



Aproveitamento dos rejeitos das indústrias de calcinação de calcário na porção setentrional do estado do Ceará com foco na reparação de dano ambiental

Antônia de Castro Côrtes Pessoa¹, Francisco Pessoa Machado², Cláudio Ângelo da Silva Neto³, José Antonio Beltrão Sabadia[†], Cynthia Romariz Duarte⁴, César Ulisses Vieira Veríssimo⁴

¹ Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Geologia. Universidade Federal do Ceará. antoniaccpessoa@gmail.com (autor correspondente); ² Companhia de Desenvolvimento do Ceará – CODECE. pessoa-machado@ig.com.br; ³ Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Geologia. Universidade Federal do Ceará. claudioasn@gmail.com; ⁴ Docente do Departamento de Geologia. Universidade Federal do Ceará. cynthia.duarte@ufc.br, verissimo@ufc.br.

Artigo recebido em 17/09/2019 e aceito em 01/03/2020

RESUMO

Os resíduos gerados no processo de calcinação dos calcários formam pilhas que se constituem em fontes de degradação do meio ambiente e obstáculos ao bom andamento das atividades das unidades produtoras. O aproveitamento desses rejeitos pode gerar benefícios ao meio ambiente, bem como melhorias ao trabalho dos operários, além de ser mais uma fonte de renda para as indústrias de calcinação locais. Este estudo foi desenvolvido no sentido do aproveitamento racional e econômico desses materiais residuais na pavimentação de estradas e na construção de obras de aterro que exijam solo estabilizado e, conseqüentemente, de boa consistência. Inicialmente, foram coletados resíduos de três províncias produtoras de cal na porção setentrional no estado do Ceará, sendo uma localizada entre os municípios de Coreaú e Sobral; outra em Forquilha; e uma terceira em Quixeré. As amostras foram misturadas com um solo argiloso, constituindo amostras compostas de solo-rejeito com proporções de resíduo de 0% (zero), 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80%. Ensaios geotécnicos foram realizados para determinação de suas granulometrias e respectivos índices de suporte Califórnia (CBR), de plasticidade (IP) e de grupo (IG). Como resultado, verificou-se aumento da resistência física do solo mediante a incorporação do rejeito nas amostras, constatando que um solo argiloso com características físicas não recomendadas para o uso na construção de estradas poderá se tornar útil para essa finalidade se estabilizado com os resíduos das indústrias de cal, promovendo a reparação de dano ambiental na área das unidades produtoras e uma destinação racional para os rejeitos.

Palavras-chave: pavimentação; mitigação de danos; sustentabilidade ambiental; cal.

Use of tailings from the limestone calcination industries of the state of Ceará with a focus on repair of environmental damage

ABSTRACT

The residues generated in the limestone calcination process form piles sources of degradation of the environment and obstacles to the good progress of the activities of the producing units. The use of these tailings might generate benefits to the environment, as well as improvements to the job of the workers, besides being another source of income for the local calcination industries. This study was developed in the sense of the rational and economic use of these residual materials in the paving of roads and in the construction of landfills that require stabilized soil and, consequently, good consistency. Initially, waste was collected from three producing provinces of lime in Ceará, one of which is located between the municipalities of Coreaú and Sobral; another in Forquilha; and the third in Quixeré. The samples were mixed with a clay soil, consisting of soil-reject samples with residue ratios of 0% (zero), 20, 30, 40, 50, 60, 70 and 80%. Geotechnical tests were performed to determine their granulometry and respective California (CBR), plasticity (IP) and group (IG) indices. As result, soil physical strength increased by incorporating the reject in the samples, noting that a clay soil with physical characteristics not recommended for use in road construction could be useful for this purpose if stabilized with the residues of lime industries, promoting the environmental damage repair in the area of the producing units and a rational destination for the wastes.

Keywords: paving; damage mitigation; environmental sustainability; lime.

Introdução

As indústrias de cal do estado do Ceará utilizam, na sua grande maioria, fornos rudimentares do tipo caieira. Essa atividade se organiza, normalmente, em empreendimentos de forma verticalizada, desde a extração do calcário da fonte de origem, queima do material em fornos, hidratação e beneficiamento (peneiramento) da cal, embalagem e carregamento de caminhões (Silva et al., 2007; Silva et al., 2010).

Essas unidades primitivas de produção de cal geralmente estão instaladas na zona rural ou nas imediações de pequenos núcleos habitacionais, a exemplo das microrregiões do Sertão de Sobral e do Vale do Jaguaribe, no Ceará, contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico de tais áreas, gerando emprego e renda a parte da população (Machado, 2011; Machado, 2014).

No processo de beneficiamento da cal existe um produto residual de aproximadamente 20% do peso bruto. Este rejeito é composto de pedregulhos de calcário, podendo ser também de outras rochas da sucessão estratigráfica, assim como porção de cal que teve sua hidratação retardada. O acúmulo desses resíduos constitui pilhas, atualmente, sem utilidade, ao redor dos fornos de calcinação, que ao longo do tempo atrapalham o bom andamento das atividades de produção e põem em risco o meio ambiente. Durante o período seco, rajadas de vento espalham a poeira de cal pelo ar; enquanto no período chuvoso, as partículas finas são carregadas para rios, riachos e açudes da região, colocando em risco a qualidade das águas e contribuindo para o assoreamento destes corpos hídricos.

O aproveitamento desses resíduos de forma racional, econômica e sustentável, além de contribuir com a limpeza do terreno das unidades produtivas e com a reparação de risco de degradação ao meio ambiente, pode também se constituir em mais uma fonte de renda para os empreendedores desta atividade.

Neste contexto, esta pesquisa tem como objetivo a identificação de alternativa viável para o aproveitamento racional e econômico dos rejeitos das indústrias de cal do estado do Ceará, no intuito maior da preservação do meio ambiente. Foram estudadas três províncias produtoras de cal na porção setentrional no estado do Ceará, sendo uma localizada entre os municípios de Coreaú e Sobral; outra em Forquilha; e a uma terceira em Quixeré.

Referencial Teórico

A cal tem sido utilizada em larga escala pela humanidade desde os primórdios das

civilizações até os dias atuais por ser um dos aglomerantes mais baratos, apesar da tentativa de substituí-la por sais e resinas (Andrade, 2012). Pela multiplicidade de suas aplicações, a cal virgem ou hidratada está entre os dez produtos de origem mineral de maior consumo mundial. O produto ganha ainda maior expressão quando se conhece o amplo leque de setores industriais e sociais que dele se utilizam, graças à sua dupla capacidade de agir como reagente químico e aglomerante ou ligante (Silva, 2009).

Andrade (2012) explica que a cal virgem é obtida pela calcinação dos calcários, podendo ser dos tipos calcítico (CaCO_3) ou dolomítico (MgCO_3), através da reação química de decomposição térmica em fornos que utilizam como energia a queima de madeira. Durante este processo, o interior dos fornos atinge temperaturas de até 900°C . A calcinação se baseia na reação: calcário (CaCO_3) + calor \rightarrow cal virgem ($\text{CaO} + \text{CO}_2$) (Sampaio e Almeida, 2005).

Segundo Pontes *et al.* (2013), embora a mineração seja uma atividade econômica importante para o desenvolvimento da sociedade, seus efeitos e consequências devem ser analisados de forma detalhada, ressaltando o bem-estar socioambiental, sendo necessária a adoção de mecanismos que possibilitem a mitigação de impactos negativos. Araújo *et al.* (2014) reforçam que a indústria extrativista mineral está entre as atividades antrópicas que mais causam impactos socioeconômicos e ambientais negativos, afetando, portanto, o território onde se realiza a mineração.

Conforme Moura *et al.* (2002), atualmente, grande parte da atividade de extração mineral é fonte geradora de resíduos, na forma de gases, líquidos e sólidos, causando degradação ambiental e dificultando um desenvolvimento sustentável. Araújo *et al.* (2014) destacam que a mineração altera de forma substancial o meio físico, gerando desmatamentos, erosão, contaminação dos corpos hídricos, aumento da dispersão de metais pesados, alterações da paisagem e do solo, além de comprometer a fauna e a flora, afetando a qualidade de vida das populações estabelecidas na área minerada e em seu entorno.

Menezes *et al.* (2002) indicam que a pesquisa sobre a reciclagem de resíduos vem sendo intensificada em diversas partes do mundo, sendo vista pela iniciativa privada como um mercado altamente rentável, além de contribuir com a preservação dos recursos naturais, prolongando sua vida útil e reduzindo a destruição da paisagem, fauna e flora. Em complemento, Silva *et al.* (2008) indicam que os resíduos da mineração estão sendo largamente estudados em virtude do grande potencial que possuem como matérias-primas, e

pelo grande impacto ambiental provocado, quando estes resíduos são descartados indiscriminadamente na natureza.

De acordo a avaliação de Ângulo *et al.* (2003), comparativamente a países do primeiro mundo, a reciclagem de resíduos no Brasil como materiais de construção é ainda tímida, com exceção da intensa reciclagem praticada pelas indústrias de cimento e de aço. Outros materiais potencialmente recicláveis são os rejeitos oriundos de mármore e corte de rochas ornamentais, empregados na correção de acidez e remineralização de solos (Pontes *et al.*, 2013). Somam-se a este contexto os rejeitos de calcários que são utilizados na formulação de argamassa (Silva *et al.*, 2008).

Barreto (2001) cita alguns pontos relevantes sobre sustentabilidade, como: buscar atenuar e prevenir a degradação ambiental; reduzir a geração de resíduos e rejeitos; e reaproveitar ao máximo os rejeitos primários, reciclando e reutilizando novamente na produção ou buscando um novo uso para eles. Neste sentido, Rodrigues (2015) reforça que a utilização de um material que é acumulado continuamente nas proximidades das áreas de extração e beneficiamento, além do possível aproveitamento econômico, proporciona benefícios ao meio ambiente.

Vidal *et al.* (2008) indicam que rejeitos gerados na exploração de calcários têm emprego em aterros, na melhoria das estradas vicinais no período chuvosos e na composição de cimento. Neste contexto, Santos (2008) ressalta que a rede brasileira de estradas de rodagem alcança um total de 1.800.000 quilômetros, dos quais cerca de 1.600.000 correspondem a estradas vicinais e rurais de terra. Grande parte de nossa produção agrícola e agroindustrial ainda é escoada por estradas de terra.

Brito e Paranhos (2017) mostram que existe a possibilidade de que um solo local utilizado para a construção de estradas não apresente propriedades necessárias para suportar os esforços exigidos pelo tráfego de veículos, sendo necessária à sua correção. Neste contexto, Ta'Negonbadi *et al.* (2017) cita a estabilização de solos como um método econômico e duradouro para o incremento de propriedades geotécnicas relacionadas à capacidade de rolamento. A estabilização de solos tende a maximizar o seu uso para esta finalidade, podendo ser realizada por métodos mecânicos ou químicos, como a compactação, a correção granulométrica e a adição de estabilizantes químicos (Brito e Paranhos., 2017; Mousavi *et al.*, 2017).

Rezende (2003) relata que entre os materiais alternativos que podem ser aplicados em base e sub-base de pavimentos estão os solos

estabilizados quimicamente para proporcionar a melhoria de suas propriedades físicas. O aproveitamento destes materiais, além de promover a redução, ou mesmo a reparação dos danos ambientais, possibilita a execução de pavimento de baixo custo e de desempenho satisfatório. A estabilização química pode ser realizada com vários aditivos, como a cal, o cimento e emulsões betuminosas, além de resíduos industriais (Brito e Paranhos, 2017).

Rezende (2003) aponta que a estabilização química de um solo ocorre devido à reação da cal com um solo de granulometria média a fina. Isto proporciona mudanças na plasticidade e expansão do solo, bem como aumento na sua trabalhabilidade e na resistência ao cisalhamento (Lima *et al.*, 1993). Logo, o ganho na capacidade de suporte do solo se torna um dos principais efeitos da estabilização. Quando a cal é misturada ao solo, ocorrem variadas reações químicas simultaneamente, destacando-se a troca catiônica, floculação, carbonatação e reações de sedimentação (Herrin e Mitchel, 1961).

A adição de um percentual significativo de cal ao solo provoca aumento na solubilidade da sílica e da alumina e elevação do pH das misturas. Quando a cal é adicionada a um solo, uma troca de cátions ocorre com o cálcio da cal, substituindo os cátions trocáveis (K, Mg e H) na superfície do argilomineral. Reações pozolânicas também 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. A troca de cátions, floculação e aglomeração são as reações responsáveis pela mudança na plasticidade, contração e trabalhabilidade do solo, enquanto a reação pozolânica é responsável pelo aumento da sua resistência (Silva, 2007; Vizcarra, 2010; Szeliga, 2014).

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 e Forquilha, onde muitas famílias vivem da extração de calcário e produção de cal, predominantemente realizada de forma ainda bastante rudimentar, utilizando-se de fornos do tipo caieira. Em complemento, Machado *et al.* (2015) ressaltam que o aproveitamento de rejeitos de caieiras contribui para a melhora significativa da resistência dos índices de pavimentação de estradas e mitigação de dano ambiental.

Áreas em Estudo

Área 1 – Sobral/Coreaú

Esta área é uma das províncias produtoras de cal escolhida para realização da coleta das amostras de rejeito. Localiza-se na porção norte do Ceará, a oeste da capital Fortaleza, entre os municípios de Coreaú e Sobral, ao longo da CE-364, onde se situam as comunidades de Aroeiras e Pedra de Fogo (Figura 1).

Esta área está inserida geotectonicamente na Região de Dobramentos do Médio Coreaú, um cinturão orogênico que engloba variada gama de litotipos, com distintas idades e origens, reunidos em uma mesma unidade. Esta unidade, juntamente com o Maciço de Granja, ocupa toda a porção do extremo noroeste do Ceará, situada a norte do lineamento Sobral- Pedro II (Torquato & Nogueira Neto, 1996). Geologicamente, a área está inserida nos domínios litológicos do Grupo Ubajara, datado do Neoproterozóico (Cavalcante *et al.*, 2003) (Figura 2).

A Formação Frecheirinha, fonte do calcário extraído para a produção de cal, é composta por metacalcários calcíticos e dolomíticos de cor cinza escura a cinza azulada, de granulação fina, puros ou com variações impuras, com intercalações eventuais de delgados leitos de margas, metassiltitos e quartzitos escuros. Comumente se apresentam recortados por veios de calcita. A Formação Coreaú está sobreposta à Formação Frecheirinha, constituída de arenitos arcoseanos finos, bem classificados, apresentando colorações creme a cinza-claro, com raras tonalidades ferruginosas e de grauvacas cinza-esverdeada, com variações para tipos líticos e conglomeráticos (Cavalcante *et al.*, 2003; Silva Junior *et al.*, 2014).

Área 2 – Forquilha

Trata-se de uma área localizada também no norte do Ceará. É compreendida pelas localidades ou comunidades de Pocinhos, Ingá e Olho d'Água dos Cassimiros, situadas na porção sudeste da sede do município de Forquilha (Figura 3).

Os calcários utilizados para produção de cal desta área estão inseridos geologicamente no Complexo Ceará, abrangendo as unidades Independência e Canindé (Figura 4). Estas unidades apresentam uma grande variação de litotipos, compreendendo mármores magnesianos que apresentam estrutura bandada, coloração variando de cinza a esbranquiçada e textura sacaroidal (Cavalcante *et al.*, 2003).

Área 3 – Quixeré

Trata-se de uma área produtora de cal situada na localidade de Lagoinha, no município de Quixeré (CE), na região do Baixo Jaguaribe, compreendendo os domínios da Chapada do Apodi. (Figura 5).

Quixeré está localizada na borda oeste da bacia Potiguar, onde existe a ocorrência de litotipos do Grupo Apodi. Na localidade de Lagoinha é extraído o calcário correspondente à Formação Jandaíra – utilizado para produção de cal hidratada – que é composta por calcários intercalados por margas, siltitos e folhelhos. Também ocorre no município a Formação Açú, sotoposta à Formação Jandaíra, composta de arenitos com intercalações de siltitos, folhelhos e lentes de calcário (Figura 6).

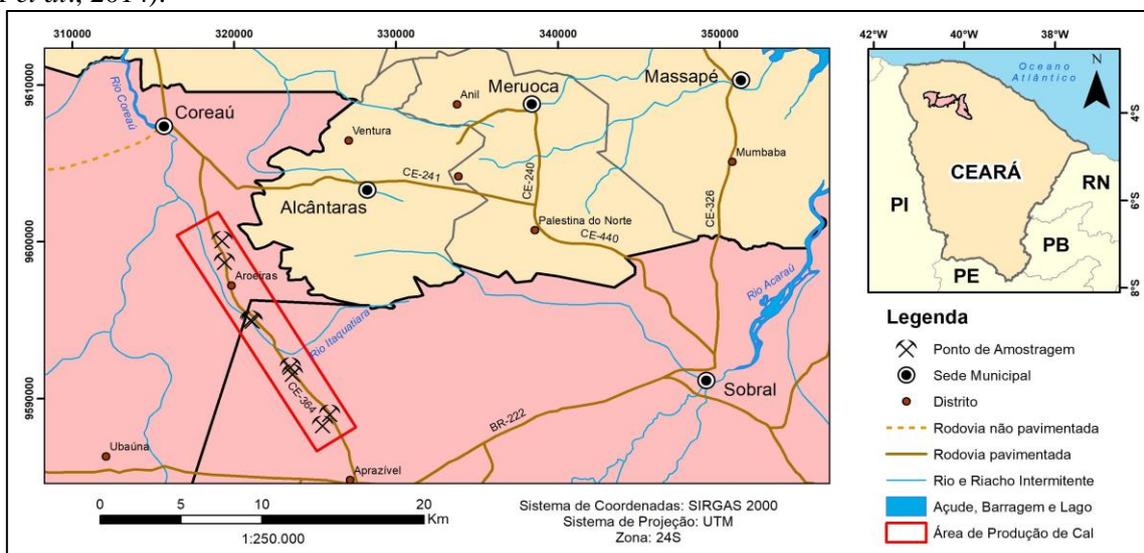


Figura 1. Mapa de localização da área de pesquisa entre Sobral e Coreaú (CE).

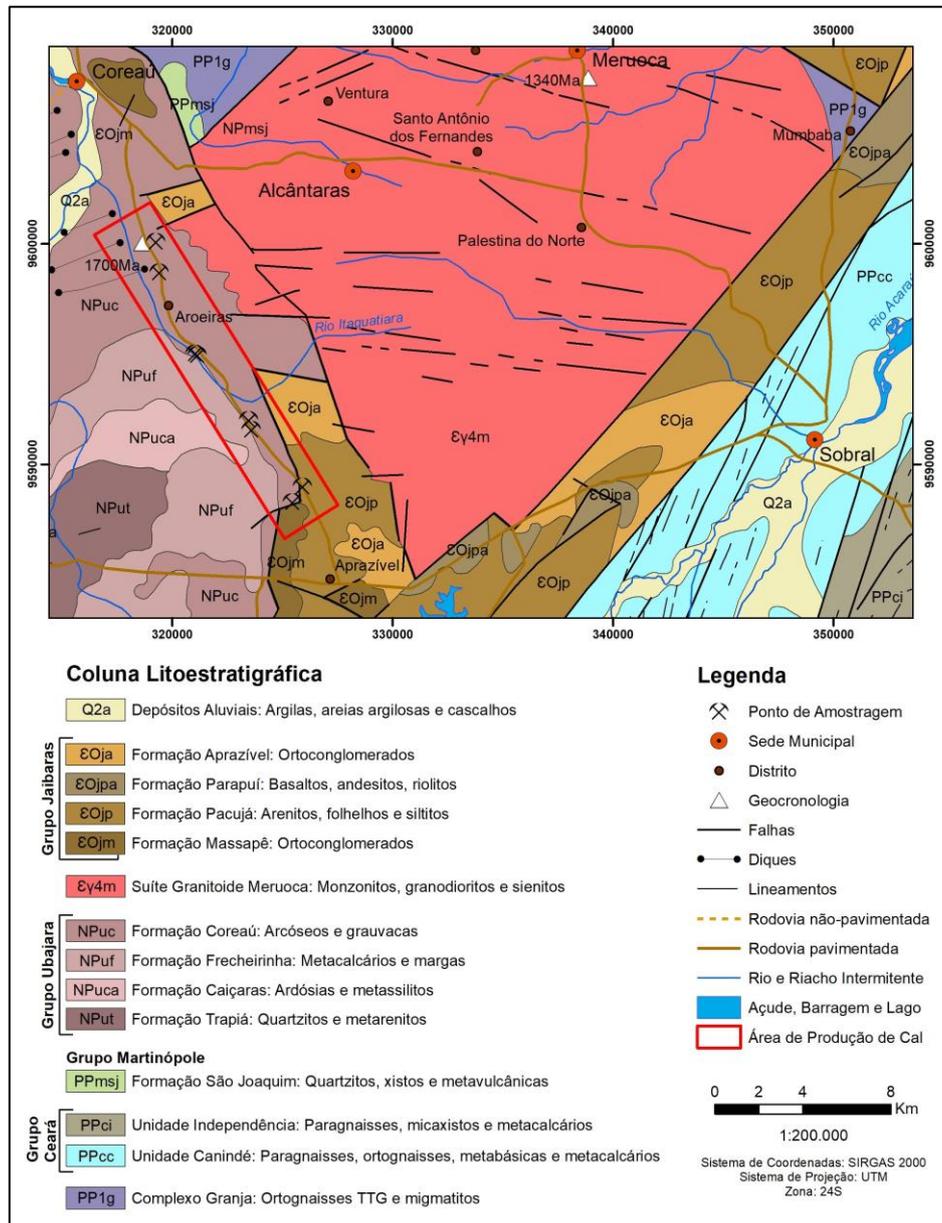


Figura 2. Mapa geológico da área de pesquisa entre Sobral e Coreau (CE). Adaptado de Cavalcante *et al.* (2003) – Escala original 1:500.000.

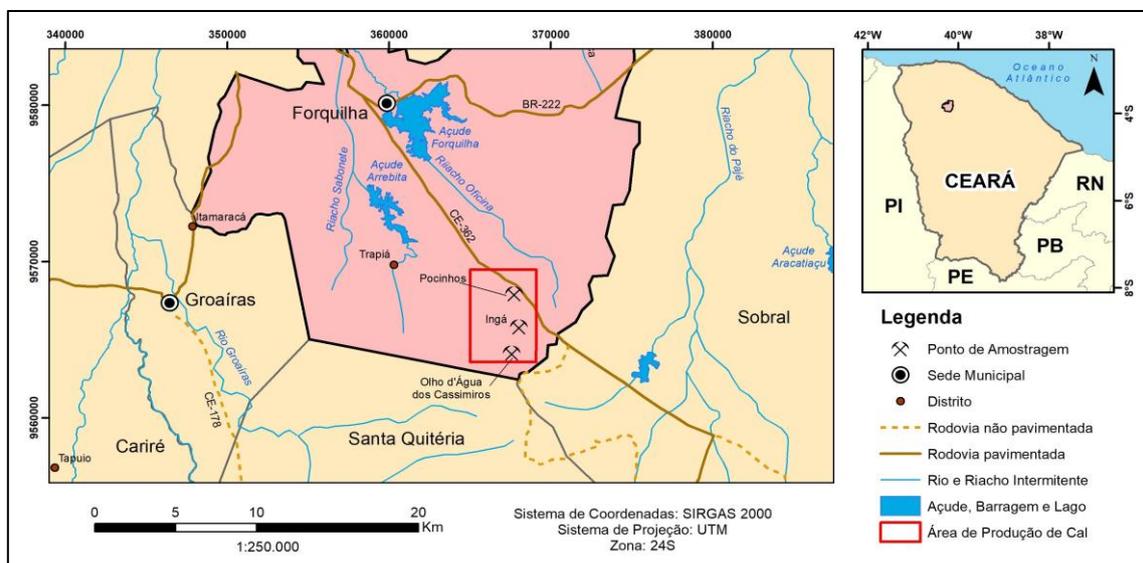


Figura 3. Mapa de localização da área de pesquisa em Forquilha (CE).

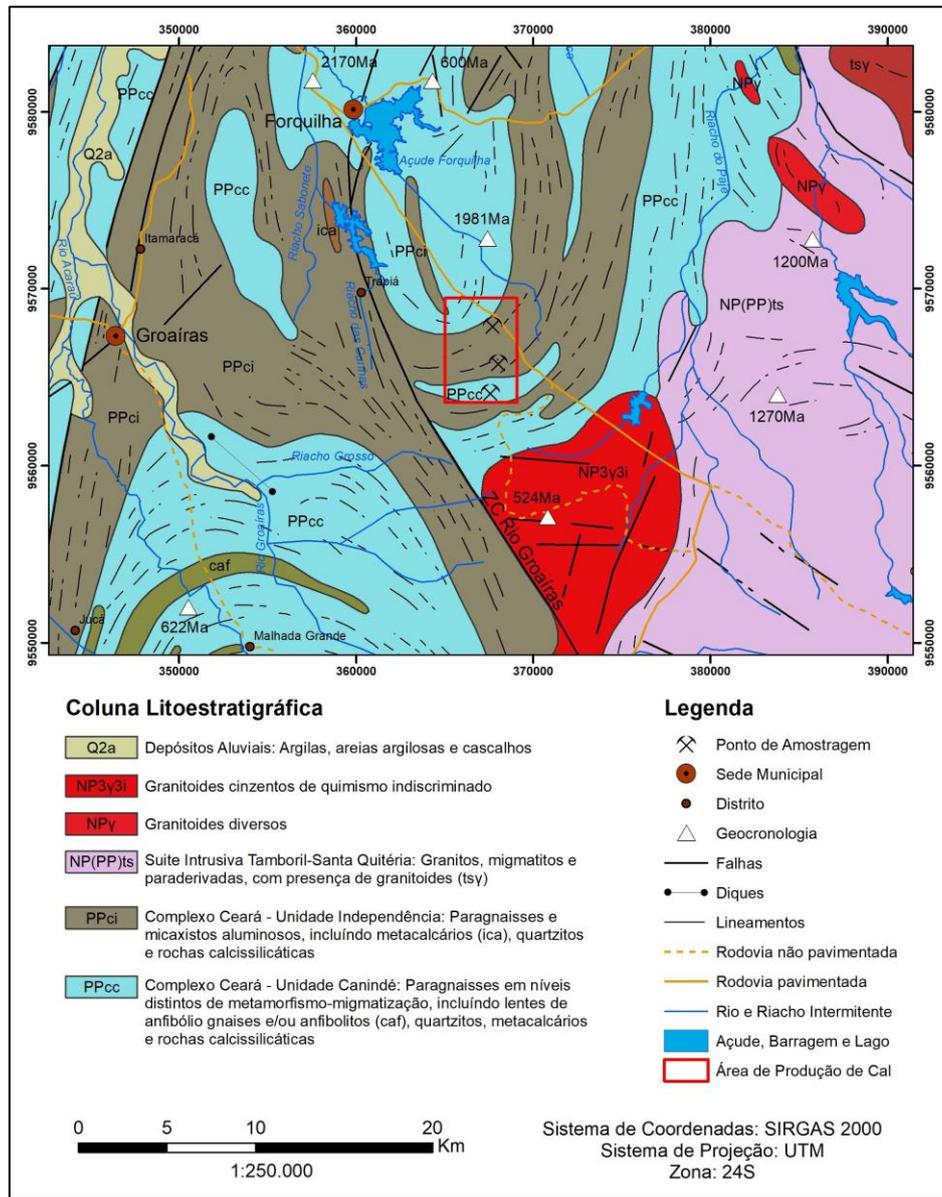


Figura 4. Mapa geológico da área de pesquisa em Forquilha (CE). Adaptado de Cavalcante *et al.* (2003) – Escala original 1:500.000.

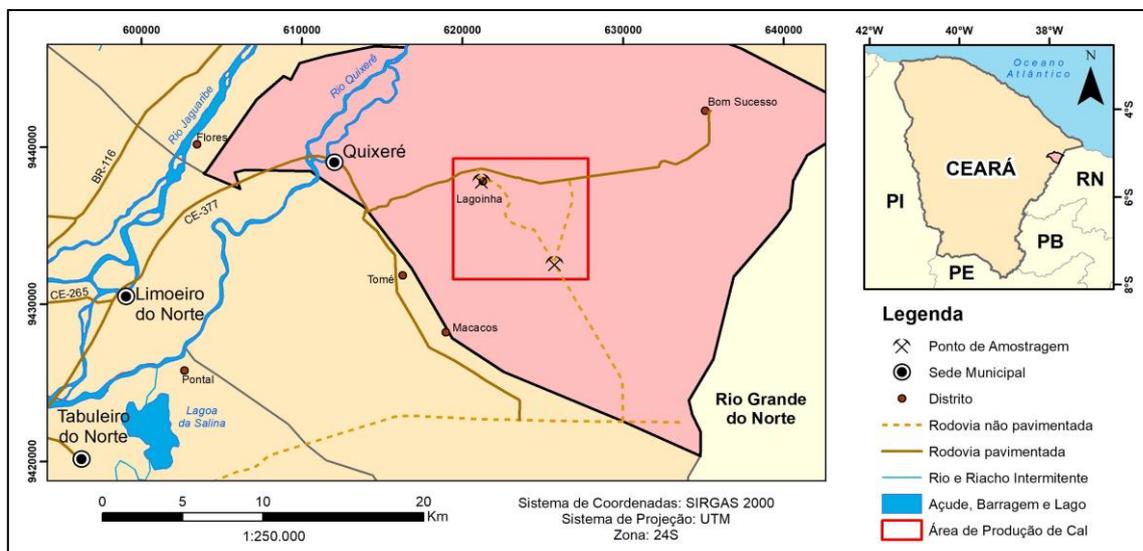


Figura 5. Mapa de localização da área de pesquisa em Quixeré (CE).

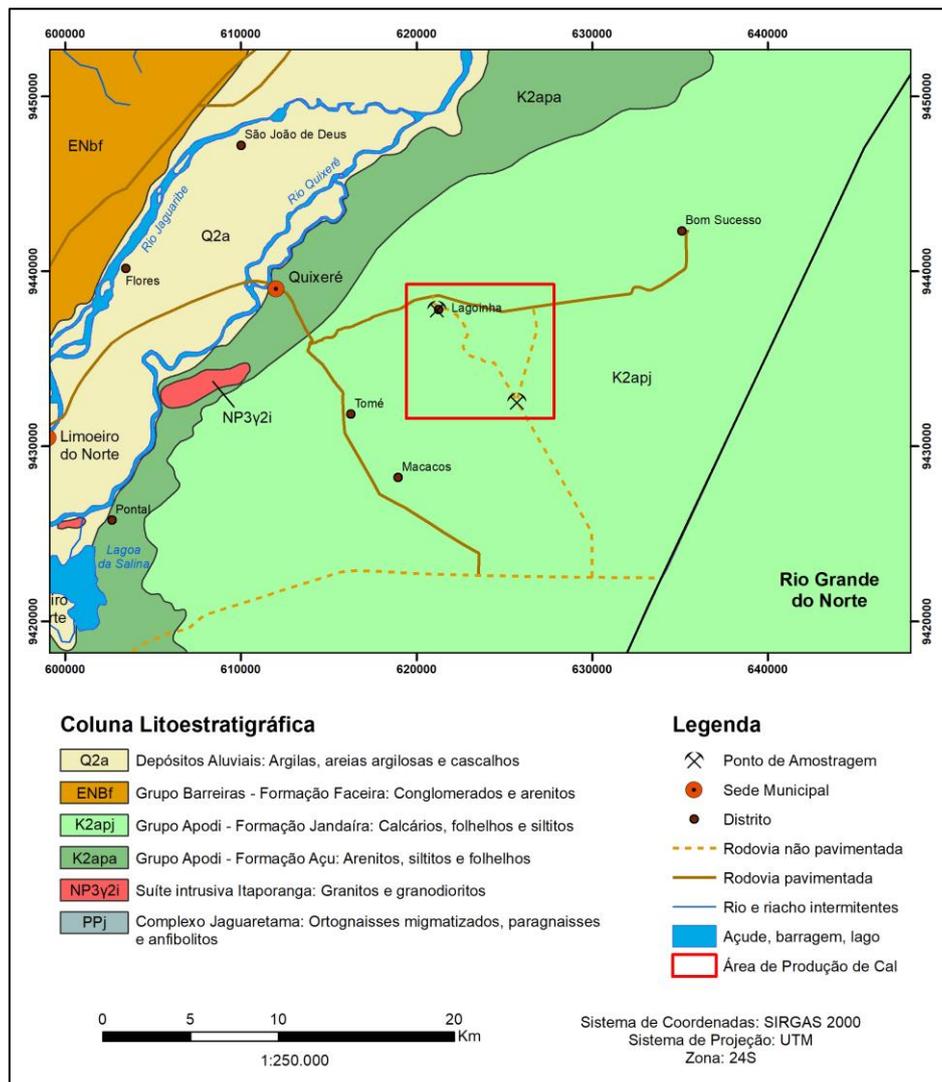


Figura 6. Mapa geológico da área de pesquisa em Quixeré (CE). Adaptado de Cavalcante *et al.* (2003) – Escala original 1:500.000.

Materiais e Métodos

O trabalho consistiu, inicialmente, na coleta de amostras de rejeito em cada área em estudo, bem como amostras de solo, a fim de comporem amostras de solo-rejeito, adotando-se diferentes dosagens do rejeito, para serem submetidas a ensaios de caracterização geotécnica de laboratório (Figura 7).

Em cada uma das áreas em estudo foram coletadas oito amostras de rejeito, cada uma pesando cerca de 18 kg, totalizando 24 amostras. Também foram coletadas amostras de solo arenosilto-argiloso, pesando cerca de 90 kg. As amostras de rejeito em cada área de pesquisa foram misturadas manualmente, de modo a comporem uma única amostra homogênea para cada área. Em seguida, partes deste material foram adicionadas a porções da amostra de solo, formando um conjunto de amostras de solo-rejeito, cada uma pesando cerca de 18 kg nos percentuais em rejeito de 0

(zero), 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80%, dos materiais secos ao meio ambiente.

Objetivando a realização dos ensaios geotécnicos, foram preparados três conjuntos de amostras de solo-rejeito, cada um com oito amostras, nas proporções citadas anteriormente. Após esta preparação, as amostras foram submetidas a ensaios geotécnicos de laboratório, para determinação dos seguintes índices: Granulometria; Limite de Liquidez (LL); Índice de Plasticidade (IP); Índice de Grupo (IG); Umidade Ótima (*hot*); Densidade Máxima (*dmáx.*); Expansão; Grupo HRB (*Highway Research Board*); e Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ratio* (CBR).

Todos os ensaios geotécnicos foram executados no laboratório de solos do Departamento de Edificações e Rodovias do Governo do Estado do Ceará (DER/CE).

No intuito de tornar mais compreensível o diagnóstico dos resultados dos ensaios geotécnicos a que foram submetidas as amostras de solo-rejeito,

apresentam-se a seguir as definições dos índices considerados parâmetros determinantes na caracterização de um material terroso de emprego na construção de pavimento de estradas, bem como de obras similares. Esses índices são os de suporte Califórnia (ISC / CBR), expansão, de plasticidade (IP), e o de grupo (IG).

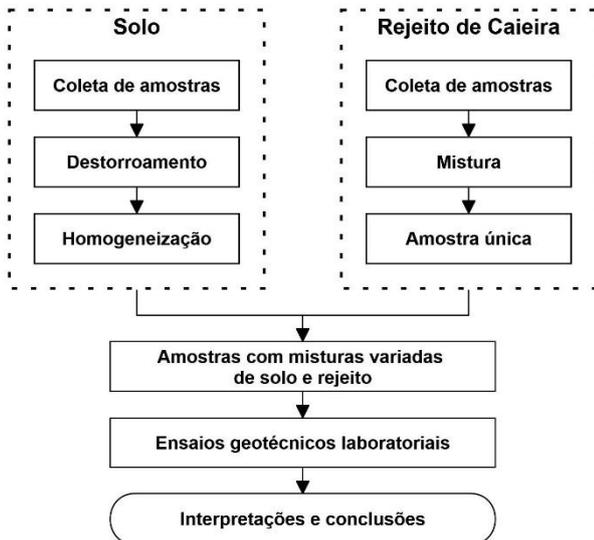


Figura 7. Fluxograma da metodologia empregada na dinâmica das coletas e composição das amostras e envio para laboratório de ensaios geotécnicos. Adaptado de Machado *et al.* (2015)

O Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) define a relação, em porcentagem, 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 (ABNT, 1987). Através do ensaio CBR é possível conhecer 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.

Para determinação da resistência mecânica das misturas solo-rejeito, foi utilizado o ensaio CBR normatizado pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - DNER, que atualmente é o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT (ABNT, 1994).

Segundo o Departamento de Edificações e Rodovias do Governo do Estado do Ceará (DER/CE, 2005), é considerado aceitável para construção de uma base de pavimento um solo com CBR a partir de 25%, com a aplicação da energia intermediária, enquanto para construção de Revestimento Primário, um solo com CBR a partir

18% já é considerado de qualidade satisfatória, embora recomende um valor a partir de 20%. Revestimento Primário é uma 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.

A Compactação é um método de estabilização de solo que se dá pela aplicação de alguma forma de energia (impacto, vibração, compressão estática ou dinâmica). Seu efeito confere ao solo um aumento de seu peso específico e da sua resistência ao cisalhamento, assim como uma diminuição dos índices de vazios, permeabilidade e compressibilidade (ABNT, 1968). Através do ensaio de compactação é possível obter 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.

O Índice de Expansão 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 imersa em recipiente com 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) de um solo é definido pela diferença entre o Limite de Liquidez – LL (ABNT, 1984) e o Limite de Plasticidade – LP (ABNT, 1984). Ele fornece um critério para caracterizar o caráter argiloso de um solo, sendo máximo para as argilas e mínimo ou nulo para as areias. Ou seja, quanto maior o IP, mais plástico é o solo.

Representado por um número inteiro, que varia de 0 a 20, o Índice de grupo (IG) define a capacidade de suporte do terreno da fundação de um pavimento. 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.

Resultados e Discussões

Analisando-se comparativamente os dados de laboratório foi constatado que ao misturar o rejeito de caieira ao solo, este último adquiriu, em geral, uma maior resistência física, medida pelo Índice de Suporte Califórnia (CBR). Isso ocorre devido à estabilização química proporcionada pela incorporação do rejeito (Tabelas 1, 2 e 3). Estes resultados reforçam as conclusões de Machado *et al.* (2015), que em abordagem similar destacaram a performance do rejeito de caieiras e de fornos de cal no município de Sobral na estabilização de solos. A expansão deste estudo para outras áreas de extração de calcários no estado do Ceará apresentou melhoria dos parâmetros geotécnicos das amostras provenientes de diferentes contextos geológicos, permitindo uma comparação preliminar entre elas.

Esperava-se que a adição de rejeito na composição das amostras proporcionasse um

aumento crescente e contínuo no índice CBR das misturas, porém algumas variações foram constatadas, como no caso das amostras do lote 1 (Coreaú/Sobral), onde a amostra 4 (com 40% de rejeito) teve CBR de 55% e a amostra 5 (com 50% de rejeito) apresentou CBR menor, de 52%. A amostra 6 (com 60% de rejeito) apresentou CBR ainda menor que as anteriores (47%), enquanto as duas últimas (amostras 7 e 8) já apresentaram valores maiores, pois a amostra 7 (com 70% de rejeito) apresentou índice de 71%, e o da amostra 8 (com 80% de rejeito) foi de 55%. Este fato também ocorreu de maneira similar com os lotes 2 e 3. Apesar destas variações, observou-se a tendência linear crescente dos valores dos parâmetros geotécnicos entre as amostras ensaiadas, confirmando a propensão geral de que, quanto maior o percentual de rejeito participante da mistura, maior o seu CBR (Figuras 8, 9 e 10).

Tabela 1. Caracterização geotécnica de amostras compostas de rejeito + de solo argiloso referente à área de Coreaú / Sobral.

L1AM	Solo (%)	Rejeito (%)	CBR (%)	Exp (%)	LL	IP	IG
1	100	0	5	2,78	31	11	4
2	80	20	24	0,3	NL*	NP*	2
3	70	30	39	1,83	NL*	NP*	0
4	60	40	55	0,09	NL*	NP*	0
5	50	50	52	0	NL*	NP*	0
6	40	60	47	0,09	NL*	NP*	0
7	30	70	71	0,17	NL*	NP*	0
8	20	80	55	0,17	NL*	NP*	0

CBR: Índice de Suporte Califórnia

Exp: Expansão

LL: Limite de Liquidez

IP: Índice de Plasticidade

IG: Índice de Grupo

*NL: Não-líquido

*NP: Não-plástico

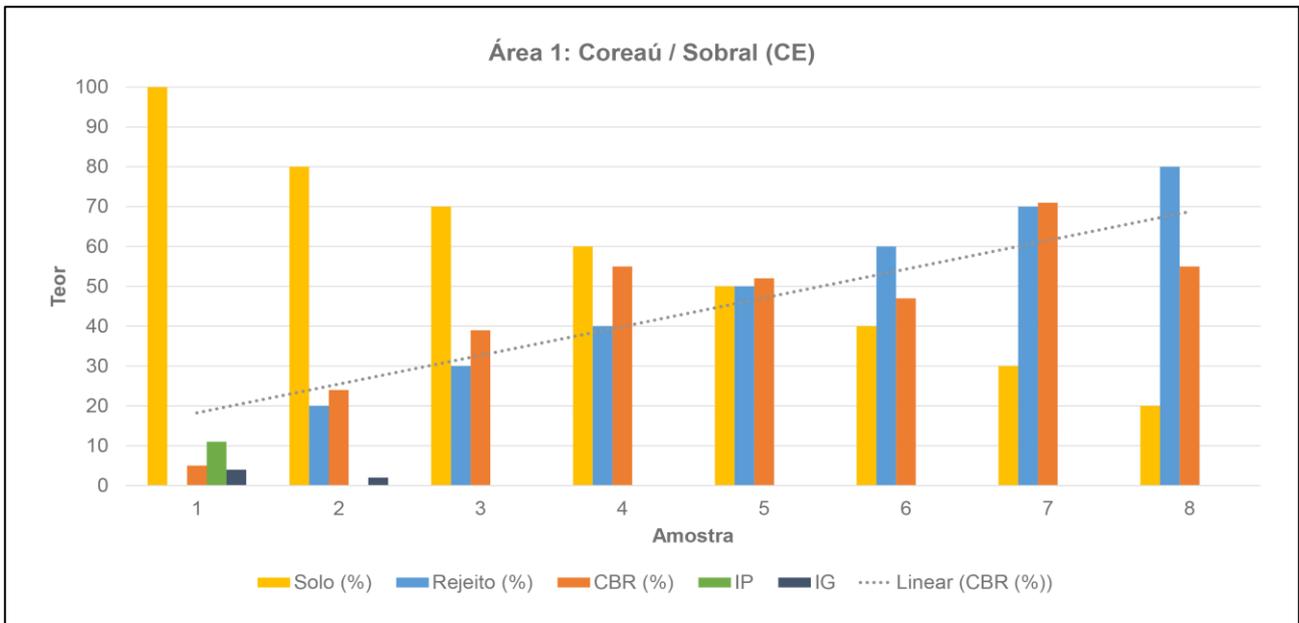


Figura 8. Efeito do rejeito de cal hidratada na estabilização de um solo argiloso, refletida pelo CBR, concernente à área de Coreaú / Sobral (L1).

Tabela 2. Caracterização geotécnica de amostras compostas de rejeito + de solo argiloso referente à área de Forquilha.

L2AM	Solo (%)	Rejeito (%)	CBR (%)	Exp (%)	LL	IP	IG
1	100	0	4	4,09	38	19	2
2	80	20	28	2,35	39	14	1
3	70	30	24	1,57	34	12	0
4	60	40	26	1,48	35	10	0
5	50	50	30	0,83	34	9	0
6	40	60	45	0,7	35	8	0
7	30	70	53	0,61	39	9	1
8	20	80	48	1,39	36	8	0

CBR: Índice de Suporte Califórnia
Exp: Expansão

LL: Limite de Liquidez
IP: Índice de Plasticidade

IG: Índice de Grupo

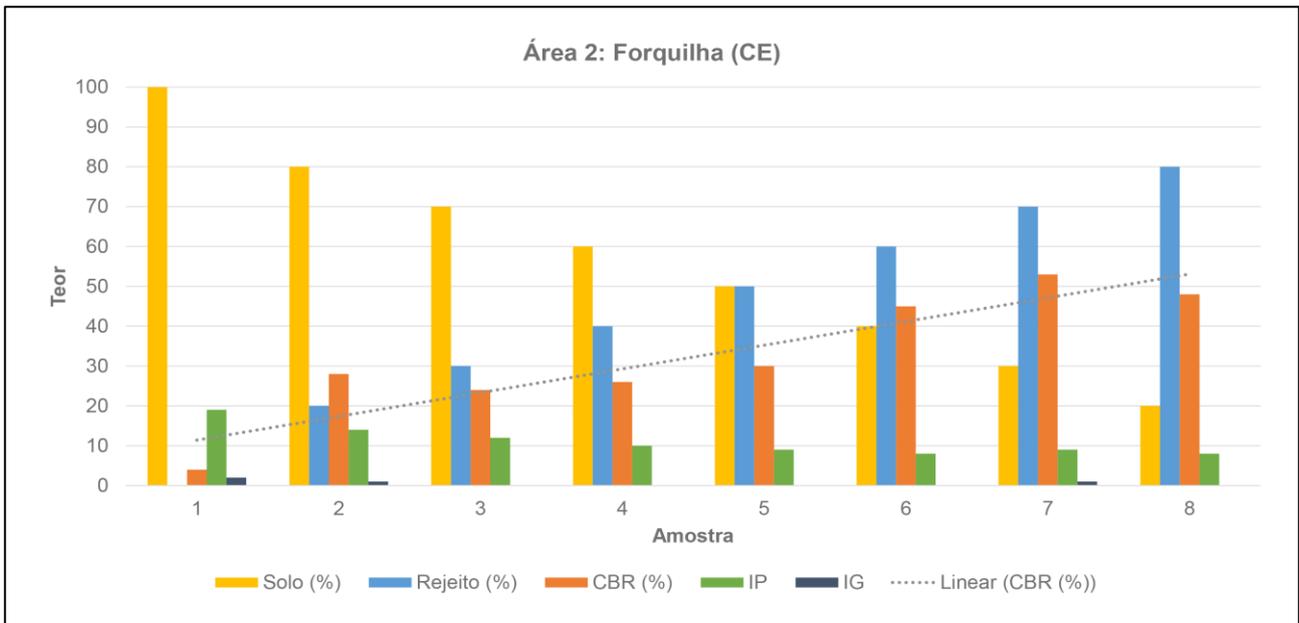


Figura 9. Efeito do rejeito de cal hidratada na estabilização de um solo argiloso, refletida pelo CBR da área de Forquilha (L2).

Tabela 3. Caracterização geotécnica de amostras compostas de rejeito + de solo argiloso referente à área de Quixeré.

L3AM	Solo (%)	Rejeito (%)	CBR (%)	Exp (%)	LL	IP	IG
1	100	0	4	0,17	29	13	2
2	80	20	27	0	NL*	7	1
3	70	30	38	0	NL*	2	0
4	60	40	31	0	NL*	NP*	0
5	50	50	30	0	NL*	NP*	0
6	40	60	42	0,9	NL*	NP*	0
7	30	70	57	0	NL*	NP*	1
8	20	80	54	0	NL*	NP*	0

CBR: Índice de Suporte Califórnia
 Exp: Expansão
 LL: Limite de Liquidez

IP: Índice de Plasticidade
 IG: Índice de Grupo

*NL: Não-líquido
 *NP: Não-plástico

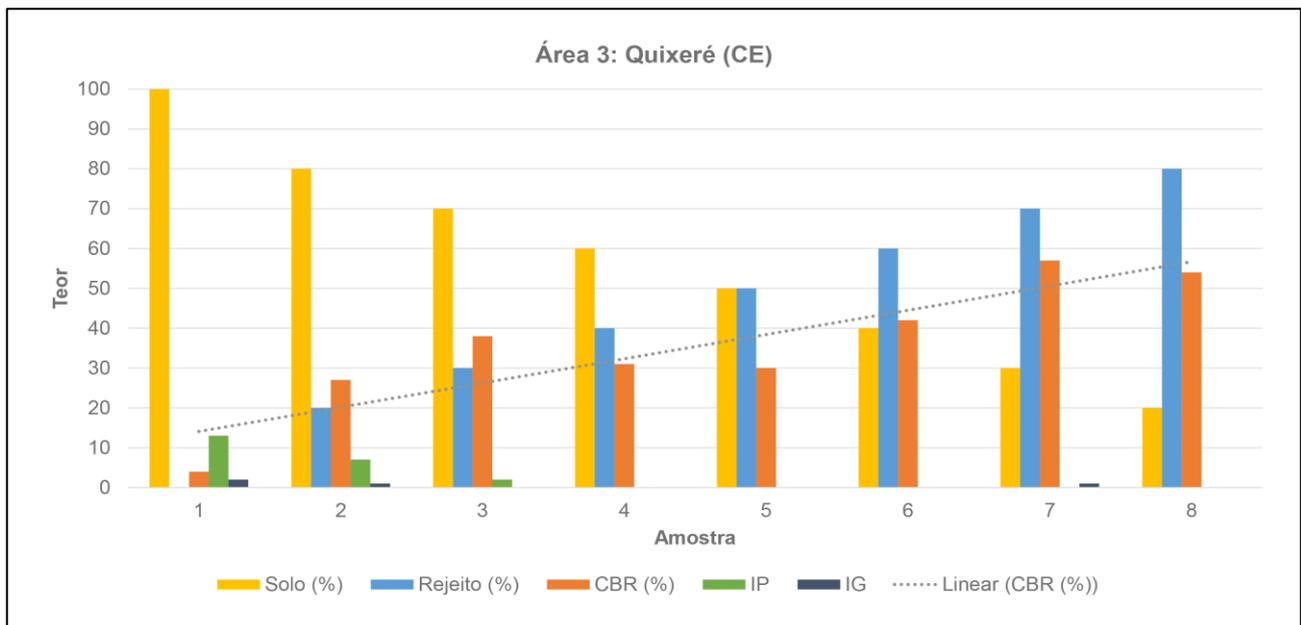


Figura 10. Efeito do rejeito de cal hidratada na estabilização de um solo argiloso, refletida pelo CBR da área de Quixeré (L3).

Comparando-se os resultados dos ensaios geotécnicos de todos os lotes (L1, L2 e L3), as amostras com adição de 20% de rejeito apresentaram índices CBR de 24%, 28% e 27%, respectivamente, valores já considerados acima do mínimo aceitável para construção de pavimentos do tipo revestimento primário. A adição de 40% de rejeito evidenciou uma variação nos valores de CBR para 55%, 40% e 31%, respectivamente, indicando que as misturas nestes teores já podem ser aproveitadas para a construção de uma base de pavimento.

Os índices de Expansão registrados também refletiram o efeito estabilizante do rejeito quando incorporado 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 decrescendo, configurando o processo de estabilização do solo.

A redução do Índice de Plasticidade (IP) também corroborou com as conclusões sobre o efeito estabilizante do rejeito. Nos lotes L1, L2 e L3, as amostras 1, compostas apenas de solo, foram obtidos valores de IP de 11%, 19% e 13%, respectivamente. Já as amostras 2, que contaram com adição de 20% de rejeito, influenciou a queda do IP em todos os lotes, passando para 0%, 13% e 7%, respectivamente.

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 suas variadas dosagens, este índice apresentou uma significativa redução nos

seus valores, tendo-se como parâmetro a amostra 1 de todos os lotes, compostas somente de solo.

Tais resultados confirmam as conclusões de trabalhos prévios (Brito e Paranhos, 2017; Choobasti *et al.*, 2017), onde atestou-se que efeitos como o aumento do limite de plasticidade (LP) e diminuição do limite de liquidez (LL) seriam esperados mediante a adição de cal ao solo.

Conclusões

Ao avaliar os resultados dos ensaios geotécnicos, concluiu-se que o rejeito, ao ser incorporado ao solo para composição das amostras solo-rejeito, contribuiu com 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 pelo Índice de Grupo (IG).

As melhorias dos parâmetros geotécnicos do solo a partir da incorporação dos rejeitos de caieiras permitiram analisar as viabilidades técnica e econômica dos resíduos, constatando sua adequação para construção ou recuperação de vias especialmente localizadas a pouca distância da fonte de sua produção, visando reduzir custos com transporte. Como muitas destas estradas têm pouco movimento de veículos, a sua pavimentação pode ser feita com revestimento primário, popularmente conhecido como “empiçarramento”, que possui relativamente baixo custo operacional.

Neste contexto, um solo com caráter mais argiloso, que é o material mais comum nas estradas que apresentam maior frequência de problemas

críticos de trafegabilidade, pode ser beneficiado, através da estabilização com rejeito de cal hidratada, adquirindo propriedades físicas mais adequadas na construção de pavimento de rodovia com revestimento primário.

A variação do índice CBR entre as amostras – bem como entre os lotes – pode refletir mudanças químicas da rocha-fonte dos resíduos. Conforme as figuras 2, 4 e 6 é possível visualizar que calcários/mármoreos de cada uma das três áreas possuem gêneses relacionadas a contextos geológicos diferentes. Portanto, a variação do ambiente de geração destes materiais pode estar sendo refletida nas alterações percebidas entre o CBR das amostras. Desta forma, recomenda-se um estudo mais aprofundado na química mineral destes materiais, a fim de compreender suas variações composicionais que podem, conseqüentemente, se refletir em destinações diferenciadas para cada tipo de rejeito.

Por fim, conclui-se que os rejeitos das indústrias de cal dos municípios de Coreaú / Sobral; de Forquilha; e de Quixeré podem ter uma destinação racional, reduzindo seu risco de dano ambiental e proporcionando às estradas locais melhores condições de trafegabilidade e durabilidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará pela estrutura fornecida para a realização deste trabalho, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de pesquisa.

Referências

Araújo, E. R., Olivieri, R. D., Fernandes, F. R. C., 2014. Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente. CETEM/MCTI.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1968. Solo: Ensaio de Compactação. NBR 7182. Rio de Janeiro. 10p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984. Solo: Determinação do Limite de Liquidez. NBR 6459. Rio de Janeiro. 6p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984. Solo: Determinação do Limite de Plasticidade. NBR 7180. Rio de Janeiro. 3p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987. Solo: Índice Suporte Califórnia. NBR 9895. Rio de Janeiro. 14p.

Andrade, C., 2012. Materiais para Construção Civil a Base de Cinzas de Madeira, Lodo de ETA e Resíduos da Produção de Cal. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Dissertação de Mestrado. 56p.

Ângulo, S.C., Zordan, S.E., John, V.M., 2003. Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil. *In: IV SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL - MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES.* São Paulo.

Barreto, M.L., 2001. Ensaio sobre a Sustentabilidade da Mineração no Brasil. Rio de Janeiro, CETEM/MCT. 130p.

Brito, L.C., Paranhos, H.S., 2017. Estabilização de Solos. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento.* 6(1): 425-438

Cavalcante, J.C., Vasconcelos, A.M., Medeiros, M.D.F., Paiva, I.G., Gomes, F.E.M., Cavalcante, S.N., Cavalcante, J.E., Melo, A.C.R., Duarte Neto, V.C., Benevides, H.C., 2003. Mapa geológico do Estado do Ceará – Escala 1:500.000. Fortaleza, Ministério das Minas e Energia/Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

Choobbasti, A.J., Kutanaei, S.S., 2017. Microstructure characteristics of cement-stabilized sandy soil using nanosilica. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,* 9(5): 981-988.

DER/CE. Departamento de Edificações e Rodovias do Estado do Ceará, 2005. Especificações Gerais para Serviços, Obras Rodoviárias. Fortaleza.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994. DNER-ME 049/94. Solos: Determinação do Índice de Suporte Califórnia Utilizando Amostras Não Trabalhadas. Rio de Janeiro. 15p.

Herrin, M., Mitchell, H., 1961. Lime-Soil Mixtures. *Highway Research Board,* (304): 99-121.

Lima, D.C., Bueno, B.S., Silva, C.H.C., 1993. Estabilização de Solos II - Técnicas e Aplicações a Solos da Microrregião de Viçosa. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa – Imprensa Universitária. 32p.

Machado, F.P., 2011. Aproveitamento de Rejeito de Caieira na Pavimentação de Estradas Vicinais: Mitigação de Dano Ambiental. Programa de Pós-Graduação em Geologia,

- Universidade Federal do Ceará, Dissertação de Mestrado em Geologia, 60p.
- Machado, F.P., 2014. Aproveitamento de Rejeito de Caieira na Pavimentação de Estradas Vicinais: Mitigação de Dano Ambiental. Fortaleza, Nova Edições Acadêmicas. 64p.
- Machado, F.P., Pessoa, A.D.C.C., Sabadia, J.A.B., 2015. Aproveitamento de Rejeitos de Caieiras na Melhora Significativa da Resistência dos Índices de Pavimentação de Estradas e Mitigação de Dano Ambiental. *Revista de Geologia*, 28 (1): 53-70.
- Machado, R. V., Ribeiro, R. C. D. C., Andrade, F. V., Passos, R. R., Mesquita, L. F., 2010. Utilização de resíduos oriundos do corte de rochas ornamentais na correção da acidez e adubação de solos tropicais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. (Série Tecnologia Ambiental, 55).
- Menezes, R. R, Neves, G. A., Ferreira, H. C., 2002. O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 6 (2): 303-313.
- Moura, A.W., Gonçalves, J.P., Leite, R.S., 2002. Utilização do Resíduo de Corte de Mármore e Granito em Argamassas de Revestimento e Confecção de Lajotas para Piso. *Sitientibus*, 26: 49-61.
- Mousavi, S.E., Karamvand, A., 2017. Assessment of strength development in stabilized soil with CBR PLUS and silica sand. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 4(4): 412-421.
- Pontes, J. C., Farias, M. S. S., Lima, V. L. A., 2013. Mineração e seus reflexos socioambientais: Estudo de Impactos de vizinhança (EIV) causados pelo desmonte de rochas com uso de explosivos. *POLÊM! CA*, 12(1): 77-90.
- Rezende, L.R., 2003. Estudo de Comportamento de Materiais Alternativos Utilizados em Estruturas de Pavimentos Flexíveis. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Tese de Doutorado em Geotécnica, 372p.
- Santos, A.R., 2008. Obras Simples Devem Recuperar Espaço Nobre na Engenharia. *Ambiente Brasil*. Disponível em: <<http://noticias.ambientebrasil.com.br/artigos/2008/07/07/39261-obras-simples-devem-reocupar-espaco-nobre-na-engenharia.html>>. Acesso em: 11 nov. 2018.
- Sampaio, J.A., Almeida, S.L.M., 2005. Calcário e Dolomito. In: FREITAS, L.F.A. & LUZ, A.L. (Org.) Rochas e Minerais Industriais. CETEM/MCT, p. 327-350.
- Silva, A. D. A., Filho, J. L. R., Souza, J. C., Barros, M. L. D. S. C., Lira, B. B., 2008. Aproveitamento de rejeito de calcário do Cariri Cearense na formulação de argamassa. *Estudos Geológicos*, 18 (1): 89-93.
- Silva, C.C., 2007. Comportamento de Solos Siltosos quando Reforçados com Fibras e Melhorados com Aditivos Químicos e Orgânicos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Dissertação de Mestrado, 170p.
- Silva, C.P., Rodrigues, A.B., Dias, M.S.A., 2007. Percepção de caieiros quanto às consequências do trabalho no processo saúde-doença. *Revista de Saúde Pública*, 41: 858-860.
- Silva, C.P., Dias, M.S.A., Carvalho, M.V.M., Negreiros, J.A., Silva, R.M., 2010. Processo de Trabalho dos Caieiros na Perspectiva da Saúde do Trabalhador. *SANARE – Revista de Políticas Públicas*. 9 (2): 21-28.
- Silva, J.O., 2009. Perfil da Cal. Brasília, Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. 39p.
- Silva Junior, O.G.D., Santos, M.V.D., Moura, C.A.V., Nascimento, R.D.S., Vilas, R.N.N., 2014. Carta Geológica: Folha Frecheirinha-SA. 24-YC-VI – Escala 1:100.000 – Programa Geologia do Brasil. Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, CPRM – Serviço Geológico do Brasil.
- Szeliga, L., Estudo Experimental de um Solo Arenoso Estabilizada com Cinzas de Resíduo Sólido Urbano e Cal. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio, Dissertação de Mestrado, 153p.
- Ta'negonbadi, B., Noorzad, R., 2017. Stabilization of clayey soil using lignosulfonate. *Transportation Geotechnics*, 12: 45-55.
- Torquato, J.R., Neto, J.A.N., 1996. Historiografia da Região de Dobramentos do Médio Coreau. *Revista Brasileira de Geociências*, 26 (4): 303-314.
- Vidal, F. W. H., Padilha, M. W. M., Oliveira, R. R., 2005. Aspectos geológicos da bacia do

Araripe e do aproveitamento dos rejeitos da Pedra Cariri–Ceará. *In: V SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE*, Recife, 2005. Anais, p. 31-36.

Vizcarra, G.O.C., 2010. Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio, Dissertação de Mestrado, 114p.