cura – ponto 2; e) Discrepância quanto ao nível das interações entre estrutura/minerais presentes no solo e na cal.

As imagens das figuras 24c e 24d foram obtidas da mesma amostra (AM-4), porém de pontos diferentes. A imagem da figura 24c apresenta características estruturais muito semelhantes às amostras REF e AM-1, por tratar-se de região sem evidências de cal. Já na imagem da figura 24d observa-se uma estrutura diferente, sendo possível verificar a formação de pequenos cristais em forma de agulhas.

Rocha & Resende (2017) também verificaram

esse tipo de estrutura na análise por MEV em amostras de solos misturadas com cal e cimento. Suganya & Sivapullaiah (2016) relatam que essa estrutura rígida na forma de agulhas curtas e de feixes consiste em calcita. Dessa forma, a microscopia confirma a formação da calcita verificada pela difração de Raios-X para a amostra AM-4 após 56 dias de cura.

As diferenças entre as imagens apresentadas nas figuras 24c e 24d ocorrem possivelmente

porque a quantidade de cal adicionada à amostra por meio da aplicação da solução de cal não se difundiu (percolou) de forma homogênea dentro da amostra de tal forma que houve regiões discrepantes quanto ao nível das interações entre estrutura/minerais presentes no solo e a cal.

A figura 24e ilustra esta afirmação exibindo, do lado esquerdo, uma região totalmente impregnada pela cal formando uma espécie de capa; ao centro, uma transição entre esta capa e o solo e; do lado direito, o solo com aspecto típico laterítico com macroporos entre agregações.

Como comentado anteriormente, a estabilização de solos finos com cal ocorre

devido às reações de curto e longo prazo. De acordo com os resultados apresentados nesse trabalho, as reações de curto prazo aumentam a resistência do solo quanto à erodibilidade superficial, reduzindo significativamente a perda de massa desse solo na condição saturada e na condição não saturada para amostra com 1% de concentração.

No entanto, quando se trata de estabilidade estrutural, o comportamento do solo depende também do agente cimentante, nesse caso a calcita, visto que apenas com concentrações acima de 2% e 28 dias de cura as amostras de solo não desagregaram.

CONCLUSÃO

O tratamento do solo por meio do uso de solução de cal provocou redução na perda de massa do solo, conforme verificado por meio dos ensaios de Inderbitzen, e melhoria da estabilidade estrutural, como observado por meio dos ensaios de desagregação.

Em termos de influência da concentração, observou-se reduções significativas de perda de massa para os tratamentos com solução contendo 1% de cal, na condição saturada e não saturada.

O tempo de cura não teve relevância para a perda de massa de solo devido ao escoamento superficial, mas foi expressiva na melhoria da estabilidade estrutural. Esse comportamento mostra que as reações de curto prazo são importantes na redução da perda de massa, mas a formação do agente cimentante, sendo nesse trabalho a calcita, foi imprescindível para essa melhoria. Sendo assim, a concentração da solução ideal constatada neste trabalho para esse

tipo de tratamento foi 2%, pois com essa concentração são mitigados os efeitos do escoamento superficial, o solo é estabilizado frente à ação de inundação e há redução da perda de massa devido a não saturação do solo.

Um fator importante a ser destacado é a necessidade de execução de ensaios de durabilidade das amostras tratadas, visto que o talude do reservatório é submetido a ciclos de molhagem e secagem, devido à variação de seu nível de água ao longo do ano.

Destaca-se que os baixos teores de cal hidratada (da solução de cal), utilizados na metodologia proposta neste trabalho com efetivo desempenho na resistência à erodibilidade/desagregação do solo, torna animadora a viabilidade técnica-econômica do emprego para o objetivo proposto neste trabalho – qual seja - sua aplicação em margens de reservatórios sujeitas a erosão laminar.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação CAPES pelo fornecimento da bolsa de mestrado do primeiro autor, à Eletrobrás-Furnas e à ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) pelo financiamento da pesquisa por meio do P&D Monitoramento e Estudo de Técnicas Alternativas na Estabilização de Processos Erosivos em Reservatórios de UHEs, ao Laboratório de Microscopia e Difração de Raios-X da Eletrobrás Furnas pela execução dos ensaios de difração de Raios-X e microscopia eletrônica de varredura e ao Laboratório de Geotécnica da UFG, pela realização dos demais ensaios.

REFERÊNCIAS

- ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro, 2003.
- AGUIAR, V.G. **Bacia hidrográfica do córrego granada – Aparecida de Goiânia – GO: os processos erosivos e a dinâmica espacial urbana**. Goiânia, 2009. 97 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás.
- AHMED, A.; UGAI, K.; KAMEI, T. Laboratory and field evaluations of recycled gypsum as a stabilizer agent in embankment construction. **Soils and foundations: Japanese geotechnical society**, v. 51, n. 6, p. 975-990, 2011.
- ALMEIDA, J.G.R.; ROMÃO, P.A.; MASCARENHA, M.M.A.; SALES, M.M. Erodibilidade de solos tropicais não saturados nos municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis. **Geociências**, v.34, n. 3, p. 441-451, 2015.
- ALMEIDA, J.G.R.; ROCHA, M.F.; GITIRANA JR., G.F.N. A influência da sucção na erodibilidade de um solo compactado:

- estudo de caso em um solo erosivo do Córrego Barreiro. In: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO CENTROOESTE E 6º SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS – GEOCENTRO, 3, 2013, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: ABMS, 2013, p. 63-69.
- ANGELIM, R.R. Influência do procedimento de mistura da cal hidratada ao solo no comportamento do solo estabilizado para fins de pavimentação rodoviária. In: II SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO-OESTE, Goiânia 2005. **Anais...** Goiânia: 2005, p. 261-266.
- BASTOS, C.A.B.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W. Proposta metodológica para avaliação geotécnica da erodibilidade de solos residuais não saturados. In: VII SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROÇÃO, Goiânia, 2001, **Anais...** Goiânia, 2001, 9p.
- BELL, F.G. Lime stabilization of clay minerals and soils. **Engineering Geology**, v. 42, p.223-237, 1996.
- COZZOLINO, V.N.M. & NOGAMI, J.S. Classificação geotécnica MCT para solos tropicais. **Revista Solos e Rochas**, v. 16, n. 2, p. 77-91, 1993.
- DASH, S.K. & HUSSAIN, M. Lime stabilization of soils: Reappraisal. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 6, p. 707-714, 2012.
- DIAS, V. **Assoreamento prejudica geração de energia elétrica**. Universidade de São Paulo. Editora: Agencia USP de notícias, São Paulo, 2011. 1-3p. Disp. em: <<http://www.usp.br/agen/?p=66896>>14dez2016.
- ELISSON, W.D. Soil erosion studies. **Agronomy Engineering**, v. 28, 1947.
- GUIMARÃES, J.E.P. **A Cal - Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. Associação Brasileira de Produtores de Cal – ABPC. São Paulo: PINI, 285 p., 1998
- HARICHANE, K.; GHRICI, M.; KENAI, S.; GRINE, K. Use of natural pozzolana and lime for stabilization of cohesive soils. **Geotech Geol Eng**, v. 29, p. 759-769, 2011.
- HERRIER, G.; LECONTE, P.; NERINCX, N.; BONELLI, S.; MERCIER, F.; FRY, J.J.; TACHKER, P.; PUIATTI, D. Lime treated soil as an erosion-resistant material for hydraulic earthen structures: state of the art and presentation of the french Digue.Elite Project. In: THE SOUTH BALTIC CONFERENCE ON DREDGED MATERIALS IN DIKE CONSTRUCTION, 2014, Rostock. **Proceedings...**2014, p.75-84
- JAMES, J. & PANDIA, P.K. Effect of phosphogypsum on strength of lime stabilized expansive soil. **Gradevinar**, v. 66, n. 12, p. 1109-1116, 2014.
- JAMES, J. & PANDIAN, P.K. **Industrial wastes as auxiliary additives to cement/lime stabilization of soils**. Hindawi Publishing Corporation Advances in Civil Engineering, 17 p., 2016.
- KRISHNAN, D.K.; JANANI, V.; RAVICHANDRAN, P.T.; ANNADURAI, R.; GUNTURI, M. Soil stabilisation using phosphogypsum and flyash. **International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)**, v. 9, n. 14, p. 736-739, 2014.
- LUZ, M.P.; SALES, M.M.; ANGELIM, R.R. **Nota técnica, 2015**. Apresenta a contratação de empresa de engenharia para execução de protótipos de obras de tratamento de processos erosivos em trechos específicos da margem direita de motante do reservatório da UHE Itumbiara, em Buriti Alegre-GO, 51 p.
- NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. 1. ed. São Paulo, 213p., 1995.
- PAIVA, S.C.; LIMA, M.A.A.; FERREIRA, M.G.V.X.; FERREIRA, S.R.M. Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. **Revista Matéria**, v. 21, n. 2, p. 437-449, 2016.
- REZENDE, L.R. (2003). **Estudo do comportamento de materiais alternativos utilizados em estruturas de pavimentos flexíveis**. Brasília, 2003. 372p. Tese (Doutorado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.
- RIBEIRO, I; ANGELIM, R.R.; GUIMARÃES, R.C. Análise granulométrica de solos tropicais com granulômetro a laser. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG. Goiânia, 2014. **Anais...** São Paulo: ABMS, 2014, 9 p.
- ROCHA, M.T. & REZENDE, L.R. Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação. **Revista Matéria**, v.22, n.4, doi: 10.1590/s1517-707620170004.0229, 2017.
- SALES, M.M. **Monitoramento e estudo de técnicas alternativas na estabilização de processos erosivos em reservatórios de UHEs**: Relatório de Atividades. Goiânia, 21 p., 2012.
- SANTOS, A.R. **Técnica cal-jet: Proteção de solos contra a erosão através de pulverização de calda de cal**, 25 p., 2009.
- SANTOS, R.M.M. **Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no município de Goiânia**. Brasília, 1997, 138 p. Dissertação (Mestrado em Geotécnica), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.
- SOUSA, A.C.L. & REIS, G.C. **Aplicação de cal hidratada em suspensão em um solo laterítico para mitigação de processos erosivos**. Goiânia, 2016. 66p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária). Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás.
- SUGANYA, K. & SIVAPULLAIAH, P.V. Role of sodium silicate additive in cement-treated kuttanad soil. **Journal of Materials in Civil**, v. 28, n. 6, p. 1-6, 2016.
- TERRA, V.S.; GITIRANA JUNIOR, G.F.N.; MASCARENHA, M.M.A.; DOMINGOS, V.H.; ALMEIDA, J.G.R. Influência da poropressão de ar no ensaio de desagregação por imersão total em água. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, VIII, 2015, FORTALEZA. **Anais...** FORTALEZA: São Paulo: ABMS, 2015, p.1-9.

Submetido em 16 de fevereiro de 2018
Aceito em 30 de outubro de 2018