

CHEMICAL, PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CLAYEY SOIL WITH ADDITION OF CARBIDE LIME

Alexandre Guibson de Lima Ribeiro¹, Dyego Silva Marques², Anderson de Oliveira Castro³

^{1,2,3} Centro Universitário do Norte – UNINORTE - Laureate Universities, Brasil, Rua Leonardo Malcher, 715 – Centro, Manaus/AM.

Email: alexadreguibson93@gmail.com, dyegomarques2017@gmail.com, anderson.castro@uninorte.com.br

Received: June 15th, 2019

Accepted: June 19th, 2019

Published: September 30th, 2019

Copyright ©2016 by authors and Institute of Technology Galileo of Amazon (ITEGAM). This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

ABSTRACT

The acetylene gas is used as fuel in the industries causes environmental requirements concerning by the disposal of the waste from their manufacture, known as carbide lime (HL), which is processed for a solid form. Thus, recycling results in the reduction of solid waste storage, and prevent, for example, the exploitation of raw material for manufacture of industrial limes. In this scenario, we investigate the behavior of a clay soil when added carbide lime 2% and 4% as soon as the natural condition and aged in an oven at 110°C for 2 hours. For this purpose, characterized samples for chemical analysis of macro and micro-nutrients (Ca, Mg, K, Al, P, Zn) — where calcium, magnesium and aluminum exchangeable were extracted by 1N KCl, also on physical indexes recommended by the Brazilian Association of Technical Standards — size, Atterberg limits and compaction. Finally, we carried out mechanical tests of compression strength (MCS) and resilient modulus (RM). Regarding the chemical properties were obtained through atomic absorption spectrophotometer concentrations of macronutrients and micronutrients, such as levels of P (phosphorus) relatively low in samples of soil and effect of CC in high clay content retain more phosphorus and present factors-specific adsorption anions by retaining the solid phase by strong bonds (covalent), becoming part of the structure of the micelle. In contrast, the presence of organic matter and calcium ions (Ca²⁺) and magnesium (Mg²⁺) increases the cation exchange capacity (CEC), improves the structure and the buffer capacity of the soil leaving the pH stable.

Keywords: Clay Soil. Carbide Lime. Chemical Stability. Resilience Modulus. Mechanical tests.

PROPRIEDADES QUÍMICAS, FÍSICAS E MECÂNICAS DE UM SOLO ARGILOSO COM ADIÇÃO DO RESÍDUO CAL DE CARBURETO

RESUMO

O gás acetileno empregado nas indústrias como combustível acarreta requisitos ambientais concernentes à destinação do resíduo da sua fabricação, conhecido como cal de carbureto (CC), do qual é processado para a forma sólida. Neste panorama, investiga-se o comportamento de solo argiloso quando adicionado de cal de carbureto em 2% e 4%, tão logo na condição sem e com envelhecimento em estufa a 110°C por duas horas. Para isso, caracterizou-se as amostras quanto a análise química de macro e micro nutrientes (Ca, Mg, K, Al, P, Fe, Zn) — onde Cálcio, Magnésio e Alumínio trocável foram extraídos por KCl 1N, e também índices físicos preconizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas — granulometria, limites de consistência e compactação. Por fim, realizaram-se testes mecânicos de resistência a compressão simples (RCS) e módulo de resiliência (MR). A respeito das propriedades químicas obtiveram-se por meio do espectrofotômetro de absorção atômica concentrações de micro e macronutrientes, como teores de P (fósforo) relativamente baixos nas amostras de solo e CC, em efeito do alto teor de argila fixar mais fósforo e apresentar fatores de adsorção específica retendo os ânions pela fase sólida, mediante ligações fortes (covalentes), passando a fazer parte da estrutura da micela. Em contraposição, a presença de matéria orgânica e de cátions de Cálcio (Ca²⁺) e magnésio (Mg²⁺) aumenta a capacidade de troca catiônica (CTC), melhora a estrutura e capacidade tampão do solo deixando o pH estável.

Palavras-chave: Solo Argiloso. Cal de Carbureto. Estabilização Química. Módulo de Resiliência. Ensaios Mecânicos

I. INTRODUÇÃO

As bacias sedimentares da Amazônia apresentam abundância de solos argilosos, produtos da alteração intempérica de unidades sedimentares antigas, formados pela alternância de períodos com clima quente e úmido desde o Paleógeno, que por consequência gerou-se grande quantidade de material friável, onde os argilominerais são os principais constituintes [1]. Tais argilominerais possuem capacidade de troca catiônica, possibilitando reações químicas com compostos acrescentados. Desta maneira, podem-se estabilizar solos com aditivos químicos industrializados, como o *dynacal*, o qual é adicionado após misturar o solo com resíduo de carbureto (hidróxido de cálcio), neste caso os argilominerais do solo adsorvem os íons de cálcio do hidróxido de cálcio, modificando sua atividade superficial seguido de outros efeitos mais lentos entre os íons de cálcio e componentes aluminosos e silicosos, transformando-os em silicatos e aluminatos de cálcio que cimentam as partículas do solo, assim promovendo efeitos estabilizantes [2].

Relativo ao termo estabilização do solo compreende-se a qualquer processo, natural ou artificial, pelo qual um solo, sob o efeito de cargas aplicadas, se torna mais resistente à deformação e ao deslocamento, do que o solo original. Tais processos consistem em modificar as características do sistema solo-água-ar com a finalidade de se obter propriedades de longa duração compatíveis com uma aplicação particular [3]. Dentre os inúmeros métodos de estabilização de solos para fins construtivos, o que tem sido identificado como o mais prático é o da estabilização química. Esse método se refere aqueles em que tanto as interações químicas e físicas, podem ocorrer durante o método de estabilização, destacando-se diversas técnicas tradicionais — por exemplo, solo com cimento, cal hidratada ou emulsão [4,5,6,7,8,9,10,11], e não usuais como a do solo – cal de carbureto.

Por outro lado, a estabilização com cal hidratada é um método aplicado em solos que contêm uma significativa fração argila, cuja superfície dos argilominerais são deficientes em cargas, e para isso atraem-se cátions e moléculas água para a superfície carregada negativamente, logo como a cal é fonte de cálcio livre (Ca^{++}) estes são adsorvidos pela superfície dos argilominerais [12]. Portanto, os resultados da estabilização variam dependendo da natureza dos minerais de argila e são melhores sob alta concentração de silicatos de alumínio, sílica e hidróxido de ferro [13].

Acerca do resíduo de hidróxido de cálcio (cal de carbureto), obtido como resíduo industrial da produção do gás acetileno durante a mistura de carbeto de cálcio (popularmente conhecido como carbureto) com água [1], possui propriedades típicas como: produção elevada em processo eletroquímico, podendo ser utilizada na construção civil [13,14], contém alto teor de hidróxido de cálcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e reatividade mais baixa que a cal industrial.

Atinente aos solos, estes podem desempenhar várias funções, ora como bases de sustentação das obras (fundações), ora como materiais de construção para diferentes aplicações (pavimentos, barragens, aterros, tijolos, blocos etc.), portanto devendo apresentar certas propriedades físicas e mecânicas relacionadas à solidez volumétrica, cujos solos argilosos, em geral, não apresentam essas propriedades, então necessitando promover a sua estabilização.

Concernente aos mecanismos das reações envolvidas entre a cal hidratada e/ou cal de carbureto e os constituintes do solo, seguem reações de floculação/aglomeração e trocas iônicas entre os argilominerais e a cal. Tais reações favorecem a alteração de suas propriedades geotécnicas, tais como: aumento do limite de plasticidade e diminuição do limite de liquidez e do índice de

plasticidade; achatamento das curvas de compactação com o aumento do teor de umidade ótima e diminuição da massa específica aparente seca máxima; e aumento da resistência, durabilidade e estabilidade volumétrica. Posteriormente, ocorre a formação de compostos químicos sílico-aluminosos pelo ataque da cal aos minerais argilosos e ao quartzo. Simultaneamente ocorrem os fenômenos de carbonatação, com o ataque do anidrido – carbônico presente no ar e na água de infiltração, aos hidroxidados da cal [14].

No caso particular dos solos argilosos, a adição de cal de carbureto provoca reações de troca iônica, mudanças das estruturas cristalinas, recarbonatações e, sobretudo, a formação de novos minerais capazes de cimentar as partículas e ou preencher os espaços intercristalinos [13]. De imediato, a cal hidratada provoca elevação da alcalinidade do solo, tornando estável alguns dos seus constituintes, permitindo um possível ataque ao silício e ao alumínio presente nos minerais do solo e a recombinação desses íons com o cálcio. Nessas condições uma nova estrutura cristalina aparece com a ocupação de vazios existentes entre os agregados, dando sustentação à micro-estrutura da mistura solo – cal compactada.

Com efeito, pesquisas de análise do desempenho mecânico das reações solo e cal de carbureto permitem concluir que o resíduo de cal de carbureto possui semelhança química com a cal hidratada, como também pode ser utilizado como material cimentício [15], auxiliando no suporte em longo prazo [16], efetivamente com maior resistência à compressão simples, durabilidade em imersão e Índice Suporte Califórnia, relativo às misturas solo - cal hidratada [17].

Doutro modo, é de grande interesse ambiental a reciclagem da cal residual em aplicações substituindo as cales industriais ou em novas aplicações e, consequentemente evitando seu descarte e reduzindo áreas degradadas pela exploração de rochas calcárias utilizados na produção de cal industrial. A busca de meios de reciclar esse resíduo vem sendo muito intensa nos últimos anos, onde se podem encontrar muitas aplicações como estações de tratamento de água e esgoto, estabilização química e neutralização de solos. Contudo, poucos trabalhos [16,17,18,19,6,7,20,21,22,23] focam a utilização desse resíduo como material de construção. Assim, o objetivo deste trabalho é a estabilização química de um solo argiloso com resíduo de cal de carbureto identificando as propriedades químicas, físicas e mecânicas, mormente a uma alternativa ambiental. Tal solo argiloso foi coletado no município de Manaus, propriamente nas dependências da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), verificando-se inicialmente a predominância da fração argila pelo método de análise visual e tátil.

No tocante a maceração química das amostras de solo nas condições – natural e aditada de cal de carbureto, utilizou-se os ensaios de macro e micro nutrientes (Ca, Mg, K, Al, P, Fe, Zn), onde Cálcio, Magnésio e Alumínio trocável foram extraídos por KCl 1N. O Al^{3+} trocável, foi titulado numa fração do extrato com NaOH 0,025 N, na presença de azul de bromotimol como indicador. Em outra fração do extrato o Ca^{+2} e Mg^{+2} foram determinados por Espectrofotometria de Absorção Atômica – EAA. Fósforo, Potássio e micronutrientes do solo (Ferro, Zinco, e Cobre) foram extraídos com solução extratora de Mehlich I, também chamada de solução de duplo-ácido, constituída por uma mistura de HCl 0,05 M + H_2SO_4 0,0125 M. A relação solo: extrato sugerido foi de 1:10 mL. O K, Fe, Zn e Mn posteriormente demarcados por Espectrofotometria de Absorção Atômica – EAA. O fósforo disponível determinou-se por colorimetria no Espectrofotômetro usando molibdato de amônio e ácido ascórbico a 3%. Estes experimentos conduziram-se no Laboratório de

Análises do Solo do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA

Atinente à caracterização física realizou-se ensaios de granulometria, limites de consistência e compactação, preconizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, igualmente determinou-se o comportamento mecânico segundo a Resistência à Compressão Simples (RCS) e Módulo de Resiliência (MR). O conjunto desses ensaios realizou-se nos Laboratórios do Grupo de Geotecnia da Universidade Federal do Amazonas.

II. METODOLOGIA

Objetivando utilizar um solo argiloso no estudo proposto, coletou-se material do Campus da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), situado nas coordenadas $-3^{\circ} 5' 20,29892''$ (latitude) e $-59^{\circ} 57' 57,12552''$ (longitude), conforme Figura 1. A presença da fração argila foi identificada inicialmente de acordo com análise expedita táctil e visual. Na sequência, o solo foi seco a sombra e ao ar, a fim de iniciar os processos de preparação das amostras para os ensaios físicos e mecânicos no Laboratório de Solos do Grupo de Geotecnia - GEOTEC/UFAM. Concernente ao recolhimento do material para análise química procurou-se ter os cuidados necessários quanto ao manuseio por meio de recipientes não metálicos, prosseguindo-se com a secagem natural deste. Em seguida, destorroou-se, peneirou-se e tratou-se o solo segundo o preconizado nas metodologias de cada experimento.



Figura 1 – Ponto de coleta em estudo (UFAM)
Fonte: Autores, (2019).

Ao receber as porções de cal de carbureto em estado úmido, fornecida por uma empresa do Polo Industrial de Manaus (PIM), estas foram colocadas em estufa até 110°C , e, por conseguinte destorroada e passada na peneira 2,00mm a fim de homogeneizar os grãos e facilitar o uso como material fino. Incorporou-se o citado resíduo ao solo argiloso nos percentuais 0%, 2%, 3% e 4%, representadas respectivamente pelas amostras i, ii, iii e iv. Nos ensaios físicos e mecânicos, excetuaram-se as misturas com 3% de CC (amostra iii). Esta última, sobre o processo de mistura solo e cal de carbureto, foi agregada ao solo antes do início dos ensaios, de forma a não perder as propriedades aglutinantes desenvolvidas no tempo inicial da mistura solo-cal.

A respeito dos ensaios químicos, baseou-se nas metodologias dispostas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e utilizou-se KCl 1N, NaOH 0,025N, indicador azul de bromotimol (Figura 2.a), solução extratora de Mehlich I (solução de duplo ácido), pHmetro, titulador automático (Figura 2.b) e espectrofotômetro de absorção atômica (EAA), apresentado na Figura 2.c.

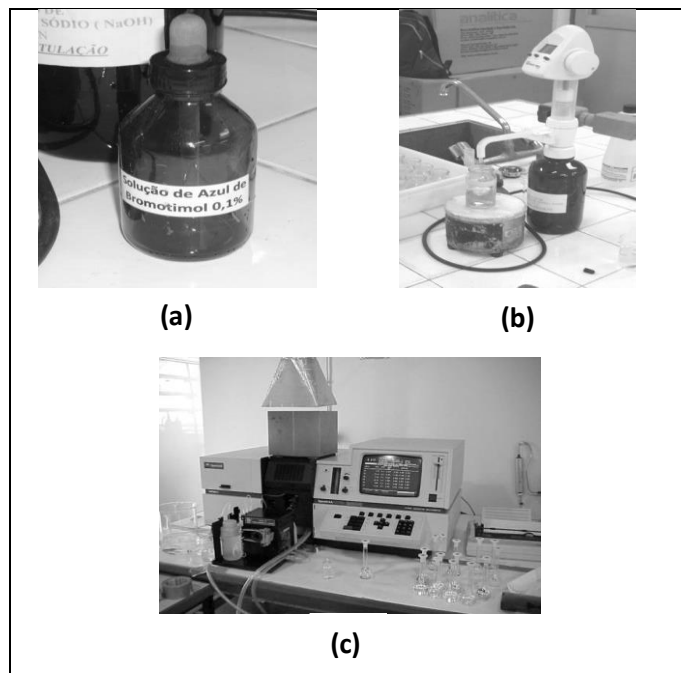


Figura 2 – Materiais para análises químicas (INPA).
Fonte: Autores, (2019).

No tocante as análises químicas, inicialmente pesaram-se 40 g de solo argiloso em uma balança analítica e em seguida dividiu-se em 4 amostras para os ensaios químicos. Em seguida armazenaram-se as amostras em recipientes com tampa, sendo encaminhadas ao Laboratório de Análises de Solo da Coordenação de Pesquisas em Ecologia (CPEC) do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA.

Para determinar o pH, empregou-se a concentração efetiva de íons H^+ por meio de eletrodo combinado, diretamente imerso na solução de solo diluído em água na proporção de 1:2,5ml. Relativo à presença do Cálcio, Magnésio e Alumínio trocável, estes foram extraídos por KCl 1N, onde particularmente o Al^{3+} trocável foi titulado numa fração do extrato com NaOH 0,025 N, na presença de azul de bromotimol como indicador. Em outra fração do extrato demarcaram-se o Ca^{+2} e Mg^{+2} por Espectrofotometria de Absorção Atômica – EAA.

No caso do Fósforo, Potássio e micronutrientes do solo (Ferro, Zinco, Manganês e Cobre) foram extraídos com solução extratora de Mehlich I, também chamada de solução de duplo-ácido, constituída pela mistura de HCl 0,05 M + H_2SO_4 0,0125 M. A relação solo: extrato sugerido foi de 1:10 mL. O K, Fe, Zn e Mn, sendo (C) delimitados por Espectrofotometria de Absorção Atômica – EAA. O fósforo disponível foi indicado por colorimetria no Espectrofotômetro usando molibdato de amônio e ácido ascórbico a 3%.

Quanto aos experimentos de caracterização física executaram-se os procedimentos das normas NBR7181/84 – Análise Granulométrica, NBR6459/84 – Determinação do Limite de Liqueidez, NBR7180/84 – Determinação do Limite de Plasticidade, NBR 6508/84 – Determinação da Massa Específica, NBR7182/88 – Ensaio de Compactação. Os testes de Resistência à Compressão Simples (RCS) e Módulo de Resiliência (MR) realizaram-se na Universal Testing Machine – UTM 14, de suporte máximo igual a 14 kN, com auxílio do software Unbound Material Resilient Modulus and Shear Test - UTS009 1.28.

Para tais ensaios mecânicos confeccionaram-se corpos de prova cilíndricos nas dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, segundo os parâmetros (γ_{dmax} e w_{ot}) determinados no ensaio de compactação. Particularmente, o teste de MR (ensaio não

destrutivo sob cargas cíclicas) e o ensaio de RCS, que compreende a aplicação de uma carga crescente e contínua visando determinar a ruptura do material, seguiram o preconizado pela norma AASHTO T294 – Standard Method of Test for Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils (SHRP Protocolo P46).

Ressalta-se que tais ensaios executaram-se de duas formas imediatamente após a confecção dos corpos de prova, ou seja, sem tempo de cura, e após duas horas em estufa a 110°C. A exposição do corpo de prova a altas temperaturas tem como função provocar uma degradação de campo que ocorre em um longo tempo, isto é, simular um envelhecimento de forma acelerada [4,24].

Concernente a interpretação dos dados obtidos no ensaio de módulo de resiliência (Figura 3), empregou-se o modelo composto (equação A) proposto por Macêdo (1996) com efeito na aplicabilidade segundo a literatura, pois além de conter a tensões, confinante e de desvio, e os parâmetros determinados experimentalmente, este modelo apresenta σ_d em apenas um membro da equação do qual é mais aceitável do ponto de vista estatístico, como também não representa o MR somente em função da tensão confinante (σ_3) por não ser o modelo mais adequado para expressar a coesão de solos argilosos [25].

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (1)$$

Onde:

MR - Módulo de resiliência (MPa)

σ_3 - Tensão confinante (MPa)

σ_d - Tensão desvio (MPa)

k_1, k_2, k_3 - Constantes experimentais

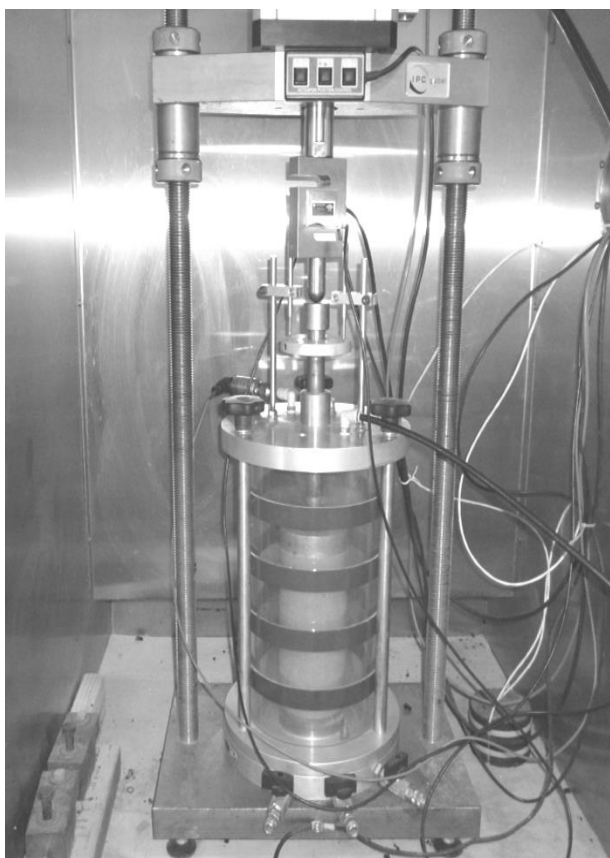


Figura 3 – Copo de prova submetido a ensaios mecânicos.
Fonte: Autores, (2019).

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O pH constitui-se em uma medida bastante simples e expedita de determinação laboratorial, mas, sem dúvida, de grande importância. Reflete um conjunto complexo de reações do sistema solo-solução e é muito útil quando associado a propriedades do solo, como o estado em que se encontram as bases [26], e a solubilidade de micronutrientes em alguns extratores. O método original para a relação solo: solução (1:2,5) foi adotado em 1930 pela Comissão de Reação do Solo da Sociedade Internacional de Ciência do Solo.

De acordo com o manual de análises químicas de solos da EMBRAPA, o resultado do pH indicou excessivamente ácido o solo natural (amostra i), enquanto que as amostras com 2%, 3% e 4 % de CC (ii, iii e iv), presentes na Figura 4, foram consideradas pouco ácidas, conforme mostra a Tabela 1. Portanto, obteve-se para o solo natural pH igual a 3,5, e para as misturas com a cal de carbureto resultado em torno de 6,5. Enfatiza-se que o pH do solo varia de acordo com a região em que está localizado, como por exemplo, nas regiões ricas em calcários os solos mostram-se alcalinos (pH maior ou igual a 7), contrastando com regiões úmidas que correspondem a solos ácidos (pH menor ou igual a 7).



Figura 4 – Solo natural, solo + 2% de CC e solo + 4% de CC.
Fonte: Autores, (2019).

Tabela 1 - Parâmetro pH do solo.

pH	Estado do solo
Abaixo de 4,5	Excessivamente ácido
De 5,3 a 5,8	Muito ácido
De 5,9 a 6,4	Ácido
De 6,5 a 7,1	Pouco ácido
De 7, 2 a 8,0	Alcalino

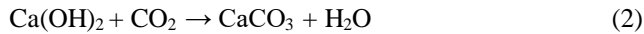
Fonte:

Autores, (2019).

A adição da cal de carbureto a base de CaO (óxido de cálcio), neutraliza a acidez do solo: $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$, e quando adicionada ao solo argiloso, ocorre o fenômeno de troca de bases com os minerais de argila. Essa reação leva à floculação das partículas argilosas, causando o aumento do ângulo de atrito da massa do solo [4]. O reagente óxido de cálcio se combina a água presente no solo e dá origem ao produto hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), uma base que diminui a acidez do solo.

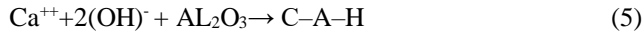
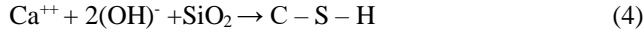
Na estabilização do solo com a cal de carbureto, tem-se a presença de uma determinante variável na obtenção de resistência mecânica, ou seja, o tempo das amostras permanecerem em cura, devido às reações promovidas entre a cal, água e os compostos presentes no solo [24]. Os ganhos de resistência são obtidos

principalmente por meio de reações lentas como a carbonatação, conforme Equação 2:



Esta constitui-se em uma reação química prejudicial da cal com o dióxido de carbono presente na atmosfera, formando carbonato relativamente insolúvel [11]. Uma visão simplificada e qualitativa de algumas reações típicas de solo + CC pode ser apresentada a seguir:

Reações Pozolânicas



Sendo que o C-S-H (silicato hidratado cálcio) e o C-A-H (aluminato hidratado de cálcio) são os compostos com alto poder cimentante responsáveis pela resistência aparente do solo aditivado com cal de carbureto

Na avaliação da acidez do solo deve-se levar em consideração as características (C) acidez ativa (ou pH) e a trocável, a saturação por alumínio e por bases, a acidez potencial e o teor de matéria orgânica, que estão relacionadas entre si. Relacionada também com a acidez do solo está a disponibilidade dos nutrientes cálcio e magnésio e de micronutrientes como ferro e zinco.

Por outro lado, a eficiência de extração do fósforo disponível pelo método Mehlich-1 sofre grande influência da capacidade tampão de fosfatos do solo. Por isso, na interpretação da disponibilidade de fósforo são usadas características que estão relacionadas com a capacidade tampão, como o teor de argila ou o valor do fósforo remanescente. Mas como a capacidade tampão para o potássio não afeta a eficiência de extração pelo método Mehlich-1, também de pouco significado na maioria dos solos do campus, adotou-se apenas uma classificação para este nutriente.

Em fins analíticos e estudos dos casos de ocorrência de possíveis argilominerais ou não, expõem-se as concentrações dos micro e macronutrientes presentes nas amostras do solo podem ser verificadas na Tabela 2, enfatizando as frações obtidas pelo espectrofotômetro e absorção atômica e pelo espectrofotômetro ótico visível.

Tabela 2 - Parâmetro pH do solo.

Amostras	(Mg/dm ³)					
	Ca	Mg	K	P*	Fe	Zn
i	1,73	0,06	0,20	0,014	0,69	0,24
ii	4,44	0,01	0,18	0,019	0,65	0,27
iii	4,42	0,01	0,14	0,010	0,12	0,22
iv	4,30	0,02	0,07	0,009	0,10	0,19

Fonte: Autores, (2019).

Conforme a Tabela 2 pode-se observar que a análise de fósforo revelou concentrações muito baixas desse elemento, o qual a concentração média de fósforo nos solos brasileiros é 1 mg/dm³, consoante classificação disposta pela EMBRAPA [2] A eficiência de extração do fósforo disponível pelo método Mehlich-1 sofre grande influência da capacidade tampão de fosfatos do solo, inferindo na interpretação da disponibilidade de fósforo por meio das características que estão relacionadas com a capacidade tampão, como o teor de argila e a umidade ótima.

Embora os cátions micronutrientes ocorram principalmente na forma divalente no solo, diferenças no caráter iônico de suas ligações químicas são suficientes para que somente o Fe²⁺ e o Zn²⁺ possam substituir extensivamente um por outro, pelo ferro ser o elemento mais abundante ante os micronutrientes tanto no solo natural quanto aos adicionados com CC. Por sua vez o zinco apresentou-se singularmente em termos de concentração nas quatro amostras, pois é um dos metais pesados mais móveis no solo. Portanto, os solos estudados apresentam propriedades (Ca, Mg, K) e acidez excessiva.

Os valores da CTC efetiva (média) refletem que estes solos, sob condições naturais ácidas, apresentam baixa capacidade de reter cátions, porém com espaços para fixação de outros componentes como hidróxido de cálcio. Em contrapartida, o zinco estimado em suas concentrações bastante regulares com média de 0,23mg/dm³ é fortemente adsorvido pelos colóides provavelmente presentes no solo, o que ajuda a diminuir as perdas por lixiviação e aumentar o efeito residual.

Na análise de fósforo (Tabela 3), foi efetuada uma comparação com amostra de solo argiloso, utilizando as mesmas alíquotas como referência. O gráfico da Figura 5 alega uma reta típica de solos brasileiros intemperizados [27,28] e apresentam óxidos de Fe e Al e argilas do grupo da caulinita como principais constituintes da fração argila — minerais caracterizados pela presença de cargas de superfície variáveis segundo a reação do solo. Nas condições de reação ácida a moderadamente ácida, os óxidos de ferro e alumínio apresentam-se preferencialmente com cargas positivas, sendo assim capazes de reter em sua superfície vários tipos de ânions com predomínio de íons fosfatos. Esse fenômeno é conhecido como adsorção específica. Este tipo de adsorção é de baixa reversibilidade e constitui-se como principal responsável pela fixação de fósforo no solo. Isto justifica uma boa aglomeração e floculação dos componentes do solo com a cal de carbureto.

Tabela 3 – Parâmetros da análise do fósforo.

X	Y	Y*
abs	µg/ml	µg/ml
0	0.0	0
0,014	0.1	0,001
0,093	0.3	0.30011
0,183	0.6	0.59054
0,276	0.9	0.89065
0,362	1.2	1.1682

Fonte: Autores, (2019).

Y* = Calculado

Obs.: Absorção Atômica em Nanômetros

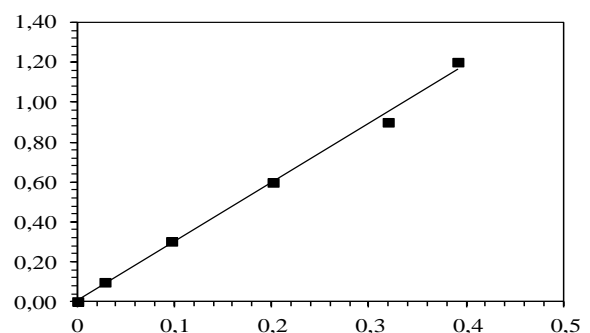


Figura 5 - Análise do Fósforo.

Fonte: Autores, (2019).

Inerente aos ensaios de caracterização física preparou-se amostras do solo, consoante a norma ABNT NBR 6457/1986, nas condições i, ii e iv. Submeteram-se tais amostras aos ensaios de granulometria, limites de consistência e compactação. No tocante a granulometria (Figura 6), o solo em estudo apresentou granulometria argilo-arenosa (amostras i), do qual se averiguou efeitos dos fenômenos de floculação relativos à associação do solo com cal de carbureto, cuja fração argila na presença do hidróxido de cálcio se agregou predominando grãos do tamanho areia porquanto as respectivas texturas: areno-argiloso — amostras ii e areno-siltoso — amostras iv. Do mesmo modo, o percentual de argila no solo natural (59,29%) denota a atividade de aglomeração perante os resultados da granulometria executada sem defloculante no procedimento de sedimentação (0,74%).

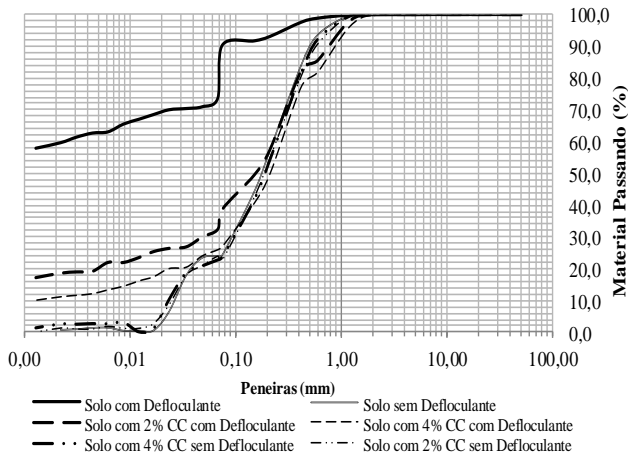


Figura 6 – Granulometria das amostras.

Fonte: Autores, (2019).

Assim como no ensaio de granulometria, o índice de plasticidade (IP) alterou pela inclusão no solo de CC, como demonstrado na Figura 7, ao solo igualmente devido a floculação das partículas de argila causada pela adsorção de íons Ca^{++} por meio do processo de permuta catiônica, do qual há um percentual de fixação de CC que remete a uma capacidade de adsorção máxima do Ca^{++} pelo solo, portanto, a partir deste ponto o IP muda minimamente [15].

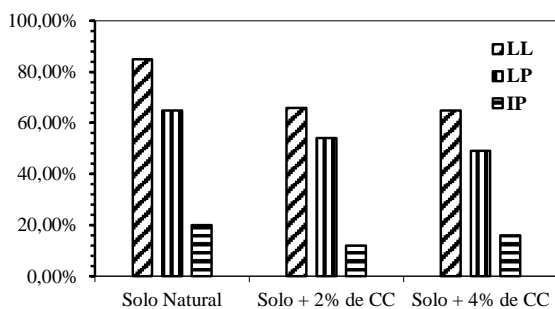


Figura 7 – Granulometria das amostras.

Fonte: Autores, (2019).

No ensaio de compactação realizado nas condições i, ii e iv, buscou-se verificar a influência da adição da CC nos parâmetros de compactação. A Figura 8 exhibe o resultado do ensaio, verificando-se ausência de significativa mudança no teor de umidade ótima. Do contrário, a massa específica aparente seca seguiu com um ligeiro acréscimo em seu valor. Tal comportamento difere do ilustrado em Suksun Horpibulsuk onde a massa específica aparente seca máxima diminui com o teor de CC devido a sua massa específica ser baixa e ao aumento da umidade ótima do compósito [15]. No

entanto, por se tratar de um resíduo industrial a CC pode ter composição química diferenciada a cada unidade produtiva, visto que a massa específica da CC utilizada atingiu valor semelhante ao do solo em questão (2,29 g/cm³ para o hidróxido de cálcio e 2,40g/cm³ para o solo argilo-arenoso).

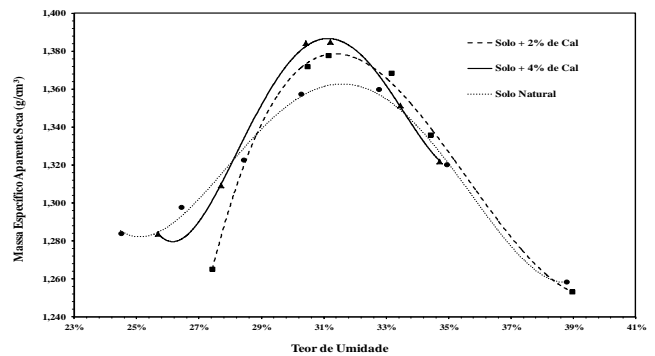


Figura 8 – Curvas da compactação.

Fonte: Autores, (2019).

Compressão Simples (Figura 9) denotou a estabilização do solo por meio da adição da cal de carbureto devido ao aumento da resistência do material tanto com o acréscimo do teor de CC como no envelhecimento em estufa, salientado pelo acréscimo em 95,37% da RCS do solo-4%CC envelhecido comparativamente ao solo natural envelhecido.

Relativo ao período de envelhecimento observa-se o acréscimo da resistência das misturas solo-cal de carbureto, cuja literatura conclui um crescimento de ajuste exponencial da RCS pela temperatura de cura, devido a aceleração das reações pozolânicas que formam os produtos cimentantes, os quais preenchem os vazios e cimentam os grãos, conferindo maior resistência ao material [27]. No tocante ao percentual de Cal de Carbureto, a resistência se eleva com o seu teor, no entanto existe um teor ótimo de CC e aumentar a quantidade de CC além deste não é benéfico comparativamente ao tempo de cura [16], como também a RCS de solo com CC aumenta ligeiramente em períodos iniciais se tornando estável posteriormente, razão atribuída ao tempo necessário para as reações químicas entre agente aglutinante e solo [17]. Destacando que, sob temperaturas elevadas a atividade pozolânicas é intensa, tendo como consequência a maior resistência das amostras, donde a literatura afirma que a temperatura de cura tem forte influencia sobre o desenvolvimento das reações pozolânicas quando comparadas a amostras não curadas [27]. Do contrário, o solo natural tem sua resistência a compressão simples reduzida quando submetido ao envelhecimento acelerado, e nas duas condições (sem e com envelhecimento) possui valores de RCS inferiores aos solos com CC.

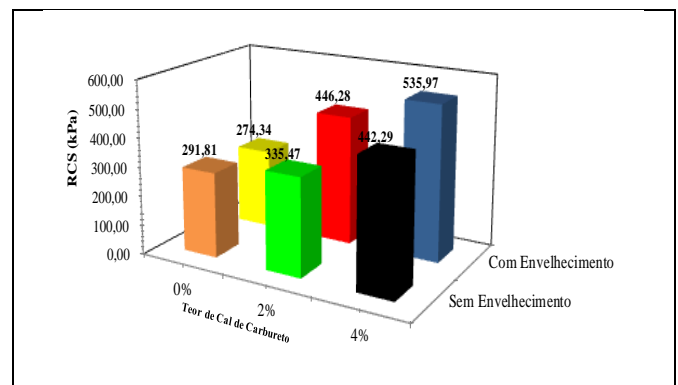


Figura 9 – Resistência a compressão simples.

Fonte: Autores, (2019).

Os dados obtidos pelo ensaio de Módulo de Resiliência — sequências cíclicas de tensões desvio, tensões confinantes e MR, foram interpretados no software LabFit a luz Modelo Composto, portanto determinando as constantes experimentais k_1 , k_2 e k_3 descritas na Tabela IV. De posse das equações deste modelo para cada condição solo-CC em análise, plotou-se as superfícies representativas do modelo com auxílio do software OriginPro 8.0, donde é possível correlacionar o comportamento resiliente das amostras entre si (Figura 10). De frente, assume-se bom desempenho para a condição solo + 4% CC sem envelhecimento, visto que seus valores de módulo de resiliência diante das tensões assume sobreposição às demais circunstâncias. Todavia, os corpos de prova envelhecidos apresentam maiores intervalos de MR perante um curto entremeio de tensão. Entretanto, de forma a analisar tais seguimentos particularizou-se os estados naturais e envelhecidos conforme Figura 11.

Tabela 4. Constantes experimentais.

Teor de Cal de Carbureto	Condição	Constantes		
		k_1	k_2	k_3
0%	Sem Envelhecimento	125.3	0.3265	-0.2235
	Com Envelhecimento	343.5	0.4013	-0.05590
2%	Sem Envelhecimento	139.2	0.1824	-0.05312
	Com Envelhecimento	357.1	0.4318	0.003969
4%	Sem Envelhecimento	147.1	0.2558	-0.1278
	Com Envelhecimento	188.1	0.2143	0.02339

Fonte: Autores, (2019).

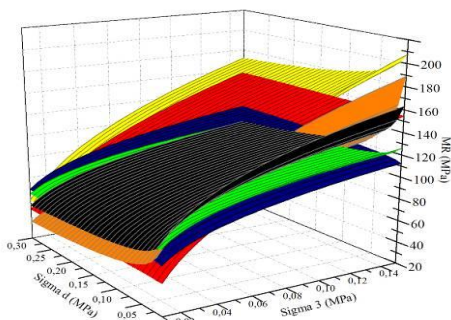


Figura 10 a. Módulo de resiliência x Tensão Confinante x Tensão Desvio.

Fonte: Autores, (2019).

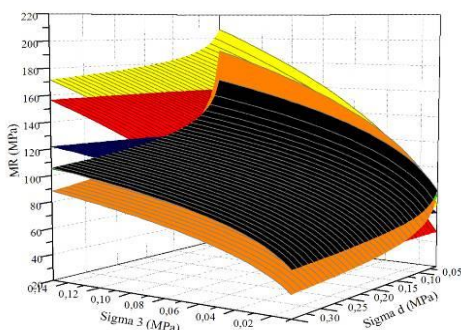
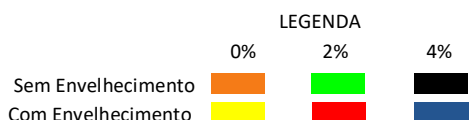


Figura 10 b. Módulo de resiliência x Tensão confinante x Tensão desvio.

Fonte: Autores, (2019).



Pela Figura 11.a, percebe-se os efeitos da estabilização do solo na presença da cal de carbureto quando comparada ao solo natural, com o aumento do módulo de resiliência por elevar a tensão confinante, ou seja, nas amostras submetidas ao ensaio após compactação dos corpos de prova (condição sem envelhecimento) visualiza-se a melhora do comportamento quanto à tensão confinante face ao acréscimo do partícipe de cal de carbureto. Oponente, a tensão desvio nos tempos iniciais infere a um regime regressivo do MR e no seu acréscimo estabiliza o MR do corpo de prova recém-compactado.

Não obstante, de acordo com a Figura 11.b, o envelhecimento em estufa desfavoreceu as amostras com CC, concluindo que no teor de 4% o módulo de resiliência tende a diminuir expressivamente pela adição de tensão confinante, no entanto faz-se necessário a análise de maiores percentuais do estabilizante a fim de confirmar a redução das propriedades mecânicas. Por outras palavras, observa-se que as superfícies gráficas de solos envelhecidos se interceptam com o aumento da tensão confinante e apresentam menores valores de MR consoante a elevação do teor do resíduo adicionado, no entanto em pequenos valores da tensão desvio o compósito apresenta constância do MR, opostamente as amostras recém-compactadas. Referente à aplicação da tensão confinante, nota-se o aumento do módulo de resiliência proporcionalmente a esta.

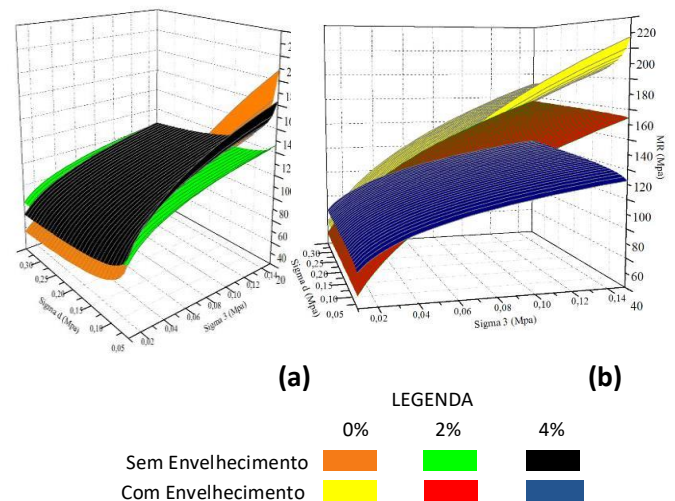


Figura 11. Módulo de Resiliência - Amostras Não Envelhecida x Envelhecida.

Fonte: Autores, (2019).

IV. CONCLUSÃO

Como o solo é formado por diferentes componentes, a quantidade total de qualquer micronutriente presente poderá estar disperso e distribuído entre esses componentes e ligados a eles por meio de ligações fracas até aquelas com alta energia. O pH afetou parcialmente os nutrientes do solo, onde o aumento do pH diminuiu a presença dos micronutrientes na solução do solo e nos pontos de troca catiônica. Contudo, por meio das análises químicas pode-se concluir a efetiva estabilização do solo com a adição de CC, pela capacidade de floculação por meio dos micro e macronutrientes presentes.

Atinente aos índices físicos, esta floculação propiciada pela cal de carbureto às partículas de argila, altera a granulometria do solo resultando na diminuição do índice de plasticidade do material, isto é, há ocorrência de permuta catiônica dos íons de Ca^{2+} entre a argila e o hidróxido de sódio.

Quanto ao ensaio de compactação, pode-se concluir que a CC agiu como material de enchimento que contribuiu para um aumento da massa específica aparente seca devido ao preenchimento dos vazios resultando, por conseguinte, em um material mais denso.

O comportamento mecânico do solo argiloso com a cal de carbureto implicou no melhoramento da resistência a compressão simples, sobretudo a condição envelhecida, e da resiliência, mormente ao estado não envelhecido suscitado pelas reações cimentantes proporcionadas na adição da CC ao solo. Por outro lado, este envelhecimento em estufa a 110°C desfavoreceu o desempenho resiliente das amostras, porém não menos aos compósitos com cal de carbureto, como também ao estado de pequenos valores de tensão desvio. Contudo, salienta-se que os compósitos com cal de carbureto apresentaram aumento da resistência as tensões estáticas e a constância do comportamento das amostras a respeito das deformações.

V. REFERÊNCIAS

- [1] Eiras, J. F.; Becker, C. R.; Souza, E. M.; Gonzaga, F. G.; Silva, J. G. F.; Daniel, L. n M. F.; Matsuda, N. S.; Feijó, F. J. Bacia do Solimões. In: FEIJÓ, F.J. (Ed.). Estratigrafia das Bacias Sedimentares do Brasil. Boletim de Geociências Petrobrás, v. 8, n. 1, p.17-45, 1994.
- [2] EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, 1999. 412p. il. (EMBRAPA/CNPS-RJ. Documentos, 5).
- [3] Pereira, R. S., Viabilidade Técnica do Emprego de Resíduos da Indústria de Celulose para Construção de Estradas Florestais, Tese Doutorado, Universidade Federal de Viçosa (2005) 100.
- [4] Mehlich, A. Determination of cation and anion exchange properties of soils. Soil Science, 66: 429-445, 1948.
- [5] Webb, D.J. T. 1992. Lime stabilized soil blocks for third world housing p.246 -257. In N. Hill, S. Holmes & D. Mather. Lime and other alternative cements. Intermediate technology Publications. 390 p.
- [6] Frota, C. A; Evangelista, A. A. Estudo do Comportamento Geotécnico de Solos Tratados com Cal Hidratada de Carbureto. In: XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2002, São Paulo. XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2002.
- [7] Frota, C. A; Evangelista, A. A. Estudo do Comportamento Geotécnico de Solos de Manaus Tratados com Cal Hidratada de Carbureto.. In: XI Reunião de Pavimentação Urbana, 2002, Porto Alegre - RS. XI Reunião de Pavimentação Urbana, 2002.
- [8] Frota, C. A; Evangelista, A. A. Estudo do Comportamento Geotécnico de Solos Tratados com Cal Hidratada de Carbureto.. In: XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2002, São Paulo. XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2002.
- [9] Sant´Anna, W. C; Oliveira, B. C; Valença, P. M. A; Souza, R. J. Q; Rebelo, E. P; Frota, C. A. Misturas Solo-Emulsão para as Regiões Norte e Nordeste do Brasil.. In: 5º Congresso de Infraestrutura de Transportes., 2011, São Paulo. 5º Congresso de Infraestrutura de Transportes., 2011.
- [10] Souza, R. J. Q; Melo, D. M; Silva, C. L; Frota, C. A. Mistura Solo-emulsão para o Município de Manaus - AM. In: 3o. Congresso de Infra-Estrutura de Transportes, 2009, São Paulo. Anais do 3o. Congresso de Infra-Estrutura de Transportes. São Paulo: ANDIT, 2009.
- [11] Sant´Anna, W. C. Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de vias de baixo volume de tráfego para o Estado do Maranhão. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo: USP, 2009.
- [12] Rebelo, Eude de Paula. Misturas Solo-Emulsão para a Região de Urucu-AM. 2009. Dissertação (Mestrado em Programa de Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas. Manaus: UFAM, 2009.
- [13] Ficha de informações de segurança de Produtos Químicos FISPQ n° P – 4786. Jun/2006. Disponível em: www.whitemartins.com.br.
- [14] Ngowi, A. B., Improving the traditional earth construction: a case study of Botswana, Construction and Building Materials, (1997): 1-7.
- [15] H. Houlen, H. Guillaud. Earth construction: a comprehensive guide. Intermediate Technology Publications, London (1994) 326 p.
- [16] Suksun Horpibulsuk, Chayakit Phetchuay, Avirut Chinkulkijniwat, [Journal of Materials in Civil Engineering](#) Soil Stabilization by calcium carbide, ASCE, (2011) 10-11.
- [17] Y. Xizhong, L. Shudong, C.Wei, [Mechanic Automation and Control Engineering \(MACE\), 2010 International Conference on, Silt Subgrade Modification and Stabilization with Ground Granulated Blast Furnace Slag and Carbide Lime in Areas with a Recurring High Groundwater](#), IEEE Xplore, Wuhan (2010) 2065.
- [18] Frota, C. A; Santos, M. G. R; Nunes, F. R. G; Cantanhede, B. P. Estudo de Alternativas para a Estabilização do Solo Argiloso Superficial de Manaus. In: V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 2003, Porto Alegre - RS. V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 2003.
- [19] Frota, C. A; Evangelista, A. A. Estudo do Comportamento Geotécnico de Solos de Manaus Tratados com Cal Hidratada de Carbureto. In: XI Reunião de Pavimentação Urbana, 2002, Porto Alegre - RS. XI Reunião de Pavimentação Urbana, 2002.
- [20] Lovato, Rodrigo Silveira. Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com a cal, aplicado a pavimentação. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre: UFRGS, 2004.
- [21] Frota, C. A. ; Melo, D. M. ; Silva, C. L. ; Dantona, D. M. ; Nunes, F. R. G. ; Santos, M. G. R. . Uso da Cal de Carbureto como Substituto do Cimento Protland em Misturas Tipo AAUQ para o Município de Manaus. In: Congresso de Infra-Estrutura de Transportes, 2007, São Paulo. Congresso de Infra-Estrutura de Transportes, 2007.
- [22] Frota, C. A.; Alencar, C. L. S.; Nunes, F. R. G.; Passos, L. A. Caracterização de Misturas Asfálticas do Tipo AAUQ, para a

Região de Urucu, utilizando cal de carbureto.. In: 35ª Reunião Anual de Pavimentação, 2004, Rio de Janeiro. 35ª Reunião Anual de Pavimentação, 2004.

[23] Frota, C. A. ; [Nunes, F. R. G.](#) . Estudo da Cal de Carbureto como Filler em Misturas Asfálticas. In: 12ª Reunião de Pavimentação Urbana, 2003, Aracaju. 12ª Reunião de Pavimentação Urbana, 2003.

[24]. Nobrega, M.T. Características e Mecanismo de Estabilização de solos tropicais com cal e cimento em pista Experimental. 1995.233f. Tese (doutorado em Geociências) – Programa de Pós-graduação em Geoquímica e Geotectônica. Universidade de São Paulo, São Paulo.

[25] Frota, C. A. ; Evangelista, A. A. . Estudo do Comportamento Geotécnico de Solos de Manaus Tratados com Cal Hidratada de Carbureto.. In: XI Reunião de Pavimentação Urbana, 2002, Porto Alegre - RS. XI Reunião de Pavimentação Urbana, 2002.

[26] Y. J. Du, Y. Y. Zhang, and S. Y. LIU, Advances in Geotechnical Engineering Proceedings of the Geo-Frontiers 2011 Conference, Investigation of Strength and California Bearing Ratio Properties of Natural Soils Treated by Calcium Carbide Residue, ASCE (2011) 1240.

[27] Nunez, W.P. Estabilização físico-química de um solo de Arenito de Botucatu, visando seu emprego na pavimentação, 1991. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

[28] Thomé, A., Comportamento de fundações superficiais apoiada em aterros estabilizados com resíduos industriais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (1999) 76.

[29]. J. E. P. Guimarães. Estabilização de solo com cal: princípios básicos. Associação Brasileira dos produtores de cal, São Paulo. 102 p.

[30] Paiva Neto, J.E. De; Catani, R.A.; Queiroz, M.S. & Küpper, A. Contribuição ao estudo dos métodos analíticos e da extração para caracterização dos solos do Estado de São Paulo. In: Reunião Brasileira de Ciência do Solo, 1., Rio de Janeiro, 1950. Anais p. 79-108.