



Investigação da Viabilidade Técnica do Aproveitamento dos Rejeitos das Indústrias de Cal do Município de Forquilha-CE, Com Foco na Reparação de Dano Ambiental

Antônia de Castro Côrtes PESSOA¹, Francisco Pessoa MACHADO²,
Cláudio Ângelo da SILVA NETO³, José Antonio Beltrão SABADIA⁴

Resumo: As investigações objeto deste trabalho foram direcionadas visando o aproveitamento dos rejeitos oriundos das indústrias de cal hidratada do município de Forquilha, no estado do Ceará. Esses resíduos, com o avanço da produção, formam acúmulos ao redor dos fornos de calcinação do calcário. Estes fornos são do tipo rudimentar, denominados de caieira. Os acúmulos de rejeitos constituem-se em fonte de degradação do meio ambiente. Com as rajadas de vento as partículas mais finas formam nuvem de poeira, afetando a qualidade do ar e a vegetação do entorno das unidades produtivas; no período chuvoso, as enxurradas lixiviam as partículas, que vão poluir e assorear os mananciais hídricos. No intuito de promover a retirada desses entulhos e a consequente mitigação de dano ambiental, foram realizados ensaios geotécnicos de laboratório em oito amostras de aproximadamente 18 kg, sendo uma do solo argiloso (0% de rejeito) e sete compostas com este mesmo solo, com mistura do rejeito, nas dosagens, em volume, de 20%, 30, 40, 50, 60, 70 e 80%. Esses ensaios determinaram, dentre outros parâmetros, a granulometria de cada amostra, bem como os seus índices de Suporte Califórnia (CBR), de plasticidade (IP) e de grupo (IG). O resultado dos ensaios revelou que o efeito na estabilização do solo proporcionada pela incorporação do rejeito às amostras foi expressivo. Assim, por exemplo, a amostra nº 1, formada apenas do solo argiloso, apresentou um CBR de 4%, enquanto a de nº 3, com 30% do resíduo, este índice passou para 24%. Ou seja, um solo argiloso com características físicas de baixa consistência adquiriu significativa estabilização, bastando-se adicionar 30% do rejeito na composição do material terroso; enquanto o IP caiu de 19% para 12% e a expansão foi de 4,09% para 1,57%. Isto significa já ser este um material terroso de qualidade satisfatória para construção de rodovia.

Palavras-Chave: forno, solo, caieira, cal.

¹ Programa de Pós-Graduação em Geologia - Universidade Federal do Ceará - UFC

² Companhia de Desenvolvimento do Ceará

³ Graduação em Geologia - Universidade Federal do Ceará - UFC

⁴ Departamento de Geologia - Universidade Federal do Ceará - UFC

Autor para correspondência: Antonia de Castro Côrtes Pessoa

Universidade Federal do Ceará. Av. Humberto Monte, S/N. Campus do Pici – Bloco 912. CEP 60455-760. Fortaleza, CE, Brasil. E-mail: antoniaccpessoa@gmail.com

Recebido em 03 de Julho de 2017 / Aceito em 12 de Dezembro de 2017.

Abstract: *The investigations from this paper were directed towards the use of the wastes from the hydrated lime industries of the municipality of Forquilha, in the state of Ceará. These residues, with the advance of the production, form accumulations around the kilns of calcination of the limestone. These furnaces are of a rudimentary type, called "caieira". The accumulations of tailings constitute a source of degradation of the environment. With the wind gusts the finer particles form a cloud of dust, affecting the quality of the air and the vegetation around of the productive units; in the rainy season, the floods leach the particles, which will pollute and sediment the water sources. In order to promote the removal of these residues and the consequent mitigation of environmental damage, laboratory geotechnical tests were performed in eight samples of approximately 18 kg, one of the clay soil (0% of tailings) and seven mixtures, at 20%, 30, 40, 50, 60, 70 and 80% volume dosages of residues. These tests determined, among other parameters, the granulometry of each sample, as well as its California Support (CBR), plasticity (IP) and group (IG) indices. The results of the tests revealed that the effect on soil stabilization provided by the incorporation of the waste into the samples was significant. Thus, for example, the sample 1, formed only from clay soil, presented a CBR of 4%, while that of no. 3, with 30% of the residue, this index increased to 24%. That is, a clayey soil with low consistency physical characteristics acquired a significant stabilization by adding 30% of the reject in the composition of the earthy material; while the IP reduced from 19% to 12% and the expansion went from 4.09% to 1.57%. This already means that this earthy material has a satisfactory quality for highway construction.*

Keywords: *furnaces, soil, caieira, lime.*

1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento racional e tecnicamente sustentável dos resíduos sólidos vem sendo motivo de preocupação, principalmente nos segmentos sociais que cuidam da preservação ambiental. Esta preocupação tem sido tema de pesquisas cada vez mais recorrentes nos meios acadêmicos. Os estudos objeto deste trabalho foram direcionados no sentido de aprofundar as investigações, buscando-se identificar uma alternativa para o aproveitamento dos rejeitos oriundos das indústrias de cal hidratada do município de Forquilha, no estado do Ceará. Espera-se que os resultados encontrados neste trabalho venham servir de parâmetro capaz de nortear e estimular a eliminação dos entulhos desses rejeitos, que ocorrem também em outras regiões produtoras de cal. Com efeito, esta preocupação se justifica pelos crescentes acúmulos

desses materiais que, ao longo do tempo, vêm formando amontoados ao redor dos fornos de calcinação de calcário. Vale salientar que estes fornos são do tipo rudimentar, denominados caieira, construídos pelos próprios produtores de cal.

Ressalta-se que os amontoados desses resíduos ficam expostos ao ar livre, se constituindo em fonte de emissão de poluentes e, conseqüentemente, de degradação do meio ambiente. Com as rajadas de vento as partículas mais finas formam poeira suspensa, indo afetar a qualidade do ar, atingindo também a folhagem da vegetação do entorno dessas indústrias, podendo comprometer a respiração das plantas. Ademais, com a chegada do período chuvoso, as enxurradas lixiviam partículas desses amontoados, que vão poluir e assorear os mananciais hídricos, agravado ainda

pela decantação da poeira do ar, que se mantém em suspensão. O aproveitamento dos rejeitos acarretaria na eliminação desses entulhos e, conseqüentemente, na limpeza do ambiente, beneficiando não só a natureza, mas também o bom andamento dos trabalhos de produção de cal.

Visando promover a retirada desses entulhos, foram coletadas amostras do rejeito e de um solo argiloso, para constituição de amostras compostas de solo-rejeito. Estes materiais foram misturados e homogeneizados, e utilizados, por vezes, de modo a comporem oito amostras de cerca de 18 kg cada, sendo uma de solo (0% de rejeito) e sete com dosagens de rejeito (em volume) de 20%, 30, 40, 50, 60, 70 e 80%. Após preparadas, estas amostras foram encaminhadas a laboratório para serem submetidas a ensaios geotécnicos, voltados à possibilidade de utilização destes rejeitos, principalmente para construção de rodovias, ou mesmo para aterros e outros tipos de obras desta natureza. Vale destacar que a área selecionada para coleta das amostras de rejeito e a realização desses estudos compreende as localidades de Pocinhos, Ingá e Olho d'Água dos Cassimiros, no referido município de Forquilha.

2. ESTADO DA ARTE

MACHADO (2014) relata que a Região Norte do Ceará é portadora de importantes e variados tipos de jazimentos de rochas carbonáticas, que vão desde os calcários calcíticos aos de natureza magnésiana. Estes jazimentos estão concentrados basicamente nos municípios de Frecheirinha, Coreaú, Sobral, Santa Quitéria, Forquilha, Nova Olinda e Santana do Cariri. Nestes municípios, muitas famílias vivem da extração de calcário e da produção de

cal, predominantemente realizada de forma ainda bastante rudimentar, utilizando-se de fornos do tipo caieira. Ressalta que a exceção são os dois últimos municípios citados, da região do Cariri, onde o calcário é sedimentar de estrutura laminar, o qual está sendo lavrado e beneficiado para produção da Pedra Cariri, utilizada para piso e revestimento, cuja atividade gera centenas de emprego.

Ainda MACHADO (2014), estudando os rejeitos das indústrias de cal dos municípios de Coreaú e Sobral, no estado do Ceará, verificou que uma amostra de solo arenoso, contendo apenas 30% do rejeito de caieira, apresentou um CBR de 52%, enquanto a constituída com o solo argiloso e mesmo teor do resíduo, esse parâmetro foi de 63%. Isto significa que estes índices, mesmo sendo de solos contendo apenas 30% de rejeito, caracterizam esses materiais como sendo muito bons para o seu emprego na construção de pavimento de estrada. Assim, conclui-se que esses resíduos que se acumulam ao redor das caieiras, hoje sem nenhuma utilidade, poderão vir a ser aproveitados com sucesso, do ponto de vista técnico, na pavimentação de estrada.

ARRIVABENI *et al.* (2016) registram que, diante da importância da rede viária brasileira e da necessidade de tráfego de qualidade, faz-se necessária a conservação das estradas, devendo ser alvo imprescindível de atenção constante. Ressaltam que, em se tratando de estradas rurais e florestais, essa atenção deve ser diferenciada, visto que são estas as mais sujeitas à perda de material por intemperismo, pelo tráfego e devido à instabilidade, sendo elas maioria na rede viária de nosso país. Acrescentam que, segundo o SISTEMA NACIONAL DE VIAÇÃO (2016) e a CONFEDERAÇÃO

NACIONAL DO TRANSPORTE (2016), o Brasil apresenta 1.720.643 km de rodovias, porém com apenas 210.618 km pavimentados, correspondendo a 12,2% da malha rodoviária nacional.

Ainda de acordo com ARRIVABENI *et al.* (2016), o uso de intervenções no solo a fim de garantir a estabilidade dos agregados tem papel fundamental na dinâmica rodoviária. De fato, a estabilização de determinado solo implica na adição de fatores estabilizantes junto ao mesmo, no intuito de modificar suas propriedades físicas e químicas e proporcionar melhoria ao material.

Segundo GONDIM (2008), a estabilização mecânica é aquela cujos procedimentos e técnicas mudam o arranjo entre as partículas, ou granulometria, do solo, tais como a compactação, que causa a expulsão do ar contido nos espaços vazios, conferindo ao solo uma nova organização em sua estrutura.

VARGAS (1981) descreve que a estabilização de um solo é um método que concede a este material uma maior resistência às cargas, ao desgaste e à erosão, devido à compactação, à correção de sua granulometria e à redução de sua plasticidade, ou devido à adição de substâncias que lhe atribuem coesão, resultante da cimentação ou aglutinação dos seus grãos.

Segundo SOUZA (2014), a estabilização de solo é um tratamento aplicado a ele para alterar as suas características naturais que são indesejáveis para execução de determinadas obras de engenharia. Acrescenta que a estabilização pode ocorrer por um processo mecânico, químico ou químico – mecânico:

- Mecânico - compactação realizada em camadas, por meio da aplicação de uma

energia de compressão no solo e com controle de umidade, sendo o controle tecnológico efetuado por meio de ensaios

- Químico - acréscimo de um agente químico que produz uma ação cimentante, modificando as propriedades físicas dos grãos do solo, reunidos através do emprego da cal, cimento ou subprodutos de indústria;

- Químico-mecânico - é uma combinação das duas metodologias de estabilização de solos.

SOUZA (2014) acrescenta que, ao se misturar uma determinada quantidade de cal a um solo, iniciam-se imediatamente as reações químicas, que alteram as propriedades geotécnicas do solo, tais como a plasticidade, a granulometria, a quantidade de finos e a capacidade de carga da mistura solo-cal. Sendo estas características dependentes de outros fatores, como o tipo de solo a ser estabilizado, o teor de cal empregado na mistura, o tempo, a temperatura de cura, dentre outros fatores.

Conforme SILVA (2010), no final da década de 40 do século XX iniciou-se nos EUA a aplicação de técnicas laboratoriais de Mecânica dos Solos para a análise das misturas solo-cal, sendo este material amplamente empregado a partir da década de 50, na construção de milhares de quilômetros de autoestradas.

De acordo com CRISTELO (2001), a estabilização de solos com o emprego da cal resulta em melhorias significativas na textura e na estrutura de um solo, minimizando a plasticidade e gerando uma elevação na resistência mecânica, o que não é somente possível como provável.

SILVA (2010) afirma que a estabilização de solos com cal tem-se revelado não só um método eficaz, mas também ecológico e econômico, na medida em que permite o aproveitamento

dos solos existentes no local onde a obra será implementada, ao invés de substituí-los por outros, evitando-se despesas adicionais e impactos ao meio ambiente.

Segundo REZENDE (2003), os tipos de cal mais utilizados em estabilização de solos são: cal cálcica hidratada – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, cal dolomítica monohidratada – $\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgO}$, cal virgem – CaO e cal dolomítica virgem – $\text{CaO} \cdot \text{MgO}$. Estes produtos se diferenciam pela rocha de origem e pelo processo de calcinação, sendo que a cal cálcica hidratada é a mais utilizada para fins rodoviários.

Conforme HERRIN & MITCHEL (1961), quando a cal é misturada ao solo ocorrem variadas reações químicas simultaneamente, sendo que as reações geralmente identificadas são: troca catiônica, floculação, carbonatação e reações de sedimentação. Ressalta que, além disso, a adição de um percentual significativo de cal ao solo provoca aumento da solubilidade da sílica e da alumina, bem como a elevação do pH das misturas.

REZENDE (2003) frisa que, quando a cal é adicionada a um solo, uma troca de cátions ocorre com o cálcio da cal, e a floculação processa-se rapidamente e induz a alterações imediatas na resistência não curada. Assim, a cal adicionada a um solo proporciona uma troca de cátions com o cálcio da cal, substituindo os cátions trocáveis (K, Mg e H) na superfície do argilomineral. Desta forma, os cátions da cal tendem a agruparem-se na superfície do argilomineral, mudando a concentração eletrolítica em torno das partículas, provocando a floculação e a aglomeração das partículas.

Ainda de acordo com REZENDE (2003), reações pozolânicas podem ocorrer entre o solo e a cal, dependendo

das características naturais dos solos, que resultam na formação de vários compostos cimentantes. Esses compostos são desenvolvidos ao longo do tempo e aumentam a resistência e a durabilidade da mistura. Na carbonatação, o dióxido de carbono da atmosfera reage com a cal (cálcica ou dolomítica). No entanto, este carbonato é um composto cimentante muito fraco, não interferindo muito no ganho de resistência. As reações pozolânicas correspondem à reação entre cal, água e sílica. A cal reage com a sílica ou com a alumina do solo, formando um gel. A troca de cátions, floculação e aglomeração são as reações responsáveis pela mudança na plasticidade, contração e trabalhabilidade do solo, enquanto que a reação pozolânicas é responsável pelo aumento da resistência.

De acordo com Caputo (1977), o ensaio para determinação da umidade ótima e do peso específico máximo de um solo é o ensaio de Proctor, proposto em 1933 pelo engenheiro americano que lhe deu o nome. Este ensaio é conhecido como ensaio normal de Proctor (ou AASHTO Standard), padronizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, em seu MB-33. Este ensaio consiste em compactar uma amostra dentro de um recipiente cilíndrico, com aproximadamente 1.000cm^3 , em três camadas sucessivas, sob a ação de 25 golpes de um soquete pesando 2,5kg, caindo de uma altura de 30 cm. O ensaio é repetido para diferentes teores de umidade, determinando-se, para cada um deles, o peso específico aparente. Com os valores obtidos traça-se a curva Peso específico = f (h), de onde se obterá o ponto correspondente à umidade (h) ótima e a densidade máxima.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais utilizados

3.1.1 Solo

O solo utilizado na composição das amostras de solo-rejeito é do tipo argilo-silto-arenoso, de coloração marrom, contendo raros pedregulhos de biotita-gnaïsse e quartzito. (Figura 1).



Figura 1 – Solo argiloso, utilizado na mistura solo-rejeito. Local de coleta da amostra do solo: rodovia BR 020, a 114,9 km de Fortaleza, no município de Caridade – CE. (Dezembro/2016)

O acesso a estas localidades é feito, partindo-se da cidade de Forquilha, no sentido sudeste (rumo a Santa Quitéria), pela rodovia asfaltada CE-362, por um percurso de aproximadamente 15km. Após este percurso, segue-se à direita por uma estrada vicinal de revestimento primário (solo compactado), por mais 3 km até chegar as primeiras unidades mineradoras de calcário e produção de cal. Vale ressaltar que estas indústrias de cal estão situadas nas proximidades das frentes de lavra de calcário. (Figura 2).

Para realização dos ensaios geotécnicos foram coletadas, em variados locais, seis amostras do rejeito, pesando,

3.1.2. Rejeito

Refere-se a um rejeito advindo do processo de calcinação, coletado nas localidades de Pocinhos, Ingá e Olho d'Água dos Cassimiros, situadas a sudeste da sede do município de Forquilha, distantes cerca de 18km, 21km e 23km desta cidade. Nessas localidades estão concentradas as frentes de extração de calcário, caieiras e beneficiamento de cal hidratada.

em média 15 kg cada. Estas amostras foram misturadas e homogeneizadas entre si, formando uma única amostra, de aproximadamente 90 kg. Vale salientar que este resíduo é resultante do processo de produção e peneiramento da cal hidratada. Esta cal é resultante da calcinação do um metacalcário magnesiano, pertencente ao Complexo Ceará, de origem tanto da Unidades Independência, quanto da Unidade Canindé, (Figura 3). Quanto a composição química destes calcários, apresentam, em média, 2,1% de SiO_2 , 31,9% de CaO e 21,2% de MgO .

Mapa do Município de Forquilha (CE)

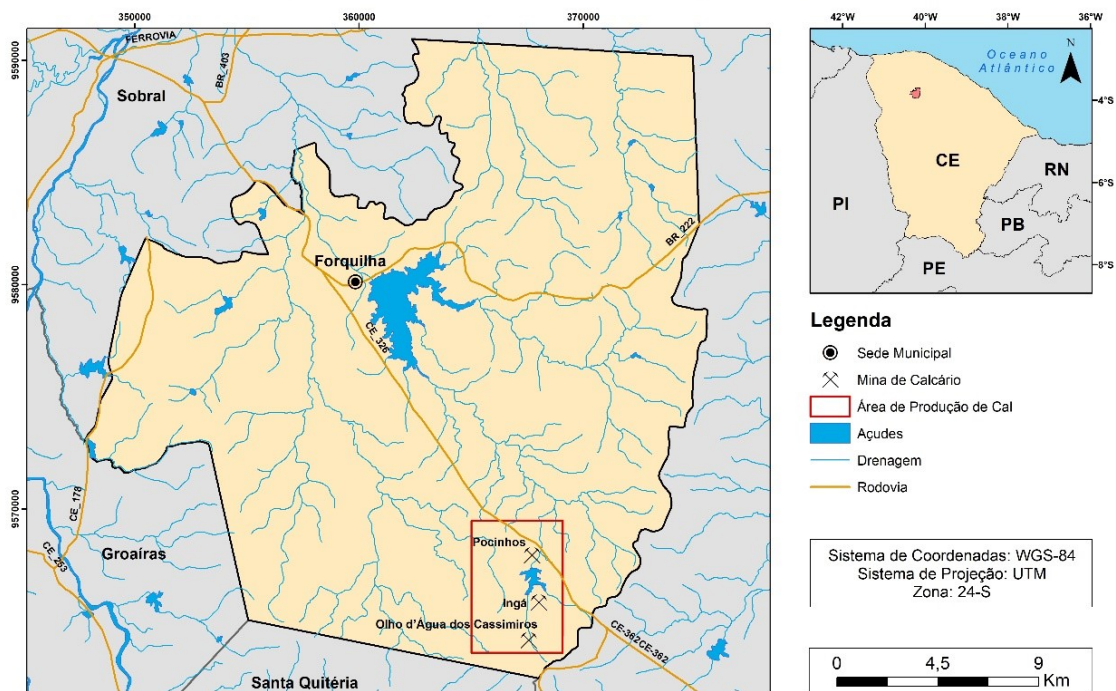


Figura 2 - Mapa de localização da área de coletas das amostras de rejeito.

3.2. Métodos

Para o desenvolvimento das pesquisas foi empregada uma metodologia centrada, inicialmente, na coleta de amostras do rejeito, bem como de um solo argiloso. Posteriormente, tanto as amostras do rejeito, quanto as do solo, foram misturadas e homogeneizadas entre si, constituindo, por vez, uma única amostra de cada material. Em seguida, estes materiais foram misturados um com o outro, formando oito amostras de solo-rejeito, nos percentuais do rejeito de 0 (zero), 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80% pesando aproximadamente 18 kg cada. Após esta preparação, as amostras foram remetidas a laboratório para realização de ensaios geotécnicos. Esta investigação teve como objetivo maior a determinação dos parâmetros geotécnicos destas amostras compostas, quanto à granulometria, e aos seus Índices de Suporte Califórnia (ISC ou CBR), de Plasticidade (IP) e de Grupo (IG). Estes índices são considerados

parâmetros determinantes na caracterização de um material terroso de emprego na construção de pavimento de estradas e de obras similares.

O Índice de suporte Califórnia (ISC ou CBR) mede a resistência de penetração de um corpo de prova feito de solo na umidade ótima, mediante punção na face superior da amostra, de um pistão de aproximadamente 5 cm de diâmetro. Esse pistão é movimentado sob a força de uma prensa mecânica que gira com velocidade de penetração de 1,25 mm/min. Umidade ótima é aquela em que um solo ao ser compactado atinge densidade máxima. Os ensaios foram realizados aplicando-se a energia intermediária, que consiste na compactação de um solo, realizada à medida que o corpo de prova é preparado, em cinco camadas iguais, aplicando-se em cada uma delas 26 golpes de um soquete metálico de 4,5 kg, caindo de uma altura de 45 cm.

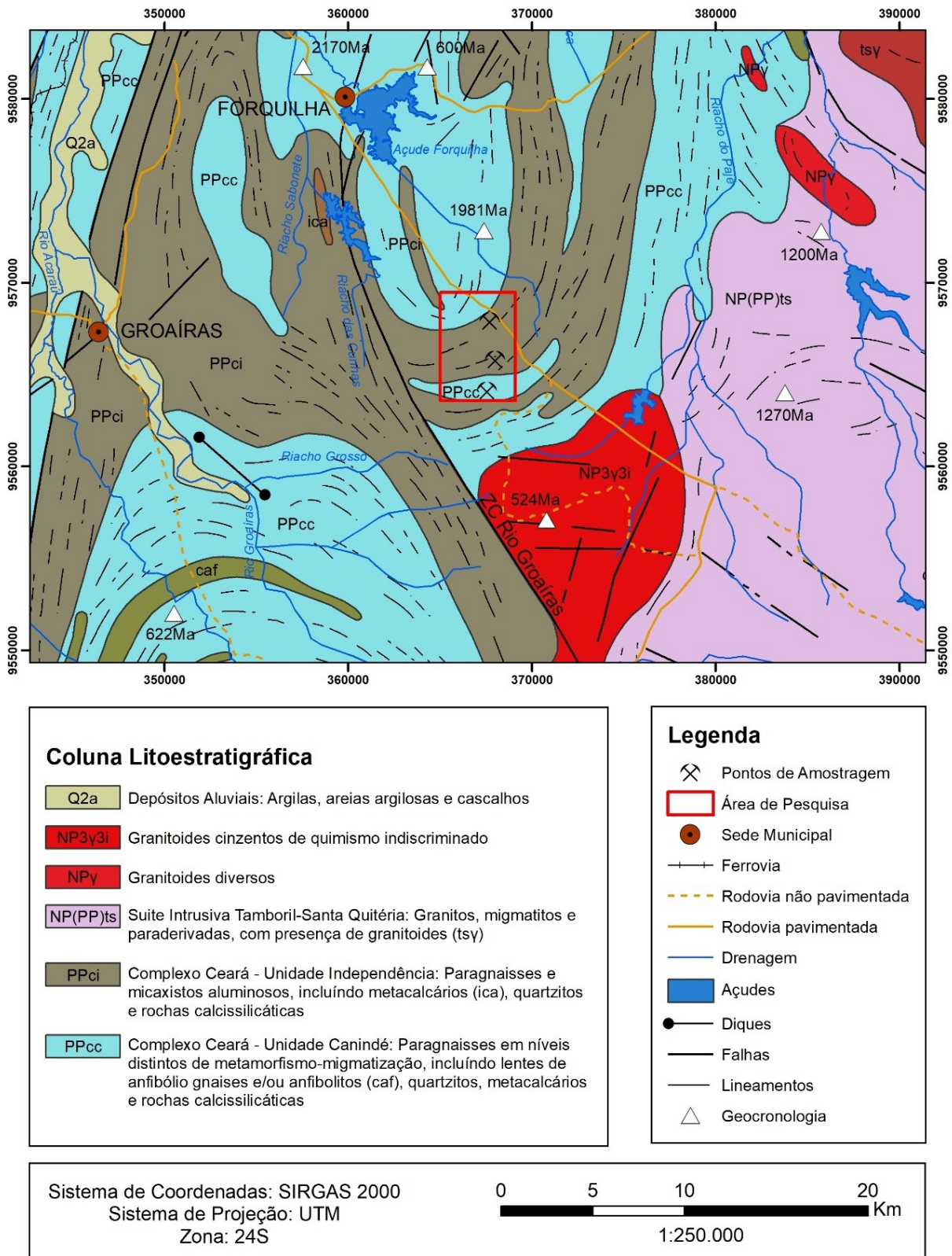


Figura 3 – Mapa geológico da área de pesquisa. Mapa base: Mapa Geológico do Estado do Ceará (BRASIL / CPRM, 2003), escala 1:500.000

O Departamento de Edificações e Rodovias do Governo do Estado do Ceará (DER/CE, 2005) considera aceitável para base de pavimento um solo com CBR a partir de 25%, com a aplicação da energia intermediária, enquanto para Revestimento Primário um solo com este índice a partir de 18% já é considerado de qualidade satisfatória; embora este órgão recomende, para esta finalidade, um valor a partir de 20%. Importante salientar que o Revestimento Primário é definido como “camada de solo estabilizado, sobreposta ao leito de uma estrada, que seja capaz de oferecer uma superfície de rolamento com qualidade superior à do solo existente na via a ser pavimentada”.

O ensaio de índice de suporte Califórnia (ISC ou CBR) – NBR 9895 (ABNT, 1987) define a relação, em percentagem, entre a pressão exercida por um pistão de diâmetro padronizado, necessária à penetração no solo até determinado ponto (0,1” e 0,2”), e a pressão necessária para que o mesmo pistão penetre a quantidade em solo-padrão de brita graduada. Através do ensaio CBR é possível conhecer-se qual será a expansão de um solo sob um pavimento quando este estiver saturado, bem como saber a perda de resistência do solo com a saturação. Apesar de ter um caráter empírico, o ensaio de CBR é mundialmente difundido e serve de base para o dimensionamento de pavimentos flexíveis.

Ensaio de compactação – NBR 7182 (ABNT, 1968). É um método de estabilização de solo, que se dá por aplicação de alguma forma de energia (impacto, vibração, compressão estática ou dinâmica). Seu efeito confere ao solo um aumento de seu peso específico e de sua resistência ao cisalhamento, assim como confere a ele uma diminuição dos índices de vazios, permeabilidade e

compressibilidade. Através do ensaio de compactação é possível obter-se a correlação entre o teor de umidade e o peso específico seco de um solo, quando compactado com determinada energia. O ensaio mais comum é o de Proctor (Normal, Intermediário ou Modificado), que é realizado através de sucessivos impactos de um soquete, padronizado, na amostra.

Expansão é o índice que determina a capacidade de um material de se expandir ao absorver água. O ensaio para medir a expansão de um solo é feito moldando-se um corpo de prova, com umidade ótima. A expansão final é determinada ao término de quatro dias, durante os quais a amostra fica mergulhada dentro de um depósito de água. Esta propriedade geotécnica é dada em porcentagem, em relação à altura inicial do corpo de prova. O DER/CE recomenda uma expansão abaixo de 1% para base de pavimento; abaixo de 2% para sub-base; e o máximo de 3% para subleito.

O índice de plasticidade (IP) é definido pela diferença entre o limite de liquidez – LL (ensaio NBR 6459 - ABNT, 1984) e o limite de plasticidade – LP (ensaio NBR 7180 - ABNT, 1984). $IP = LL - LP$. Caracteriza o solo no estado plástico, sendo máximo para as argilas e mínimo ou nulo para as areias. Ele fornece um critério para avaliar o caráter argiloso de um solo; quanto maior o IP, mais plástico é o solo.

A classificação HRB caracteriza os solos em grupos e subgrupos, cujos critérios são baseados na sua granulometria e plasticidade. Os grupos A-1, A-2 e A-3 caracterizam solos granulares e os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7 correspondem a solos finos. Esta classificação serve de parâmetro para definir se determinado solo se enquadra

ou não dentro das especificações técnicas exigidas para construção de uma obra de terra, conforme previsto no seu projeto de engenharia.

O índice de grupo (IG) é representado por um número inteiro, que varia de 0 a 20. Define a capacidade de suporte do terreno de fundação de um pavimento. Assim, os valores extremos representam solos ótimos, quando $IG = 0$, e péssimos se o $IG = 20$. Este índice é função da porcentagem do material fino que passa na peneira 200 mesh, do limite de liquidez (LL) e do índice de plasticidade do solo (IP). Um solo com IG entre 0 e 4 é classificado como granular.

Para determinação da resistência mecânica das misturas solo-rejeito foi utilizado o ensaio CBR normatizado pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - DNER (1994), que atualmente é o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT. Os ensaios para determinação do CBR (DNER- 049/94) dessas amostras, dosadas de forma bem homogênea, foram realizados aplicando-se a energia de compactação do Proctor intermediário, que é o método mais recomendável, tecnicamente, para caracterização de um solo destinado a pavimentação de estrada.

O ensaio do Proctor intermediário é efetuado através da compactação de um solo. Conforme Caputo (1977), para realização deste ensaio são utilizadas amostras deformadas, não reusadas, do material passado na peneira $\frac{3}{4}$ " (19 mm). É feito utilizando-se corpos de prova moldados em cilindros metálicos com capacidade de 1.000 cm^3 de volume. A compactação do solo é processada à medida que o corpo de prova é preparado, em cinco camadas aproximadamente iguais, aplicando-se em cada uma dessas camadas 26 golpes

de um soquete metálico de 4,5 kg, caindo de uma altura de 45 cm. Para determinação do CBR e da expansão das amostras ensaiadas, foram realizados testes geotécnicos em cinco corpos de prova, que é o mínimo recomendável, com o material apresentando teores crescentes de umidade, para a composição de cada um deles.

Vale salientar que, pensando-se na viabilização econômica do aproveitamento dos rejeitos de caieira na pavimentação de estrada, o recomendável seria o emprego desses resíduos, misturados ao solo local, nas vias localizadas a pouca distância da fonte de sua produção, visando reduzir custos com transporte. Em se tratando de estradas de pouco movimento de veículos, a sua pavimentação poderia ser feita com revestimento do tipo primário, popularmente conhecido como "empiçarramento", que é relativamente de baixo custo operacional. Para construção de um pavimento desta natureza, o material terroso mais adequado é aquele que dispõe da propriedade de agregar suas partículas constituintes, o que proporciona à estrada uma boa superfície de rolamento. No entanto, o solo não pode ser muito fino e/ou nem muito argiloso, para construção de um pavimento, por apresentar normalmente baixa consistência e alta expansão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios geotécnicos das 7 amostras de solo-rejeito, bem como a de solo argiloso (sem o rejeito), no que se refere aos índices físicos, estão apresentados na Tabela 1. Vale ressaltar que esses ensaios foram executados no laboratório de solos do Departamento de Edificações e Rodovias do Governo do Estado do Ceará- DER/CE.

Tabela 1: Caracterização geotécnica básica das amostras de solo argiloso e das de solo-rejeito.

Amostra	Rejeito (%)	Solo (%)	CBR (%)	Expansão (%)	IP	Classificação HRB	IG
AM1	0	100	4	4,09	19	A-2-6	2
AM2	20	80	28	2,35	14	A-2-6	1
AM3	30	70	24	1,57	12	A-2-6	0
AM4	40	60	26	1,48	10	A-2-6	0
AM5	50	50	30	0,83	09	A-2-4	0
AM6	60	40	45	0,70	08	A-2-4	0
AM7	70	30	53	0,61	09	A-2-4	0
AM8	80	20	48	1,39	08	A-2-4	0

Os ensaios realizados nestas oito amostras revelaram, dentre outros dados que, enquanto a amostra nº 1, constituída somente de solo, apresentou um CBR de 4%, a amostra nº 2 composta com adição de apenas 20% do resíduo, apresentou um CBR de 28%. Vale salientar, também, que este valor já é considerado acima do mínimo aceitável para construção de base de pavimento de estrada, que é de 25%, aplicando-se a energia intermediária, conforme especificações (DER/CE, 2005).

Fazendo-se uma análise comparativa do efeito estabilizante do

rejeito, retratado no gráfico da figura 4, verifica-se que, em termos de consistência, os valores de CBR das misturas solo-rejeito foram crescentes, à medida que se foi aumentando o percentual do resíduo. Para se ter uma noção clara desse efeito, a amostra nº 1, constituída somente por solo argiloso, apresentou CBR de 4%, enquanto a amostra nº 2, formada pela mistura de solo argiloso com 20% do rejeito, o CBR subiu para 28%; já a amostra nº 5, com 50% do resíduo, o índice passou para 30%, e as demais amostras apresentaram valores de 45% para cima.

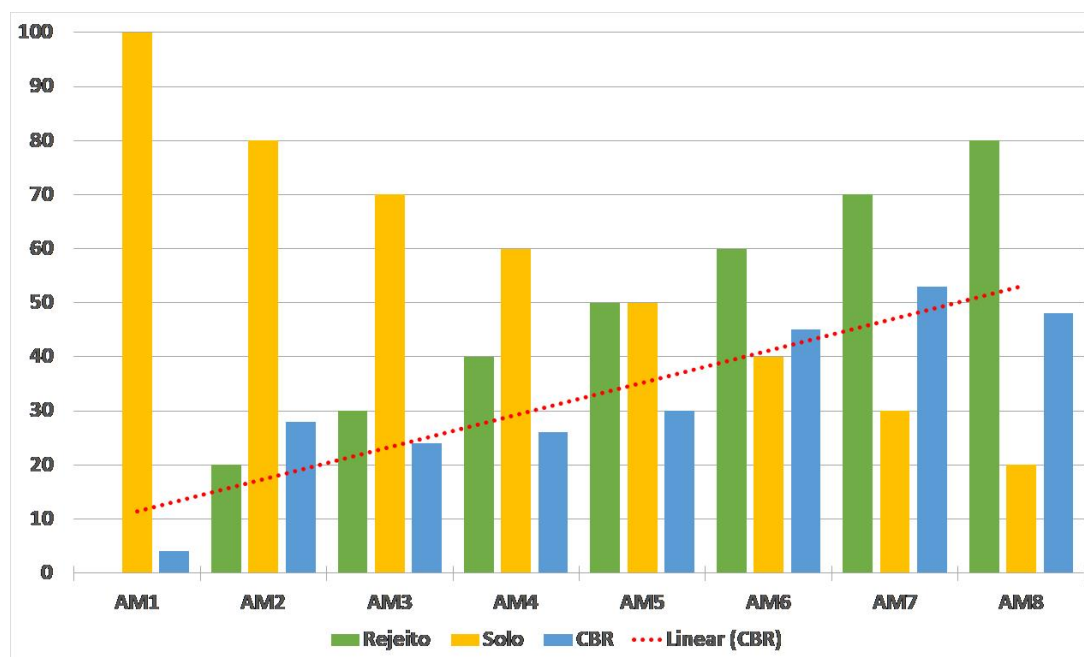


Figura 4 - Efeito do rejeito na estabilização do solo argiloso, refletida pelo CBR.

Não obstante, estes índices tiveram valores oscilantes em relação aos percentuais do resíduo, pois algumas amostras, mesmo com percentual maior, o seu CBR foi menor, com algumas oscilações no desempenho da estabilização do solo, não crescendo na mesma proporção com o aumento do percentual do resíduo participante na composição de cada amostra.

Conforme expresso no gráfico da figura 5, o efeito de estabilização do solo argiloso em decorrência da adição do rejeito na constituição das amostras solo-rejeito, refletido pelo índice de expansão, os resultados dos ensaios revelaram ainda que, à medida que se foi

aumentando o percentual do resíduo na mistura com o solo, a sua expansão foi decrescendo. De fato, basta observar que a amostra do solo, sem adição do rejeito, apresentou um índice de expansão de 4,09%, enquanto uma outra do mesmo solo, com adição de apenas 20% do resíduo, a expansão já caiu para 2,35%, e a de nº 8, com uma adição de 80%, esse índice foi reduzido para apenas 1,39%. Estes fatos são provas inequívocas do poder estabilizante do rejeito, evidenciando que este material, até hoje ainda considerado lixo, poderá se transformar em um material terroso de qualidades físicas satisfatórias para construção de estrada e obras similares.

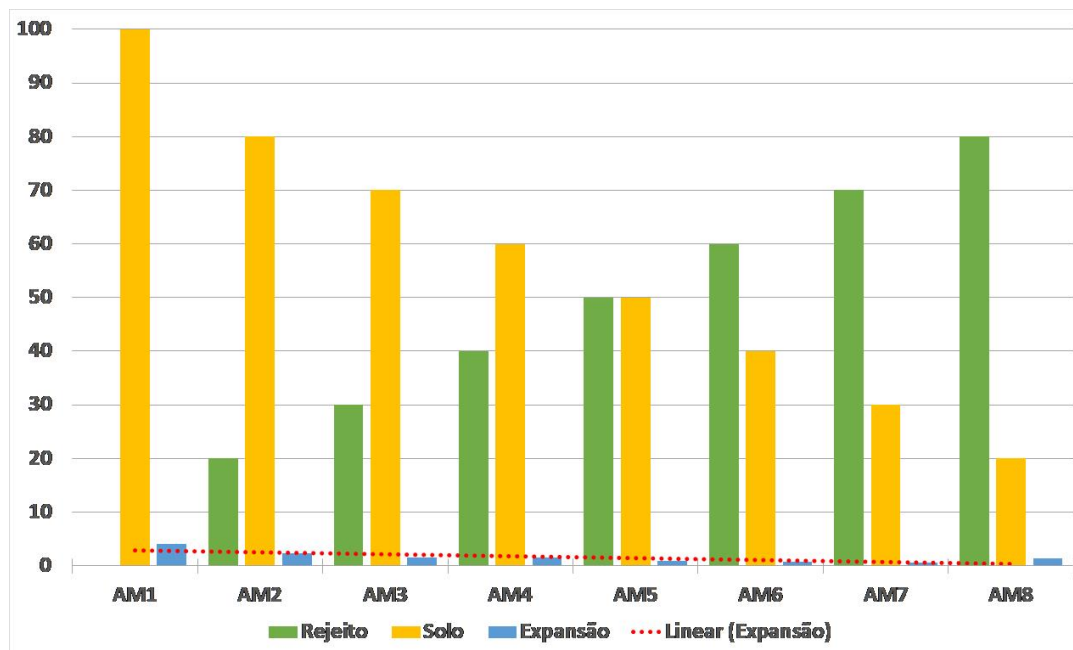


Figura 5 - Efeito do rejeito na estabilização do solo argiloso, refletida pelo Índice de Expansão.

As investigações geotécnicas também retrataram as características das amostras ensaiadas, através da classificação HRB (Highway Research Board). Esta classificação é função da granulometria e plasticidade de um material terroso. Assim, os solos granulares estão enquadrados nos grupos A-1, A-2 e A-3; os finos, compreendem os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7. De acordo

com os resultados apresentados pelos ensaios, todas as amostras estão inseridas no grupo A-2, revelando tratar-se de um solo do tipo granular, sendo que as amostras de 1 a 4 correspondem ao subgrupo A-2-6, por apresentarem percentual granulométrico passando na peneira 200 menor que 35%, limite de liquidez (LL) menor que 40% e índice de plasticidade (IP) maior que 10%. Isto

configura tratar-se de um material argiloso de alta plasticidade; enquanto as amostras de nº 5 a 8 estão enquadradas no subgrupo A-2-4, uma vez que apresentaram percentuais granulométricos passando na peneira 200 menor que 35% e LL menor que 40%, porém com um IP menor que 10%, revelando tratar-se de materiais de plasticidade mediana.

A estabilização do solo em decorrência da adição do rejeito ficou

também evidenciada pelos seus respectivos índices de Plasticidade (IP), conforme expressos no gráfico da figura 6. Nesta figura pode-se verificar que a amostra nº 1 do solo, sem nenhuma adição do rejeito, apresentou um índice de plasticidade 19, enquanto a amostra nº 3, com 30% do resíduo, este índice caiu para 12, e logo que se aumentou a sua dosagem para 60% o IP passou para um valor 8.

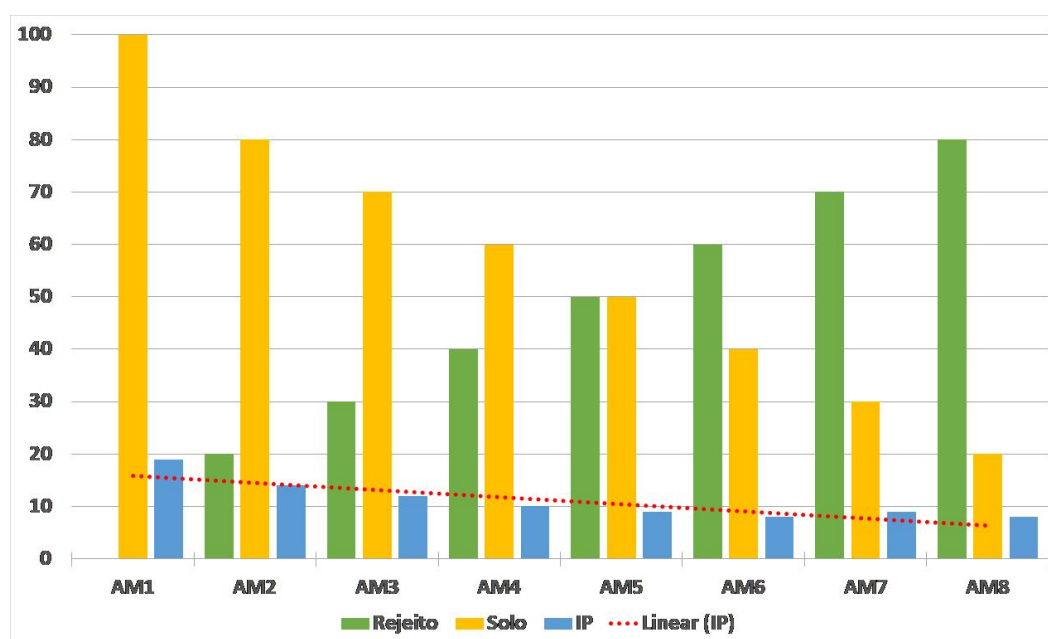


Figura 6 - Efeito do rejeito na estabilização do solo argiloso, refletida pelo Índice de Plasticidade (IP).

O efeito estabilizante do rejeito também está expresso pelos índices de grupo (IG). Observa-se que, ao se adicionar o resíduo ao solo, ocorreu uma redução dos valores dos respectivos IG das amostras solo-rejeito, tendo-se como parâmetro a amostra nº 1 constituída somente de solo (0% de rejeito), apresentou um IG 2, enquanto que logo que se adicionou 20% do resíduo ao solo (amostra 2), este índice caiu para 1 (um). E as seis demais amostras apresentaram IG de valor (0) zero (Figura 7).

5. CONCLUSÕES

Fazendo-se uma análise dos resultados dos ensaios geotécnicos, conclui-se que, o rejeito ao ser incorporado ao solo para composição das amostras solo-rejeito imprimiu ao solo expressivas melhorias nas suas propriedades físicas, refletindo o efeito estabilizante do referido resíduo. Este fato está retratado, principalmente, pelos índices de Suporte Califórnia (ISC/ CBR), expansão, Índice de Plasticidade (IP) e Índice de Grupo (IG).

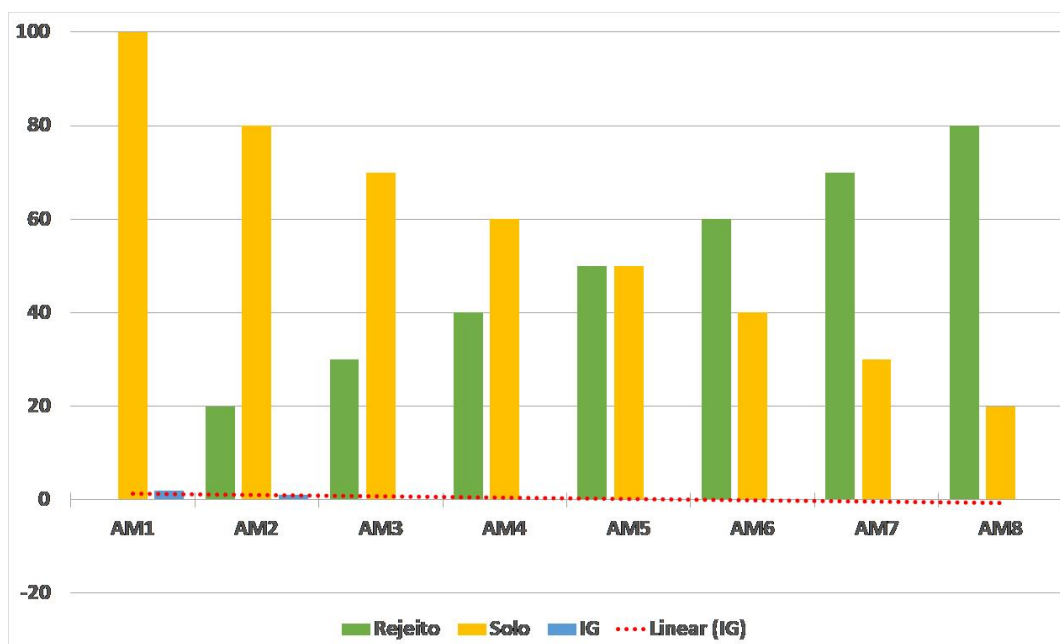


Figura 7 - Efeito do rejeito na estabilização do solo argiloso, refletida pelo Índice de Grupo (IG).

Os dados de laboratório evidenciaram ainda que, ao se misturar o rejeito, na composição solo-rejeito, o solo apresentou um desempenho crescente na sua consistência, medida pelo índice de suporte Califórnia (ISC ou CBR). Este fato não apresentou uma correspondência simétrica com a elevação dos percentuais do resíduo incorporado ao solo. Com efeito, embora fosse de se esperar que quanto maior o percentual do rejeito participante da mistura, maior deveria ser o seu CBR, crescendo de forma retilínea. Porém isto não se verificou. Mesmo assim, o fato é que os resultados dos ensaios revelaram que a incorporação do rejeito foi decisivamente determinante na estabilização do solo, de forma expressiva.

Os Índices de Expansão registrados nos resultados das investigações, também refletem o efeito estabilizante do rejeito auferido ao solo. De fato, os ensaios geotécnicos revelaram que, à medida que se foi aumentando o percentual do resíduo às misturas solo-rejeito, a expansão foi

decrecendo, configurando o processo de estabilização do solo.

A redução do índice de Plasticidade (IP) foi também um dado revelador do efeito estabilizante do rejeito, auferido pela sua incorporação ao solo. Assim, basta observar-se que a amostra nº 1, composta apenas de solo (0% de rejeito), apresentou um IP de valor 19, enquanto a de nº 2, com adição de apenas 20% do resíduo, este índice já caiu para 14. O IP, então, foi decrescendo à medida que se foi aumentando o percentual do rejeito, cujos valores variaram de 12 a 8.

Quanto ao efeito estabilizante proporcionado ao solo pelo rejeito expresso pelo Índice de Grupo (IG), os resultados revelaram que, ao se adicionar porções do resíduo na composição das amostras, nas variadas dosagens, este índice apresentou uma significativa redução nos seus valores, tendo-se como parâmetro a amostra nº 1, composta somente de solo (0% de rejeito).

Diante dessas considerações, conclui-se que a incorporação do rejeito

das indústrias de cal do município de Forquilha, na composição das amostras de solo-rejeito, proporcionou um expressivo desempenho na estabilização do solo, refletida, principalmente, pelos índices CBR, expansão, IG e IP.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Antonio Beltrão Sabadia, meu orientador, pela dedicação e estímulo à realização deste trabalho, bem como pelos inestimáveis ensinamentos no sentido de aprimorar a elaboração do mesmo.

À Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Geologia, na pessoa da Profa. Dra. Cynthia Romariz Duarte, pela atenciosa colaboração.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico – FUNCAP, pela concessão de bolsa de estudo do curso de doutorado, de fundamental importância no incentivo e viabilização das pesquisas.

Ao Departamento de Edificações e Rodovias – DER, do Governo do Estado do Ceará, na pessoa do geólogo José Furtado Pinto, chefe do Laboratório de Solo deste Departamento, pela viabilização dos ensaios geotécnicos das amostras de solo-rejeito, objeto das investigações.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182. Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro. 1968.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459. Solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro. 1984.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180. Solo – determinação do limite de

Plasticidade. Rio de Janeiro. 1984.

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9895. Índice Suporte Califórnia - CBR. Rio de Janeiro. 1987.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. DNIT – ME 049/94. Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994.
- ARRIVABENI, B.S.; MACHADO, C.C.; SANT'ANNA, G.L. Uso da Cal na Estabilização Granulométrica e Química de Solo de Estradas Florestais. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. Minas Gerais. Brasil. 2016.
- BRASIL/CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Mapa Geológico do Estado do Ceará, escala 1:500.000 – convênio MME/CPRM. – Governo do Estado do Ceará/ Secretaria de Recursos Hídricos. Fortaleza - CE, 2003.
- CAPUTO, H. M. Mecânica dos Solos e Suas Aplicações. V.1 – 3ª Edição. Rio de Janeiro, 1977. 242p.
- CEARÁ/DER – Departamento de Edificações e Rodovias. Especificações Gerais para Serviços, Obras Rodoviárias. Fortaleza – CE, 2005.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT. Pesquisa CNT de rodovias 2013: relatório gerencial, Brasília, CNT, SEST, SENAT, 2013.
- CRISTELO, N.M.C. Estabilização de Solos Residuais Graníticos através da adição de cal. Mestrado em Engenharia Civil. Escola de Engenharia da Universidade de Minho. 2001.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE - DNIT. Manual de Pavimentação. 3ª ed. Rio de Janeiro:

- DNIT, 2006.
- GONDIM, L.M. Estudo Experimental de Misturas Solo-emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/CE. In: Engenharia de Transporte. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2008.
- HERRIN, M. & MITCHELL, H. – Lime-soil mixtures. Highway Research Board, Bulletin 304, p. 99 – 121. 1961.
- MACHADO, F.P. Aproveitamento de rejeito de caieira na pavimentação de estradas vicinais: mitigação de dano ambiental. Nova Edições Acadêmicas, 64p. Fortaleza – CE, 2014.
- RESENDE, L.R. de. Estudo de Comportamento de Materiais Alternativos Utilizados em Estruturas de Pavimentos Flexíveis. Doutorado em Geotécnica (Tese). Universidade de Brasília. Brasília – DF, 2003.
- SILVA, M.F.de. Estudo comparativo de dois solos argilosos estabilizados com cal. Mestrado em Engenharia Geológica. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2010.
- SISTEMA NACIONAL DE VIAÇÃO - SNV. 2014 - Rede rodoviária sob jurisdição do Ministério dos Transportes. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/sistema-nacional-de-viacao/snv> -2014-1 Acesso em: 21 de novembro de 2014.
- SOUZA, A. N. S. Estudo de Mistura Solo-cal para Base de Pavimento Rodoviário. Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – FATECS. Brasília, 2014.
- VARGAS (1981). In: SOUZA, A. N. S. Estudo de Mistura Solo-cal para Base de Pavimento Rodoviário. Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – FATECS. Brasília, 2014.