



Aproveitamento de Rejeitos de Caieiras na Melhora Significativa da Resistência dos Índices de Pavimentação de Estradas e Mitigação de Dano Ambiental

Francisco Pessoa MACHADO¹, Antônia de Castro Côrtes PESSOA¹,
José Antonio Beltrão SABADIA²

Resumo: A presente pesquisa teve como foco o aproveitamento racional dos rejeitos de caieiras, constituído de cal e pedregulho não calcinado, advindos da atividade de produção de cal. A área escolhida para os estudos localiza-se nos limites dos municípios de Sobral e Coreaú, estado do Ceará, Nordeste do Brasil. Objetivando a caracterização geotécnica do rejeito, 12 amostras deste material foram coletadas, cada uma pesando em torno de 15kg, contemplando todas as indústrias de cal existentes na área de pesquisa. Essas amostras foram misturadas e homogeneizadas, a compor uma única amostra. Duas amostras de solos, sendo um arenoso e o outro argiloso, também foram coletadas na região da área. Com esses três materiais foram preparadas 14 amostras de aproximadamente 20kg. Seis destas amostras foram compostas por misturas do solo arenoso e dosagens gradativas de rejeito, nas proporções em volume de 80, 70, 60, 50, 40 e 30%. As outras amostras, oito, foram constituídas por misturas do solo argiloso com dosagens de rejeito nas proporções de 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20 e 0%. Todas as amostras foram submetidas a ensaios geotécnicos para determinação da sua granulometria e dos seus índices de suporte Califórnia (ISC/CBR), expansão, de plasticidade e de grupo. Em termos de consistência, constatou-se que os valores de CBR das misturas formadas tanto com o solo arenoso quanto com o argiloso, em geral, foram crescentes à medida que se foi aumentando o percentual de rejeito. Por sua vez, a amostra constituída somente de por solo argiloso apresentou CBR de 5%, enquanto a formada pela mistura de solo argiloso com 20% de rejeito o CBR foi de 19%. As demais amostras apresentaram CBR superiores a 52%. Diante dos resultados dos ensaios apresentados pelas amostras estudadas, conclui-se que, ao se incorporar os rejeitos de caieira ao solo, este adquire significativas melhorias nas suas propriedades físicas, refletidas não só pelo CBR, mas também por outros parâmetros, como expansão, plasticidade (IP) e índice de grupo (IG). Este aproveitamento, além de qualificar em grande monta a capacidade de resistência do estrato a ser utilizado na pavimentação de rodovias (melhora significativas na resistência dos índices de pavimentação), se reflete em um ganho ambiental importante, uma vez que estes rejeitos dificultam em muito os

1 Universidade Federal do Ceará - Programa de Pós-graduação em Geologia

2 Universidade Federal do Ceará

Autor para correspondência: José Antonio Beltrão Sabadia

Universidade Federal do Ceará - Departamento de Geologia - Bloco 912, Av. Mister Hull, 2977, Campuns do Pici, Fortaleza - Ceará. CEP: 60455-760. Email: beltrao.sabadia@gmail.com

Recebido em 20 de Maio de 2015 / Aceito em 10 de Agosto de 2015

trabalhos a serem realizados nas caieiras (geração de particulados, poeiras, custos de manejo, etc.) e, ainda são minimizados os impactos dos assoreamentos dos rios e açudes da região, uma vez que este material é de fácil mobilização, ainda mais diante do regime das fortes precipitações concentradas na primeira quadra chuvosa do ano hídrico do nordeste brasileiro.

Palavras-chave: Pavimentação, Sustentabilidade Ambiental, Mitigação de danos

Abstract: This research focused on the rational use of lime kilns waste, consisting of lime and gravel not calcined, arising from lime production activity. The area chosen for the study is located within the limits of the municipalities of Sobral and Coreaú, state of Ceara, northeastern of Brazil. Aiming the geotechnical characterization of the waste, 12 samples of this material were collected, each weighing around 15kg, covering all existing lime industries in research. These samples were mixed and homogenized, to compose a single sample. Two samples of soil, one sandy and clayey, were also collected in the area region. With these three materials were prepared 14 samples of approximately 20kg. Six of these samples were composed of mixtures of the sandy soil and incremental dosages of waste, in proportions by volume of 80, 70, 60, 50, 40 and 30%. The other samples, eight, were constituted by the mixtures of waste clay soil with dosages in proportions of 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20 and 0%. All samples were subjected to geotechnical testing to determine their particle size and their support indexes California (ISC/CBR), expansion, and plasticity group. In terms of consistency, it was found that the CBR values of the mixtures so formed with sandy soil as with the clay, in general, have been increasing as it has increased the waste percentage. In turn, the sample consists only of a clay soil presented CBR 5%, while that formed by the mixture of clayey soil with 20% reject the CBR was 19%. The remaining samples showed higher CBR to 52%. Before the test results supplied by the samples studied, it is concluded that, by incorporating the lime kilns tailings to the ground, this acquires significant improvements in their physical properties, reflected not only by the CBR, but also by other parameters, such as expansion, plasticity (IP) and group index (GI). This use, in addition to qualifying layer in large amounts to the endurance capacity to be used for paving roads (significant improvement in the strength of the paving rates), is reflected in a significant environmental gain, since these wastes difficult at very work to be carried out in lime kilns (generation of particulates, dust, handling costs, etc.) and the effects of silting up of rivers and reservoirs in the region are also minimized as this material is easily mobilized, even more in front of the regime of heavy rainfall concentrated in the first rainy season in the water year, northeastern of Brazil.

Keywords: *Paving, Environmental Sustainability, Damage Mitigation*

1. INTRODUÇÃO

A história das civilizações registra que a cal vem sendo usada pelo homem desde tempos remotos, provavelmente a contar dos primórdios da Idade da Pedra. Vale ressaltar que, mesmo tendo deixado marcas importantes quanto a inúmeros aspectos da humanidade, foi a partir da civilização Egípcia que a

cal passou a ter emprego mais efetivo. Sabe-se que só a partir desta civilização o produto passou a ser utilizado com frequência como aglomerante nas construções. E, logo sua utilização difundiu-se em outras civilizações, tais como na Grécia, Roma e em outras regiões do Mediterrâneo.

O mais antigo registro do emprego da cal como aglomerante data do ano 5600a.C., cujo documento arqueológico é uma laje de 25cm de espessura, encontrada na antiga Iugoslávia. Além deste exemplo, ressalta-se também a famosa via Ápia, histórica rodovia romana, com 288km de extensão, ligando a cidade de Roma a Brindisi, na costa do mar Adriático, tendo sua construção iniciado no ano de 312a.C. Feita com pedras, cascalho e cal hidratada, esta estrada romana é até hoje utilizada, pois vem resistindo por mais de 2300 anos ao tráfego de cavalos e carroças dos tempos passados até aos atuais veículos modernos. Inegavelmente, a cal tem sua efetiva contribuição para essa extraordinária durabilidade.

Na Região Norte do Ceará, no Nordeste do Brasil, os municípios de Sobral e Coreaú, são portadores de grandes jazimentos de calcário. Estes jazimentos estão enquadrados geologicamente na formação Frecheirinha, pertencente ao grupo Ubajara, datado do Neoproterozóico.

O calcário tem sido muito importante para o desenvolvimento socioeconômico da região, com a geração de emprego e renda, através da indústria de cimento Portland e da produção de cal. Vale destacar ainda que, embora existam na região alguns fornos contínuos, na grande maioria a produção de cal é feita em fornos rudimentares, do tipo caieiras (MACHADO, 2014; MACHADO, 2011).

Sabe-se que a atividade da produção de cal encontra-se associada à geração de rejeitos compostos da mistura de pedregulhos de sílica, calcário, cal e cinzas. Na produção da pedra Cariri (sul do estado do Ceará), de forma diferenciada, estes rejeitos são reconhecidamente muito volumosos,

causando muitas preocupações aos órgãos de competência da gestão ambiental e da produção mineral (SILVA, 2015).

Os rejeitos da produção da cal causam danos ao meio ambiente, em decorrência da formação do grande acúmulo de entulhos ao redor das caieiras e dos fornos contínuos. Com o acúmulo deste material o andamento dos trabalhos da produção são bem dificultados. Há uma forte geração de poeiras e particulados, elevação dos custos de manejo, e, em função de sua fácil mobilização, grande parte deste material é facilmente carregado para os rios, riachos e açudes da região, tendo em vista o regime de concentração das fortes chuvas na primeira quadra do ano hidrológico nordestino.

Daí a importância da realização de estudos visando identificar uma destinação útil e economicamente viável para esses resíduos, no sentido de viabilizar o seu aproveitamento e minimizar os riscos dos danos ambientais advindos da atividade de produção de cal. A pesquisa objeto deste trabalho teve, para tanto, como foco o aproveitamento racional destes resíduos, buscando quantificar os percentuais que devem ser utilizados no sentido de se elevar a resistência dos índices de pavimentação das estradas vicinais e rodovias da região, concomitantemente com a preocupação ambiental, como já anteriormente dito.

Pessoa (2011) realizou trabalho com as mesmas amostras aqui trabalhadas, mas, com outro viés de utilização destes rejeitos e, com muito bons resultados.

2. LOCALIZAÇÃO E ACESSOS

A área escolhida para os estudos é uma zona limítrofe entre os municípios de

Sobral e Coreaú, que abriga respectivamente as comunidades de Pedra de Fogo e Aroeiras, na região norte do estado do Ceará, Nordeste do Brasil.

Esta região abrange uma faixa disposta ao longo da rodovia CE-364, no

trecho entre o distrito de Aprazível (rodovia BR-222, km 253), município de Sobral, e a cidade de Coreaú, com uma extensão de aproximadamente 2 por 11km (Figuras 1 e 2).

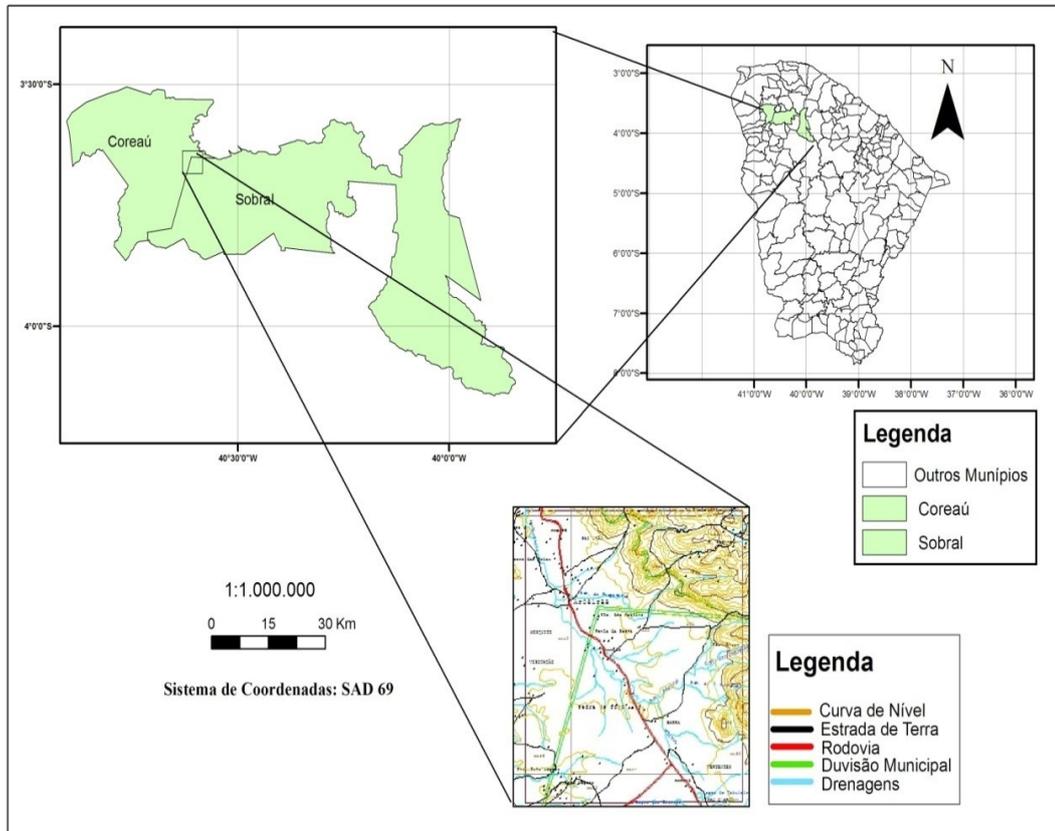


Figura 1 - Mapa de localização da área da pesquisa.

O acesso à área, a partir de Fortaleza, pode ser feito pelo menos por duas alternativas rodoviárias. Através da rodovia BR-222, até o distrito de Aprazível (município de Sobral), depois de percorridos 253km, de onde se segue pela rodovia CE-364, por um percurso de mais 8km.

Uma segunda opção poderá ser a de se utilizar inicialmente da BR-222 até a cidade de Umirim (km 92), seguindo-se daí pela rodovia CE-354, passando pela cidade de Itapipoca e seguindo-se até Sobral, por um percurso de 285km. Em seguida toma-se novamente a BR-222 por mais 26km até Aprazível, e

prosegue-se daí o mesmo trajeto final descrito acima.

3. OBJETIVOS

3.1 Geral

Identificar alternativa técnica e economicamente viável para o aproveitamento dos rejeitos da produção da cal, no sentido de mitigar os danos ambientais advindos desta atividade, além de se buscar quantificar os percentuais que devem ser utilizados deste material no sentido de se elevar a resistência dos índices de pavimentação das estradas vicinais e rodovias da região.

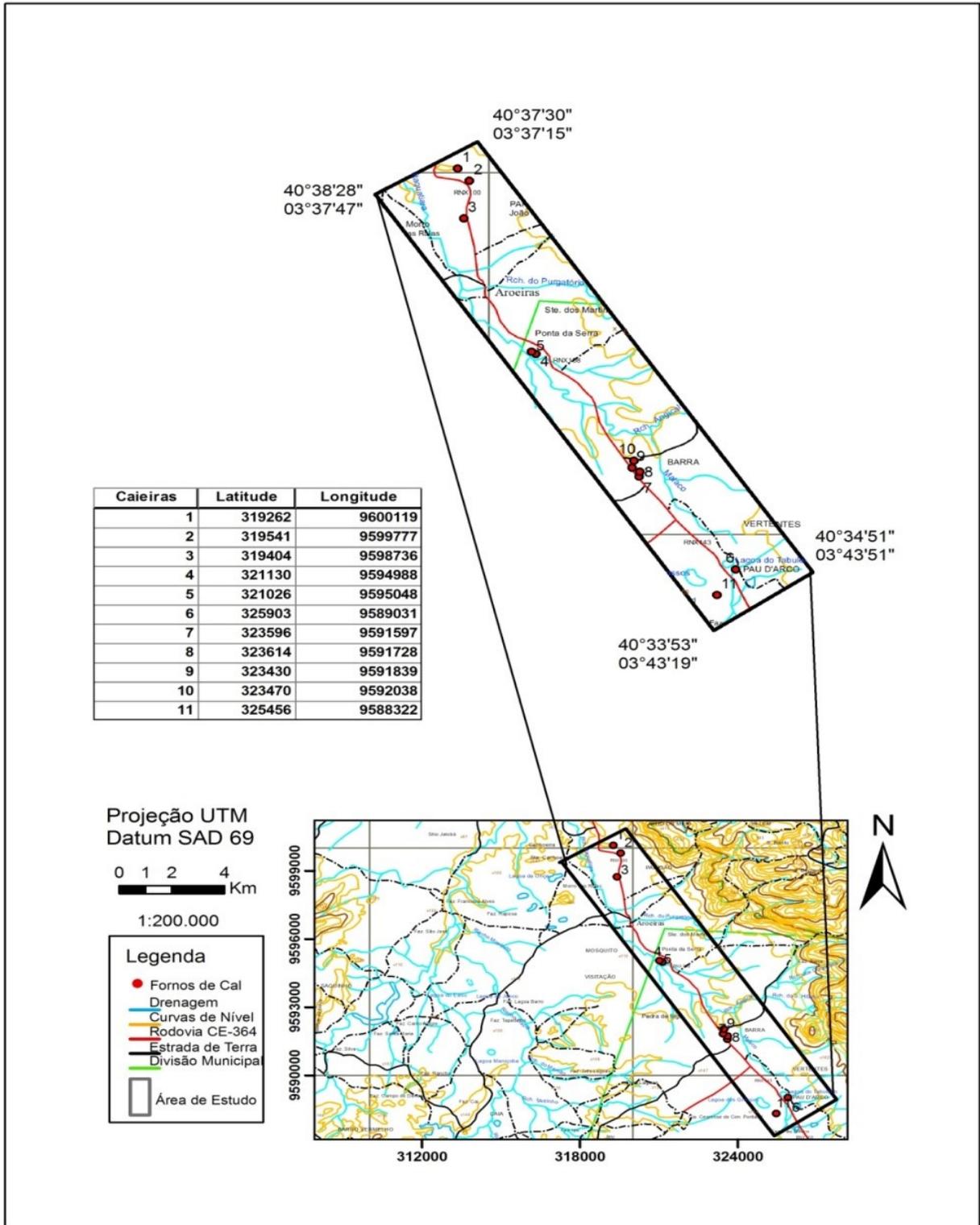


Figura 2 - Mapa de detalhe da área da pesquisa com a localização dos fornos de cal e das caieiras.

3.2 Específicos

a) Efetuar caracterização geotécnica de amostras de misturas solo-rejeito, com diferentes dosagens deste resíduo de caieira, com o intuito de apontar a mais adequada para seu emprego na pavimentação de estrada;

b) Determinar uma dosagem mínima, necessária e suficiente, do rejeito para composição de mistura com solo que venha apresentar performance satisfatória em termos, principalmente, de sua expansão e índice de suporte Califórnia (ISC ou CBR); e,

c) Promover a mitigação dos danos ao meio ambiente advindos da atividade de produção de cal, através da indicação de alternativa para o emprego racional desses resíduos.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E JUSTIFICATIVAS

A região norte do estado do Ceará é portadora de importantes e variados tipos de rochas carbonáticas, que vão desde os jazimentos de calcários calcínicos aos de natureza magnesiânica.



Figura 3 - Forno do tipo caieira utilizado na calcinação de calcário. Local fazenda Pau d'arco, comunidade de Pedra de Fogo (município de Sobral).

Revista de Geologia 28 (1), 2015.

Estes jazimentos encontram-se concentrados nos municípios de Sobral, Coreaú, Frecheirinha, Santa Quitéria e Forquilha. Nestes municípios, muitas famílias vivem da extração de calcário para a produção de cal, predominantemente realizada de forma ainda bastante rudimentar, utilizando-se, principalmente, de fornos do tipo caieira (Figura 3).

A exceção dessa forma de produção é a existência de dois fornos contínuos (Figura 4) no município de Coreaú, cada um com capacidade para produzir 20 toneladas de cal hidratada/dia, que proporcionam melhores condições de trabalho, maior produtividade e menor consumo de lenha por tonelada de cal produzida.

A atividade de produção de cal se reverte de fundamental importância econômica e social para as comunidades produtoras, por ser uma fonte de emprego e renda. O problema, de importante relevância, está na geração de acúmulo de rejeitos, compostos de uma mistura de pedregulhos de sílica, cal e cinzas (Figura 5).



Figura 4 - Forno de cal contínuo localizado em Aroeiras, município de

Esses resíduos, ao longo do tempo vão sendo depositados ao redor das caieiras, formando amontoados que, além de prejudicar o bom andamento dos trabalhos de produção, em função da geração de particulados e de poeiras e a elevação dos custos de manejo, causam danos ambientais, principalmente pelo carreamento de grande parte deste material para os açudes, rios e riachos da região, em função das chuvas concentradas no primeiro semestre do ano, além, ainda, no agressivo aspecto visual modificador da paisagem natural.

Faz-se necessária a realização de estudos no sentido de que seja encontrada uma alternativa para amenizar esses problemas. Ademais, o aprovei-

tamento dos resíduos das caieiras e dos fornos contínuos poderá ser mais uma fonte de renda para os produtores de cal. Na busca de atingir esses objetivos, foi realizada a presente pesquisa, tendo como foco a identificação de uma destinação racional e econômica, do ponto de vista geotécnico, para estes materiais.

Durante os estudos de campo constatou-se que na região esses resíduos têm sido utilizados, com razoável sucesso, para resolver problemas pontuais de atoleiros nas estradas vicinais por onde passam os caminhões que transportam calcários e lenha para os produtores da cal, porém de maneira empírica (Figura 6).



Figura 5 - Amontoados de rejeito de caieira, Fazenda Barra, comunidade de Pedra de Fogo, município de Sobral.

Figura 6 - Utilização de rejeitos de caieiras e fornos de cal na pavimentação de pequeno trecho da estrada vicinal Aroeiras-Ubaúna, na margem esquerda do rio Itaquiatiara, município de Coreaú. Alternativa de razoável sucesso, porém realizada de maneira informal e empírica.



Diante dessa experiência empírica, vislumbrou-se a importância e a necessidade da realização de estudos de caracterização geotécnica das misturas solo e rejeito, no intuito de identificar uma dosagem mais apropriada para seu uso, conciliando-se o aspecto técnico com o econômico e ambiental. A mistura de rejeito ao solo tem sua importância na redução dos custos com transporte, uma vez que ambos podem ser retirados nas proximidades do local onde ele será empregado.

5. SÍNTESE GEOLÓGICA

No que tange à geologia da região da área de pesquisa, ela está caracterizada pela sua inclusão na Região de Dobramentos do Médio Coreaú. Esta região corresponde a um Cinturão Orogênico que engloba variada gama de litotipos, de distintas idades e origens, numa mesma unidade tectônica. Esta unidade, juntamente com o Maciço de Granja, ocupa toda a porção do extremo noroeste do estado do Ceará, e está situada ao norte do lineamento Sobral- Pedro II.

O projeto RADAMBRASIL (1981) propôs uma redefinição para as unidades litológicas tidas como pertencentes ao "Grupo Bambuí", passando a adotar para esta unidade o termo Grupo Ubajara. Assim, sua nova conceituação passa a representar uma associação litológica composta de três unidades litoestratigráficas, constituídas pelas formações Trapiá, Caiçaras e Frecheirinha.

O Mapa Geológico do Ceará (Figura 7), de forma adaptada para a presente pesquisa, originalmente na escala 1:500.000 (CPRM, 2003), mantém a denominação de Grupo Ubajara, adotada pelo Projeto RADAMBRASIL (1981), porém representando-o pelas

mesmas unidades litoestratigráficas adotadas por Costa *et al.* (1973): Formação Trapiá, Caiçaras, Frecheirinha e Coreaú. Este grupo está situado geocronologicamente no Neoproterozóico (650 a 850Ma.).

A Formação Frecheirinha, objeto de estudo desta pesquisa, é constituída por bancos de calcário intensamente cortado por veios de calcita e sílica, exibindo sempre superfícies de dissolução. O calcário apresenta granulação fina, colorações preta, cinza-azulada, cinza-escura e, mais raramente, creme e rósea, bastante impuro, com eventuais intercalações de delgados bancos margosos, metassiltitos e quartzitos finos e escuros.

6. EMBASAMENTO TEÓRICO

De acordo com Caputo (1977) o ensaio para determinação da umidade ótima e do peso específico máximo de um solo é realizado pelo ensaio de Proctor, proposto em 1933 pelo engenheiro americano que lhe deu o nome (Ralph Proctor). Este ensaio é conhecido como ensaio normal de Proctor (AASHTO Standard/American Association of State Highway Officials), padronizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT em seu MB-33 (2005).

Consiste em compactar a amostra dentro de um recipiente cilíndrico, com aproximadamente 1.000cm³, em três camadas sucessivas, sob a ação de 25 golpes de um soquete pesando 2,5kg, caindo de uma altura de 30cm.

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.

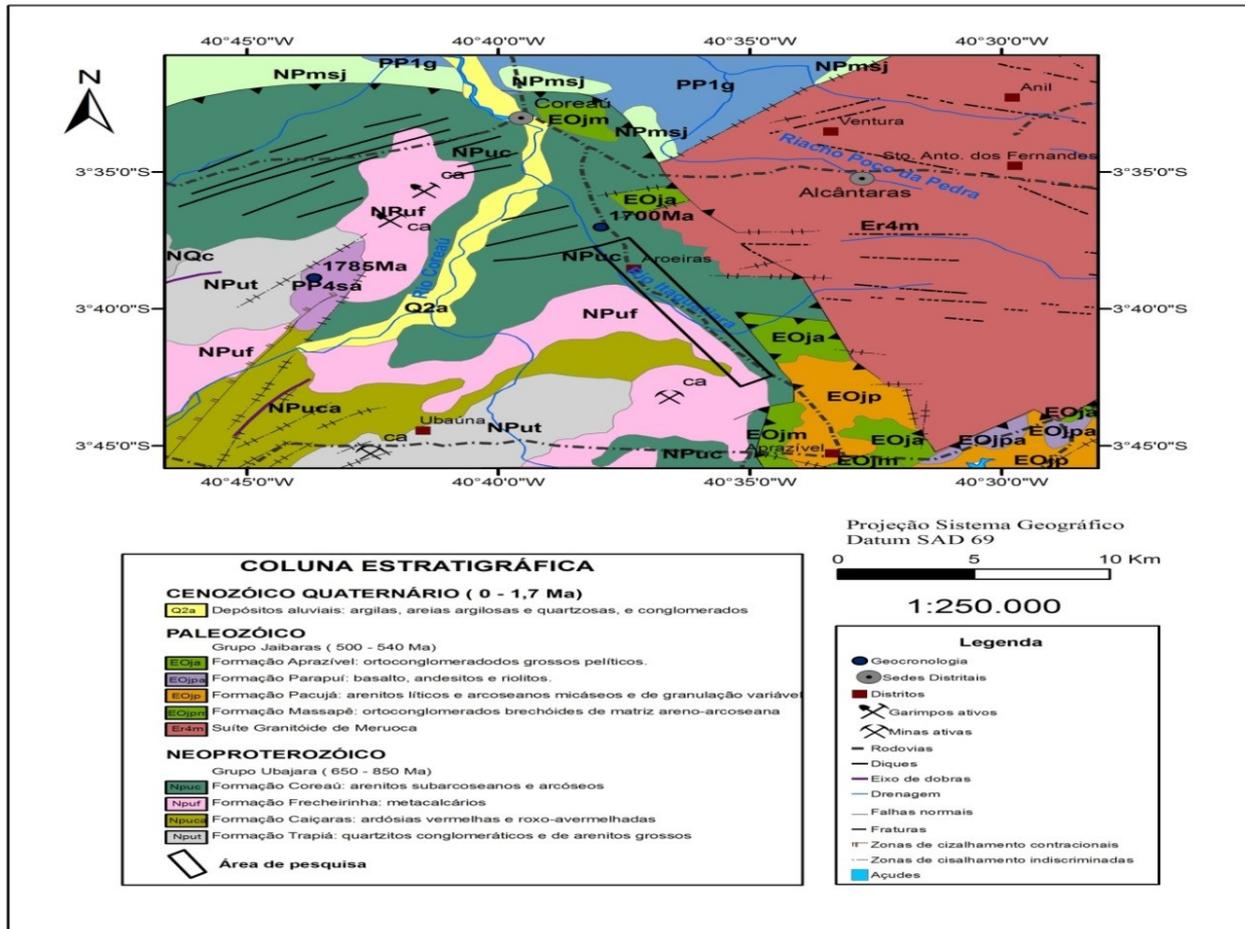
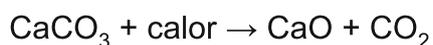


Figura 7. Mapa geológico da área de pesquisa. Modificado do Mapa Geológico do Estado do Ceará (CPRM, 2003), originalmente realizado na escala 1:500.000.

Falcão Bauer (1994) define cal como sendo um nome genérico de um aglomerante simples, resultante da calcinação de rochas calcárias, que se apresenta sob diversas variedades, com características resultantes da natureza da matéria-prima empregada e do processamento conduzido.

Basicamente, a transformação de um calcário em cal decorre de reações químicas desencadeadas pelo processo de calcinação. O carbonato de cálcio, submetido à ação do calor à temperatura aproximada de 900°C, decompõe-se em óxidos de cálcio e anidridos carbônicos.

Este processo é definido pela seguinte equação:



O produto desta reação chama-se cal viva ou cal virgem. Para tornar-se aglomerante, utilizado na construção, o óxido de cálcio (cal viva) deve ser hidratado, transformando-se em hidróxido, através da reação:



Segundo Guimarães (1998) a adição de cal ao solo é uma das mais antigas técnicas utilizadas pelo homem para obter-se a estabilização ou melhoria dos solos instáveis. Porém, esta técnica havia caído no esquecimento ou desuso por um longo período. Seu emprego foi retomado nos anos de 1920 e hoje em dia seu emprego e consumo representam uma cifra de grande expressão. Isto é

evidenciado pelo relevante consumo de cal nos Estados Unidos ($1,2 \times 10^6$ t/ano) e no Japão ($0,5 \times 10^6$ t/ano), em 1993.

Pereira *et al.* (2006) verificaram que vários fatores influenciam a execução e a performance de camadas de pavimentos rodoviários constituídas de solos estabilizados quimicamente, com destaque para a homogeneização da mistura no período de tempo decorrido entre esta e a compactação.

Conforme Santos (2008) a adoção intempestiva da tecnologia de conservação apoiada na ilusória eficiência da “patrolagem” sistemática implicou na contínua raspagem/remoção da camada de solos de melhor qualidade, compactada pelo tráfego.

Em decorrência deste processo, desencadeia-se um progressivo aprofundamento da estrada (conhecida como pista em caixão), dificultando a drenagem, expondo camadas de solo cada vez menos consistentes e potencializando extraordinariamente os processos erosivos destrutivos e o assoreamento de drenagens naturais.

Oliver (2009) em seu artigo sobre calcário apresenta a classificação da Secretaria de Fiscalização Agropecuária, constante na Portaria SEFIS N°3, de 12/06/1986, segundo a qual os calcários são divididos, quanto à concentração de óxido de magnésio (MgO), nas seguintes categorias:

- Calcário calcítico – teor de MgO menor que 5%;
- Calcário magnesiano – teor de MgO entre 5 e 12%; e,
- Calcário dolomítico – acima de 12% de MgO.

7. MATERIAIS E MÉTODOS

7.1 Materiais

Na presente pesquisa fez-se uso dos rejeitos de caieiras e de fornos

contínuos gerados em grande monta no processo de produção da cal. O interesse pela investigação geotécnica, no sentido do aproveitamento desse rejeito, deve-se à constatação da presença de cal (CaO), junto com pedregulho, que demonstra potencial para a estabilização química de solos.

Para realização de ensaios geotécnicos, foram coletadas 12 amostras de rejeito, cada uma pesando cerca de 15kg, sendo 10 nas caieiras e duas no forno contínuo comunitário de Aroeiras. Também foram coletadas, na área de pesquisa, duas amostras de solo, sendo uma de solo areno-siltoso, de coloração creme, e a outra de solo areno-silto-argiloso de coloração avermelhada, pesando cada uma cerca de 90kg.

A coleta das amostras de rejeito, bem como das de solos teve como objetivo a composição de amostras da mistura solo-rejeito, com diferentes dosagens do rejeito, para serem submetidas a ensaios de caracterização geotécnica de laboratório (Figura 8).

Um levantamento realizado na área de pesquisa revelou que nos seus domínios há nove caieiras em funcionamento, cada uma produzindo em média 52,5t de cal hidratada por fornada. Cada caieira produz em média entre duas e quatro fornadas/mês, dependendo da demanda comercial de cada produtor.

Além dessas caieiras, na área existe também um forno contínuo, que produz diariamente 20t, ou seja, 600t/mês de cal hidratada. Contabilizando-se as produções das nove caieiras e do forno contínuo, tem-se um montante de 1.950t de cal por mês. (Tabela 1). Isto representa uma cifra anual média de 23.400t de cal hidratada. A matéria-prima empregada na produção de cal é o calcário da formação Frecheirinha; como já comentado anteriormente no texto.

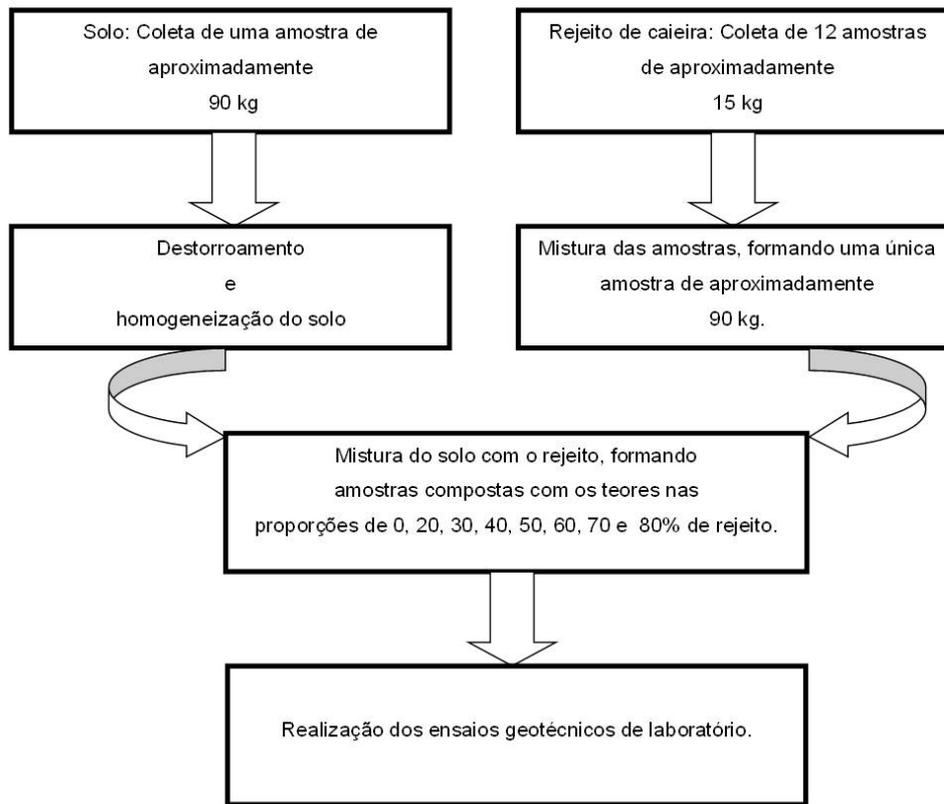


Figura 8 - Fluxograma de preparação das amostras da mistura solo/rejeito para realização dos ensaios geotécnicos.

Tabela 1 - Localização das caieiras e do forno contínuo, e produção mensal de cal.

Nº de Ordem	Local	Coordenadas UTM	Unidade produtiva (caieira)	Produção de cal/mês (t)
1	Vila Basílio/ Coreaú	0319262 9600119	Chico Isaias	90
2	Vila Basílio/ Coreaú	0319541 9599777	Forno comunitário	600
3	São Raimundo/ Coreaú	0319404 9598736	Isauro	210
4	Ponta da Serra/ Sobral	0321130 9594988	Nem I	157,5
5	Ponta da Serra/ Sobral	0321026 9595048	Nem II	157,5
6	Pedra de Fogo/ Sobral	0325903 9589031	Debalde	Paralizada temporariamente
7	Pedra de Fogo/ Sobral	0323596 9591597	Raimundo Ximenes	105
8	Pedra de Fogo/ Sobral	0323614 9591728	Zé Gerardo	157,5
9	Pedra de Fogo/ Sobral	0323430 9591839	Roberto	210
10	Pau d'Arco/ Sobral	0323470 9592038	Francion	105
11	Pau d'Arco/ Sobral	0325456 9588322	Elivar	157,5
TOTAL				1.950,00 t/mês

Dados sobre as características químicas básicas desse calcário, levantados junto aos arquivos do Departamento Nacional de Produção Mineral/DNPM e da Companhia de Desenvolvimento do Ceará/CODECE, revelaram teores médios de 50,23% para CaO e de 1,99% para MgO. Estes dados foram extraídos de laudos de análises de nove amostras desse calcário, coletadas nas redondezas da área objeto desta dissertação.

De acordo com a classificação constante na Portaria SEFIS nº3, de 12/06/1986 (OLIVER, 2009), o calcário Frecheirinha, utilizado como matéria-prima na produção de cal na área de pesquisa em referência, é caracterizado como calcítico, conforme o teor médio de MgO (1,99%) anteriormente citado, por ser este teor inferior a 5%.

Através do levantamento do volume de cal produzido, foi possível fazer-se uma estimativa do volume de rejeito gerado pela indústria de cal. Diante dos resultados deste estudo, chegou-se à conclusão de que a geração de rejeito, composto de cal, pedregulhos e cinzas, resultante do processo de peneiramento da cal hidratada, na peneira de 20mm de malha, é da ordem de 20% sobre a produção de cal bruta (antes de ser peneirada). Desta forma, concluiu-se que o aporte mensal desse resíduo é de 390t/mês, o que representa um montante de 4.680t/ano.

7.2. Métodos

As 12 amostras de rejeito coletadas na área de pesquisa foram devidamente quarteadas, de modo a compor uma única amostra homogênea, de aproximadamente 180kg. Em seguida, partes deste material foram misturadas a porções dos solos, coletados na área, formando dois conjuntos de amostras da

composição de solo-rejeito, cada uma destas pesando cerca de 20kg. Um desses conjuntos foi composto com o solo arenoso e o outro com o argiloso.

Inicialmente, cada conjunto de amostras foi formado com seis amostras, sendo estas compostas com os seguintes percentuais de rejeito: 80, 70, 60, 50, 40, 30 e 20%. Estes valores foram calculados sobre o volume dos componentes de cada amostra dos materiais secos. Após esta preparação, as amostras foram submetidas aos ensaios geotécnicos de laboratório, para determinação da sua granulometria, limite de liquidez (LL), índice de plasticidade (IP), índice de grupo (IG), umidade ótima (hot), densidade máxima (dmáx.), expansão, grupo HRB e índice de suporte Califórnia (ISC ou CBR).

Visando tornar mais facilmente compreensível o diagnóstico dos resultados dos ensaios geotécnicos a que foram submetidas as amostras de solo-rejeito, a seguir são definidos os índices considerados parâmetros determinantes na caracterização de um material terroso de emprego na construção de pavimento de estradas e de obras similares. Esses parâmetros são o índice de suporte Califórnia (ISC / CBR), expansão, índice de plasticidade (IP), classificação HRB e o índice de grupo (IG).

Índice de suporte Califórnia (ISC) ou "California Bearing Ratio" (CBR). Mede a resistência de penetração de um corpo de prova feito de solo na umidade ótima, mediante puncionamento na face superior da amostra, de um pistão de aproximadamente 5cm de diâmetro. Esse pistão é movimentado sob a força de uma prensa mecânica que gira com velocidade de penetração de 1,25mm/min.

Os ensaios foram realizados aplicando-se a energia intermediária (com o Proctor Intermediário), 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 4,5kg, caindo de uma altura de 45cm. O Departamento de Edificações e Rodovias do Governo do Estado do Ceará-DER/CE considera aceitável para base de pavimentos um solo com CBR a partir de 25%, com a aplicação da energia intermediária.

Expansão é o índice que determina a capacidade de um material de se expandir ao absorver água. O ensaio é realizado para medir a capacidade de expansão de um solo e é realizado 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 tanque/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 os limites de liquidez (LL) e o de plasticidade (LP).

$$IP = LL - LP$$

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 (mais argiloso).

A classificação HRB (*Highway Research Board*) 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.

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, 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.

Vale salientar que, para viabilização técnica e econômica do aproveitamento dos rejeitos de caieira na pavimentação de estradas, o foco foram aquelas vias localizadas a pouca distância da fonte de produção desses resíduos, visando reduzir custos com transporte de material. Por se tratar de estradas de pouco movimento de veículos, a pavimentação deve ser feita com revestimento primário, conhecido como “empiçarramento”, que é relativamente de baixo custo operacional.

Considerou-se de interesse da pesquisa que o solo argiloso fosse estudado com mais detalhe, uma vez que este tipo de solo, se estabilizado, adquire propriedades físicas mais adequadas para construção de pavimento de rodovia com revestimento primário. Analisando-se os resultados dos ensaios do conjunto inicial de seis amostras de solo argiloso, verificou-se que, mesmo aquela amostra de menor percentual de rejeito, de 30%, apresentou um CBR bem expressivo, de 63%.

Em razão da amostra de solo argiloso com mistura de 30% de rejeito, ter apresentado um CBR acima de 25%, que já é considerado de boa qualidade para construção de base de pavimento de estrada, preparou-se uma nova amostra de solo argiloso, com percentual menor desse resíduo, desta feita com 20%. Esta amostra foi submetida aos ensaios

geotécnicos, tendo apresentado um CBR de 19%.

Objetivando melhor aquilatar o efeito do rejeito na estabilização do solo, foram realizados ensaios geotécnicos também em uma amostra de 20kg do mesmo solo argiloso, porém sem a mistura desse resíduo (Amostra 8, Tabela 1). Desta forma, além das 12 amostras inicialmente preparadas e analisadas geotecnicamente, mais duas foram estudadas perfazendo assim 14 amostras submetidas a esses ensaios, sendo 13 de solo-rejeito e uma de solo argiloso, sem a mistura de rejeito.

8. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Os resultados dos ensaios geotécnicos dos dois grupos de amostras, constituídas com o solo arenoso e com o solo argiloso, revelaram os principais índices físicos identificados em cada amostra estudada. A realização desses ensaios, empregando-se dois tipos de solo, teve o intuito de possibilitar uma análise comparativa dos seus resultados, expressando o efeito estabilizante do rejeito de caieira em cada um deles.

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 solo destinado a pavimentação de estrada.

O Proctor intermediário consiste na

compactação de um solo utilizando-se amostras deformadas, não reusadas, de material passado na peneira de $\frac{3}{4}$ de polegada (19mm). Os corpos de prova foram moldados em cilindros metálicos com capacidade de 1.000cm³ 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 4,5kg, caindo de uma altura de 45cm.

Para determinação do CBR e da expansão do solo foram realizados testes geotécnicos em cinco corpos de prova, que é o mínimo recomendável, com solo apresentando teores crescentes de umidade, para a composição de cada um deles.

9. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Diante dos resultados dos ensaios, mesmo uma mistura com apenas 30% desse resíduo, o solo arenoso apresentou um CBR de 52%. Este índice qualifica a mistura com esta composição dentro dos padrões de uma boa matéria-prima para construção de base de pavimento asfáltico de rodovia. (Tabelas 2 e 3).

Por sua vez, os ensaios realizados nas seis amostras compostas com solo argiloso e com as mesmas proporções de rejeito acima citadas, revelaram que a amostra de menor índice de suporte foi aquela composta de 30% desse resíduo, cujo CBR foi de 63%. Este índice é também um valor considerado bem acima do mínimo aceitável para construção de base de pavimento de estrada, que é de 25%, aplicando-se a energia intermediária.

Analisando-se os dados de laboratório, conclui-se que, ao se misturar o rejeito de caieira ao solo, este adquire uma maior resistência física, medida pelo

pelo índice de suporte Califórnia (ISC ou CBR). Isto ocorre devido à estabilização química, proporcionada pela incorporação do rejeito ao solo. Dependendo do tipo de

solo, se arenoso ou argiloso, o rejeito proporciona a eles uma diferente resistência física, para um mesmo percentual adicionado (Figuras 9 e 10).

Tabela 2: Caracterização geotécnica de amostras compostas de solo arenoso + rejeito.

Amostra	Rejeito (%)	Solo (%)	CBR ou ISC (%)	Expansão (%)	IP	Classificação HRB	IG
1	80	20	89	0	NL	A - 1 - b	0 (zero)
2	70	30	74	0	NL	A - 1 - b	0 (zero)
3	60	40	72	0	NL	A - 2 - 4	0 (zero)
4	50	50	64	0	NL	A - 2 - 4	0 (zero)
5	40	60	61	0	NL	A - 1 - b	0 (zero)
6	30	70	52	0	NL	A - 1 - b	0 (zero)

Tabela 3: Caracterização geotécnica de amostras compostas de solo argiloso + rejeito.

Amostra	Rejeito (%)	Solo (%)	CBR/ ISC (%)	Expansão (%)	IP	Classificação HRB	IG
1	80	20	77	0,16	NL	A - 2 - 4	0
2	70	30	73	0,39	NL	A - 2 - 4	0
3	60	40	79	0,28	NL	A - 4	0
4	50	50	64	0,09	NL	A - 4	2
5	40	60	60	0,08	NL	A - 4	3
6	30	70	63	0,16	NL	A - 4	4
7	20	80	19	0,24	8,4	A - 6	3
8	0	100	5	0,55	14,2	A-7 - 6	9

Portanto, era de se esperar que a tendência geral seja a de que quanto maior o percentual de rejeito participante da mistura, maior seja o seu CBR. No entanto, nos estudos com o solo argiloso, no caso, considerando-se as amostras 2, 3, 5 e 6, constituídas com misturas respectivamente, de 70, 60, 40, e 30% de rejeito, apresentaram resultados que não condizem com esta tendência tão retilínea esperada.

Assim, a amostra 2, mesmo com um teor maior de rejeito (70%), apresentou CBR (73%) menor que o da amostra 3 (CBR 79%), com menor percentual de resíduo. Enquanto a 5, com

40% de rejeito, exibiu um CBR (60%) menor que o da amostra 6 (CBR 63%), composta com apenas 30% do resíduo.

Com o objetivo de dirimir dúvidas ou verificar se houve erro nos procedimentos de preparação das amostras e/ou da execução dos ensaios de laboratório, quatro novas amostras foram preparadas com as mesmas dosagens de rejeito. Os resultados apresentados por estas amostras foram basicamente os mesmos que os apresentados pelas primeiras ensaiadas; mantendo-se aqui, portanto, os mesmos dados expressos nos primeiros ensaios.

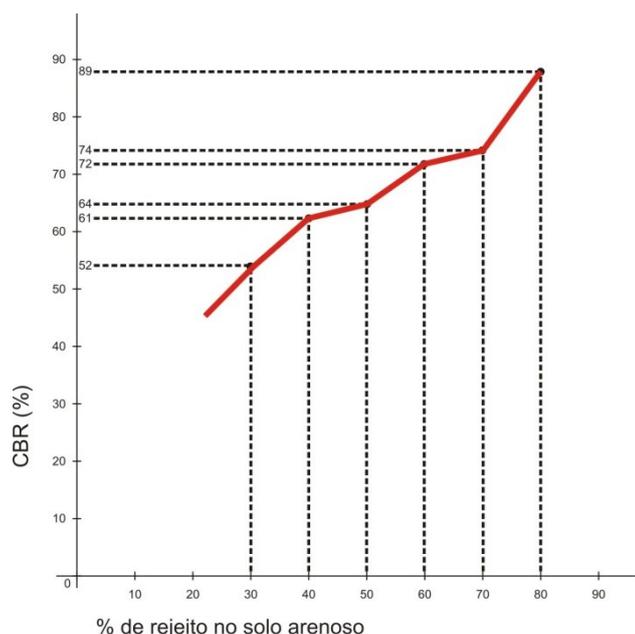


Figura 9 - Efeito do rejeito de caieiras e dos fornos de cal na estabilização do solo mais arenoso.

E, para evidenciar mais claramente o efeito do rejeito de caieira na estabilização química do solo, uma amostra de 20kg do mesmo solo argiloso, sem mistura do rejeito, foi submetida aos ensaios geotécnicos, revelando um CBR de 5%. Este índice já é suficiente para enfatizar o fator estabilizante desse resíduo, pois a incorporação de apenas 20% deste material elevou o índice de suporte (CBR) de 5% para 19%.

10. CONCLUSÕES

Fazendo-se uma avaliação comparativa entre os resultados dos ensaios geotécnicos apresentados pelas amostras compostas com o solo mais arenoso e as constituídas com o mais argiloso verificam-se algumas diferenças bem evidentes entre estes dois conjuntos de amostras ensaiadas, para correspondentes percentuais de rejeito neles contidos (Tabelas 2 e 3).

A amostra de solo arenoso contendo apenas 30% do resíduo apresentou um CBR de 52% enquanto a

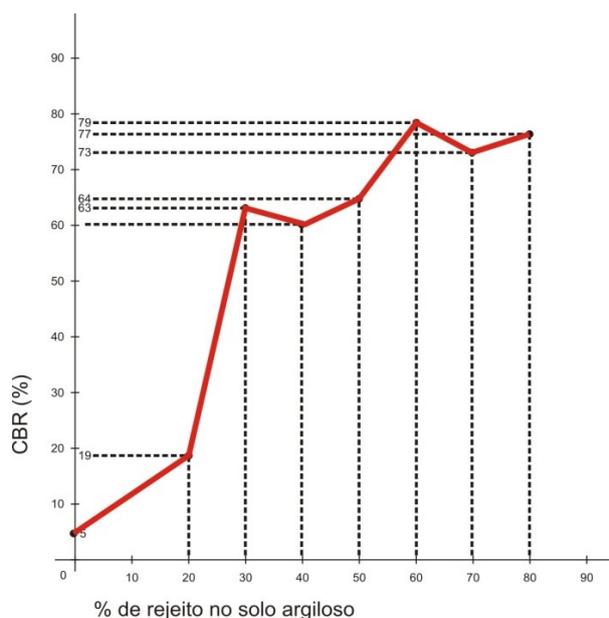


Figura 10 - Efeito do rejeito de caieiras e dos fornos de cal na estabilização do solo mais argiloso.

constituída com o solo argiloso e mesmo teor de resíduo, esse parâmetro foi de 63%. Isto significa que estes índices, mesmo sendo de solos contendo apenas 30% de rejeito de caieira, caracterizam-se em materiais muito bons para o seu emprego na construção de pavimento de estrada ou de obras assemelhadas.

O aproveitamento desses resíduos, além de acarretar um significativo benefício ao meio ambiente, em decorrência da eliminação dos entulhos e da redução da poeira e particulados por eles gerada, além da elevação dos custos de manejo, viria também contribuir em muito para o incremento da resistência dos índices de pavimentação a ser utilizado em estradas, viabilizando e melhorando as condições do tráfego de veículos destas estradas e sua durabilidade e resistência ao longo das intempéries dos anos. A limpeza dos arredores das caieiras proporcionaria também o melhoramento das condições de trabalho dos produtores de cal, que hoje resultam em atividades insalubres.

A pesquisa objeto desta dissertação é considerada inovadora por apontar alternativa no sentido do aproveitamento econômico e racional dos rejeitos de caieiras e de fornos de produção da cal. Diante dos resultados dos ensaios geotécnicos, conclui-se que um solo argiloso com mistura de apenas 20% do rejeito já se constitui em um material terroso de boas características geotécnicas para construção de pavimento de estradas, através de revestimento primário.

Analisando-se os dados revelados pelos ensaios geotécnicos, conclui-se que, ao se incorporar rejeitos de caieiras e de fornos de cal ao solo, este adquire significativas melhorias nas suas propriedades físicas, refletidas não só pelo CBR, mas por outros parâmetros também relevantes, como os índices de expansão, de plasticidade (IP) e de grupo (IG). Os estudos geotécnicos revelaram ainda que um solo argiloso, usualmente imprestável para construção de pavimento, quando misturado ao rejeito de caieira, adquire propriedades físicas que o tornam muito bem adequado para essa finalidade.

11. RECOMENDAÇÕES

Procedendo-se um diagnóstico dos resultados dos trabalhos de pesquisa objeto desta dissertação, verifica-se que a eficácia do uso do rejeito de caieira na estabilização de solo é fato aqui comprovado. No entanto, algumas amostras apresentaram índices geotécnicos que suscitaram dúvidas.

Na preparação das amostras para serem submetidas aos ensaios geotécnicos, é de se esperar que à medida que se fosse aumentando o percentual de rejeito ao solo, este iria adquirindo uma maior consistência, proporcionada pelo efeito estabilizante.

Assim, quanto maior o percentual de rejeito incorporado ao solo, maior deveria ser o seu CBR, de modo a apresentar um crescimento retilíneo deste índice. Porém, com o solo argiloso, principalmente, isto não se configurou.

Embora os resultados da pesquisa não deixem dúvidas quanto à performance do rejeito de caieiras e de fornos de cal na estabilização dos solos, recomenda-se que, em outra oportunidade, as investigações geotécnicas sejam aprofundadas, com o objetivo maior de dirimir as dúvidas acima mencionadas, inclusive em outras áreas de extração de calcários no estado do Ceará, que são muitas, como motivo de comparação.

Para assegurar-se do controle e confiabilidade dos procedimentos dos ensaios geotécnicos utilizados, considera-se necessário que novas amostras sejam investigadas, e que essas amostras sejam compostas com os mesmos tipos de solo e os mesmos percentuais de rejeito que as já analisadas para a região considerada neste trabalho. Ademais, que os ensaios sejam procedidos em pelo menos três réplicas de amostras, com o intuito de que os resultados de cada amostra sejam expressos com base na média dos respectivos índices geotécnicos que venham a ser apurados nessas investigações.

Como uma última colocação, seria recomendável uma avaliação destes rejeitos com análises de difração e fluorescência de raios X, no sentido de poder conhecer bem mais refinadamente a composição destes rejeitos e, suas mais diferentes maneiras de aproveitamento em distintas áreas do conhecimento.

12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ. 2005.

- 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.
- BRASIL/MME. Projeto RADAMBRASIL. Folha SA. 24 Fortaleza; Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação e uso Potencial da Terra. Rio de Janeiro, 1981. 448p.
- 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, 2000.
- COSTA, M. J. et al. Projeto Jaibaras – Relatório Final. DNPM – CPRM. Recife-PE, 1973.
- FALCÃO BAUER, L. A. Materiais de Construção. Vol.1. Editora LTC. Rio de Janeiro, RJ. 1994.
- GUIMARÃES, J.E.P. A Cal - Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil. Associação Brasileira dos Produtores de Cal – São Paulo, 1998, 285p.
- MACHADO, F.P. Aproveitamento de Rejeito de Caieira na Pavimentação de Estrada: Mitigação de Dano Ambiental. Verlag Editora. Novas Edições Acadêmicas. ISBN: 978-3-639-69268-6. OmniScriptum GmbH & Co. KG. Copyright/Copirrait © 2014 OmniScriptum GmbH.& Co. KG. 2014. 64p.
- MACHADO, F.P. Aproveitamento de Rejeito de Caieira na Pavimentação de Estradas Vicinais: Mitigação de Dano Ambiental. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Geologia. Universidade Federal do Ceará. 2011. 60p.
- OLIVER, E.N.; SILVA, A. R. P. Informações e Trabalhos sobre Calcário. Sindicato dos produtores de cal – SINDICAL. São Paulo – SP. 2009. Título da pesquisa disponível em: <http://www.sindical.com.br/informação s.htm>. Acesso em 20/08/2009.
- PEREIRA, R.S.; MACHADO, C.C.; LIMA, de D.C. Compactação de misturas solo-grits para emprego em estradas florestais: influência do tempo decorrido entre mistura e compactação na resistência mecânica. R. Árvore, Viçosa – MG, v.30, n.3, p.421-427, 2006.
- PESSOA, A.C.C. Estudo do Aproveitamento de Rejeito de Caieira (mistura cinza-cal) como Fonte de Nutrientes Vegetais e Corretivo da Acidez do Solo. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Geologia. Universidade Federal do Ceará. 2011. 54p.
- SANTOS, A. R. dos. Obras Simples Devem Recuperar Espaço Nobre na Engenharia. Artigo, p.1. São Paulo – SP, 2008. Título da pesquisa disponível em: <http://noticias.ambiente brasil.com.br/noticia/?d=39261>. Acesso em 30/6/2009.
- SILVA, C.A. Avaliação da Acurácia dos Ortomosaicos e Modelos Digitais do Terreno Gerados por VANT e sua Aplicação no Cálculo de Volume de Pilhas de Rejeito da Pedra Cariri/CE. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Geologia. Universidade Federal do Ceará. 2015. 146p.