



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

ANTÔNIA DE CASTRO CÔRTEZ PESSOA

**APROVEITAMENTO DE REJEITOS DAS INDÚSTRIAS DE CAL NA
COMPOSIÇÃO DE CAMADAS GRANULARES DE PAVIMENTOS E ATERROS
RODOVIÁRIOS**

FORTALEZA
2023

ANTÔNIA DE CASTRO CÔRTEZ PESSOA

APROVEITAMENTO DE REJEITOS DAS INDÚSTRIAS DE CAL NA COMPOSIÇÃO
DE CAMADAS GRANULARES DE PAVIMENTOS E ATERROS RODOVIÁRIOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de Doutora em Geologia. Área de concentração: Geologia.

Orientador: Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo

Co-orientadora: Prof.^a. Dra. Carla Beatriz Costa de Araújo

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P567a Pessoa, Antônia de Castro Côrtes.
Aproveitamento de rejeitos das indústrias de cal na composição de camadas granulares de pavimentos e aterros rodoviários / Antônia de Castro Côrtes Pessoa. – 2023.
76 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo.

Coorientação: Prof. Dr. Carla Beatriz Costa de Araújo.

1. Pavimentos. 2. Rejeitos de cal. 3. Estabilização de solo. 4. Dano ambiental. I. Título.

CDD 551

ANTÔNIA DE CASTRO CÔRTEZ PESSOA

APROVEITAMENTO DE REJEITOS DAS INDÚSTRIAS DE CAL NA COMPOSIÇÃO
DE CAMADAS GRANULARES DE PAVIMENTOS E ATERROS RODOVIÁRIOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito final à obtenção do título de Doutora em Geologia. Área de concentração: Geologia.

Aprovada em: 12/07/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Dr^a. Cynthia Romariz Duarte
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Daniel Bezerra das Chagas
Universidade Federal de Goiás (UFG)

Prof. Dr. Eduardo Viana Freires
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcelo Ribeiro Barison
Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL)

Ao meu mestre, com carinho – Prof. Dr.
José Antonio Beltrão Sabadia (*in
memoriam*); ao meu esposo, Francisco; e à
minha filha, Patrícia.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador, Prof. Dr. José Antonio Beltrão Sabadia (*in memoriam*), pela orientação, dedicação e estímulo à minha decisão para ingresso no curso de Doutorado, bem como pelos inestimáveis ensinamentos no sentido de aprimorar a elaboração desta tese.

Ao orientador do Curso de Doutorado, Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo meus agradecimentos, pelos valiosos ensinamentos no sentido de aprimorar a elaboração deste trabalho.

Ao meu esposo, Francisco Pessoa Machado, pelo valioso incentivo, apoio e companheirismo.

À coordenadora do Curso de Doutorado em Geologia, Prof.^a Dra. Cynthia Romariz Duarte, pela atenciosa colaboração.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico - FUNCAP, pela concessão de bolsa de estudo no início do curso de doutorado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pelo importante apoio financeiro através de concessão de bolsa de estudo, incentivando a pesquisa, tornando viáveis as investigações técnicas e científicas, objetos desta tese.

Aos demais Professores do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará - UFC, pelos conhecimentos repassados durante as aulas ministradas.

Aos colegas de doutorado, pelos momentos de descontração, companheirismo e amizade expressados durante este curso.

Ao meu colega de profissão e colaborador, Cláudio Ângelo da Silva Neto, pelo incentivo e colaboração na execução desta tese.

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 presteza na viabilização dos ensaios geotécnicos das amostras de solo-rejeito, matéria-prima utilizada para as pesquisas.

Ao Laboratório de Física da Universidade Federal do Ceará – UFC, pela viabilização das análises químicas pelo método FRX, das amostras referentes a esta pesquisa.

"A felicidade pode ser encontrada inclusive nos momentos mais escuros; só é preciso se lembrar de acender a luz" (ROWLING, 2000).

RESUMO

O objetivo dos estudos deste trabalho permeia o emprego de rejeitos das indústrias de cal, visando a composição de camadas granulares para construção de pavimentos rodoviários e de aterros especiais. Esses resíduos formam pilhas de acúmulos nos pátios das indústrias de calcinação de calcário (caieira). A identificação de um destino útil desses resíduos proporcionaria mais um ganho econômico para os produtores de cal, bem como um significativo benefício ambiental no âmbito das áreas produtoras de cal e de seu entorno. Neste trabalho foram selecionadas três áreas distintas, produtoras de cal, no estado do Ceará, situadas nos municípios de Coreaú/Sobral, Forquilha e Quixeré. Para avaliar o efeito dos rejeitos de caieira na estabilização de um solo, foram realizados ensaios geotécnicos abaixo citados de amostras contemplando a mistura de solo e rejeitos. Os estudos foram prosseguidos com a localização das áreas de pesquisa, através de georreferenciamento, bem como a coleta das amostras do solo e dos rejeitos, utilizados nas composições das misturas solo-rejeito. Posteriormente, para a caracterização geotécnica do solo e das amostras das misturas de solo-rejeito, foram realizados os ensaios de Análise Granulométrica, com determinação dos índices físicos de Compactação e Umidade, CBR, Expansão e de Classificação HRB. Ao todo, foram ensaiadas 21 amostras, sendo 7 correspondentes a cada uma das três áreas dos estudos e uma análise de solo comum a todas. Os resultados das pesquisas, apontam que as amostras atendem as especificações geotécnicas, definidas pelo CBR e pelo Índice de Expansão, com a adição de rejeito ao solo nas proporções de 0%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% e 80%. A pesquisa apontou vantagens na utilização dos rejeitos, revelando ser um agente de estabilização de solo, refletido pela redução da expansão a níveis aceitáveis. Para a caracterização química dos calcários de cada área, foram analisadas quatro amostras, através da Florescência de Raios-X. Essa análise revelou tratar-se de calcários calcínicos em Coreaú/Sobral e Quixeré; e o de Forquilha, um calcário magnésiano.

Palavras-chave: pavimentos; rejeitos de cal; estabilização de solo; dano ambiental.

ABSTRACT

The objective of the studies in this work is the use of lime industry waste, aiming at the composition of granular layers for the construction of road sidewalks and special embankments. These residues form piles of accumulations in the yards of limestone calcination industries (whitewash). The identification of a useful destination for these residues would provide another economic gain for the lime producers, as well as a significant environmental benefit in the lime producing areas and their surroundings. Three distinct lime producing areas in the state of Ceará, located in the municipalities of Coreaú/Sobral, Forquilha and Quixeré, were selected. To evaluate the effect of lime tailings on soil stabilization, geotechnical tests were performed on samples including a mixture of soil and tailings. The studies proceeded with the location of the research areas, through georeferencing, as well as the collection of soil and tailings samples, used in the compositions of the soil-reject mixtures. Subsequently, for the geotechnical characterization of the soil and samples of the soil-reject mixtures, the Granulometric Analysis tests were performed, with determination of the physical indexes of Compaction and Moisture, CBR, Expansion and HRB Classification. In all, 21 samples were tested, 7 corresponding to each of the three study areas and one soil analysis common to all. The research results indicate that the samples meet the geotechnical specifications, defined by the CBR and the Expansion Index, with the addition of tailings to the soil in the proportions of 0%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% and 80%. The research pointed out advantages in the use of the tailings, revealing to be a soil stabilization agent, reflected by the reduction of the expansion to acceptable levels. For the chemical characterization of the limestones from each area, four samples were analyzed, through X-Ray Florescence. These analyses showed that Coreaú/Sobral and Quixeré are calcitic limestones; Forquilha is magnesian limestone.

Keywords: paving; lime tailings; soil stabilization; environmental damage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Caieira em plena atividade na localidade de Ingá, município de Forquilha (CE)	18
Figura 2 – Pátio de uma indústria de cal na localidade de Pedra de Fogo, município de Sobral (CE)	18
Figura 3 – Localização da área produtora de cal referente à Área 1 (Coreaú/Sobral)	21
Figura 4 – Mapa geológico das áreas de pesquisa entre Sobral e Coreaú (CE) .	22
Figura 5 – Localização da área produtora de cal referente à Área 2 (Forquilha) .	23
Figura 6 – Mapa geológico da área de pesquisa em Forquilha (CE)	24
Figura 7 – Localização da área produtora de cal referente à Área 3 (Quixeré) ...	25
Figura 8 – Mapa geológico da área de pesquisa em Quixeré (CE)	26
Figura 9 – Solo argiloso, utilizado na mistura solo-rejeito	42
Figura 10 – Tela metálica (peneira) utilizada no processo de peneiramento da cal	44
Figura 11 – Pátio de uma unidade produtiva de cal, mostrando um acúmulo de rejeito ao redor da caieira, no município de Forquilha (CE)	44
Figura 12 – Acúmulos de rejeito observado ao redor de uma caieira, no município de Sobral (CE)	45
Figura 13 – Caieira na localidade de Aroeiras, município de Coreaú (CE)	45
Figura 14 – Fluxograma da metodologia empregada na dinâmica das coletas e composição das amostras e envio para laboratório de ensaios geotécnicos	46

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1 – Efeito do rejeito de cal hidratada na estabilização de um solo argiloso, refletida pelo CBR, concernente à área de Coreaú / Sobral 58
- Gráfico 2 – Efeito do rejeito de cal hidratada na estabilização de um solo argiloso, refletida pelo CBR da área de Forquilha 58
- Gráfico 3 – Efeito do rejeito de cal hidratada na estabilização de um solo argiloso, refletida pelo CBR da área de Quixeré 59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Atividades de mineração e indicação de medidas mitigadoras de controle dos impactos ambientais	52
Quadro 2 – Benefícios sociais implantados em decorrência de um empreendimento minero-industrial	53

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Caracterização geotécnica das amostras das misturas compostas de rejeito e de solo argiloso, referentes à Área 1 – de Coreau / Sobral ... 54
- Tabela 2 – Caracterização geotécnica das amostras das misturas compostas de rejeito e de solo argiloso, referentes à Área 2 – Forquilha 54
- Tabela 3 – Caracterização geotécnica das amostras das misturas compostas de rejeito e de solo argiloso, referentes à Área 3 – Quixeré 55
- Tabela 4 – Caracterização geotécnica da granulometria das amostras compostas de rejeito e de solo argiloso, referentes às Áreas 1 – Coreau/Sobra; Área 2 – Forquilha e Área 3 – Quixeré 55
- Tabela 5 – Composições químicas das rochas carbonáticas (calcários), analisados através do método de fluorescência de Raios-X 61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Apresentação	16
1.2	Justificativa	17
1.3	Objetivos	19
1.3.1	Objetivo geral	19
1.3.2	Objetivos específicos	19
2	ÁREAS DE ESTUDO	20
2.1	Área 1 – Coreaú/Sobral	20
2.1.1	Localização e acesso	20
2.1.2	Aspectos geoambientais	21
2.2	Área 2 – Forquilha	23
2.2.1	Localização e acesso	23
2.2.2	Aspectos geoambientais	23
2.3	Área 3 – Quixeré	25
2.3.1	Localização e acesso	25
2.3.2	Aspectos geoambientais	26
3	ESTADO DO CEARÁ – CONTEXTO GEOAMBIENTAL	28
3.1	Características geográficas, recursos naturais e meio ambiente	28
3.2	Atividades de mineração das rochas carbonáticas	29
4	ESTADO DA ARTE	30
5	MEIO AMBIENTE E MINERAÇÃO	39
6	MATERIAL E MÉTODOS	42
6.1	Solo	42
6.2	Rejeito	43
6.3	Ensaio geotécnicos	46
6.4	Caracterização química dos calcários	49
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
7.1	Análise socioambiental	51
7.2	Parâmetros geotécnicos	53
8	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	62

8.1	Conclusões	62
8.2	Recomendações	63
	REFERÊNCIAS	65
	APÊNDICE A – CAPA DO ARTIGO PUBLICADO NA REVISTA DE GEOLOGIA (ISSN 0103-2410, QUALIS B4)	70
	APÊNDICE B – CAPA DO ARTIGO PUBLICADO NA REVISTA BRASILEIRA DE GEOGRAFIA FÍSICA (ISSN 1984-2295, QUALIS A2)	71
	APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO SOCIOECONÔMICO APLICADO JUNTO AOS PRODUTORES DE CAL DAS TRÊS ÁREAS ESTUDADAS NESTA PESQUISA	72
	APÊNDICE D – RESULTADOS DOS ENSAIOS GEOTÉCNICOS ÁREA 1 – COREAÚ / SOBRAL	74
	APÊNDICE E – RESULTADOS DOS ENSAIOS GEOTÉCNICOS ÁREA 2 – FORQUILHA	75
	APÊNDICE F – RESULTADOS DOS ENSAIOS GEOTÉCNICOS ÁREA 3 – QUIXERÉ	76

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

As indústrias de cal do estado do Ceará utilizam, na sua grande maioria, fornos rudimentares denominados de caieira. Essa atividade é realizada desde a etapa inicial de extração até a comercialização do produto. Neste processo estão incluídos a extração, a calcinação do calcário, a hidratação o beneficiamento (peneiramento) da cal, bem como a embalagem deste produto, o carregamento dos caminhões e a sua comercialização.

Essas unidades de produção de cal geralmente estão instaladas na zona rural ou nas imediações de pequenos núcleos habitacionais, a exemplo do que ocorre nas 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 muitas pessoas (MACHADO, 2014).

Do processo de beneficiamento da cal, resulta um produto residual de aproximadamente 20% do peso bruto. Este rejeito é composto de pedregulhos de calcário, podendo conter também menor proporção de outras rochas da sucessão estratigráfica, assim como de porções de cal retida no peneiramento, que teve sua hidratação retardada.

O acúmulo desses resíduos constitui pilha de rejeitos ao redor dos fornos de calcinação, ao longo do tempo, passam a atrapalhar o bom andamento das atividades de produção, impactando 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 os riachos, rios e açudes da região, colocando em risco a qualidade das águas e contribuindo para o assoreamento dos corpos hídricos localizados próximos das indústrias de cal.

Portanto, o aproveitamento desses resíduos de forma racional e sustentável viria contribuir com a limpeza do terreno do entorno das unidades produtivas, acarretaria também na mitigação e na reparação de risco de degradação ao meio ambiente; podendo também vir a se constituir em mais uma fonte de renda para os produtores de cal.

Esta pesquisa tem como principal foco a identificação de alternativa viável para o aproveitamento racional dos rejeitos das indústrias de cal do estado do Ceará,

no intuito maior da preservação e redução de impactos ao meio ambiente. Na realização dos estudos foram coletadas amostras em três províncias produtoras de cal do Ceará, sendo duas localizadas na sua região setentrional no limite dos municípios de Coreaú e Sobral; a outra em Forquilha; e a terceira na região do Baixo Jaguaribe, em Quixeré.

1.2 Justificativa

No Ceará, a disponibilidade em abundância de rochas carbonáticas, ocorrendo em quase todas as suas regiões, é muito significativa para a economia do estado, sendo utilizadas em diversos segmentos produtivos, quer na indústria de ponta ou nas formas mais simples, tais como na produção de cal que, por sua vez, possui uma expressiva gama de utilidades.

As pesquisas foram centradas na busca por uma alternativa viável para o aproveitamento dos rejeitos acumulados em pilhas no pátio das indústrias de cal, e assim contribuir com a redução do emprego de materiais de empréstimos de solos granulares extraídos de jazidas naturais, reduzindo, assim, a degradação do meio ambiente, que por sua vez, pode acarretar na diminuição dos custos da obra de aterro.

Neste trabalho, enfoca-se a estabilização de solos com o uso de rejeitos oriundos das indústrias de calcinação de calcário. Sabe-se que o solo pode ter seu comportamento estrutural modificado a partir da adição de um determinado percentual de rejeito. Nessa pesquisa, trata-se de rejeitos constituídos de calcário não totalmente calcinado, e de cinzas e cal, que ao serem misturados ao solo, podem imprimir a este uma maior resistência a esforços, de tal forma que podem ser utilizados na construção de camadas granulares de pavimentos de rodovias.

Vale salientar que as regiões escolhidas para o desenvolvimento das pesquisas desta tese abrigam uma população rural carente, que obtém sua renda através da industrialização do calcário. Nessas regiões, os moradores encontram na produção da cal uma forma de minimizar os problemas econômicos advindos da seca e o êxodo rural, já que a agricultura é sazonal e, em alguns anos, torna-se até impraticável.

Os produtores de cal, utilizam fornos artesanais, bastante rudimentares, denominados de caieira (Figura 1), tendo a lenha como combustível. Ao redor dessas caieiras, com os processos de calcinação do calcário e hidratação da cal, no decorrer

do tempo, os rejeitos vão sendo acumulados (Figura 2), em ritmo contínuo, pondo em risco o meio ambiente com emissão de finas partículas. Assim, durante o período seco, rajadas de vento espalham a poeira de cal pela atmosfera; enquanto no período chuvoso essas partículas finas são carregadas para rios, riachos e açudes da região, contribuindo para o assoreamento destes corpos hídricos, além de serem uma ameaça à saúde das pessoas que moram e trabalham nesses locais de produção.

Figura 1 – Caieira em atividade na localidade de Ingá, município de Forquilha (CE).



Fonte: autora. Fotografia registrada em setembro de 2018.

Figura 2 – Pátio de uma indústria de cal na localidade de Pedra de Fogo, município de Sobral (CE).



Fonte: autora. Fotografia registrada em setembro de 2018.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Investigar a possibilidade do aproveitamento dos rejeitos de caieira na composição de camadas granulares de pavimentos e aterros de estradas, utilizando-se como materiais de estudo os rejeitos, oriundos das regiões produtoras de calcário das três formações geológicas distintas, localizadas no estado do Ceará: Formação Jandaíra, no município de Quixeré; Formação Frecheirinha, situada no limite dos municípios de Coreaú e Sobral; e Unidade Independência, no município de Forquilha.

1.3.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, destacam-se:

- a) Realizar ensaios geotécnicos, aplicados à pavimentação, em amostras compostas por solo e rejeito, no intuito de avaliar suas propriedades físicas, e verificar a possibilidade de seu emprego na pavimentação de rodovias e outras obras de aterro;
- b) Intensificar e ampliar os conhecimentos referentes ao efeito estabilizante de solo, causado pelo rejeito de caieira, refletido nas propriedades geotécnicas sobre as amostras ensaiadas de misturas solo-rejeito;
- c) Avaliação dos impactos ambientais;
- d) Apresentar os resultados das avaliações dos impactos ambientais;
- e) Difundir os resultados das pesquisas realizadas, através de publicações em periódicos.

2 ÁREAS DE ESTUDO

As pesquisas objetos da presente tese tiveram como alvos as coletas de dados e de amostras de rejeito de caieira de três áreas distintas. Tratam-se de áreas portadoras de calcário e produtoras de cal, situadas no estado do Ceará, no Nordeste do Brasil.

Embora os calcários ocorram em locais por quase todo o Estado, existem regiões que se destacam por apresentarem jazimentos com potencialidades geológicas e econômicas que constituem reserva de extraordinário vulto. É o caso dos municípios de Coreaú/Sobral, Forquilha e Quixeré. Além desses expressivos jazimentos, os calcários do Ceará apresentam qualidades químicas e tecnológicas que satisfazem, por sua vez, a toda a cadeia produtiva, uma vez que apresentam composições químicas desde o calcário de natureza calcítica ao calcário magnesiano/dolomítico.

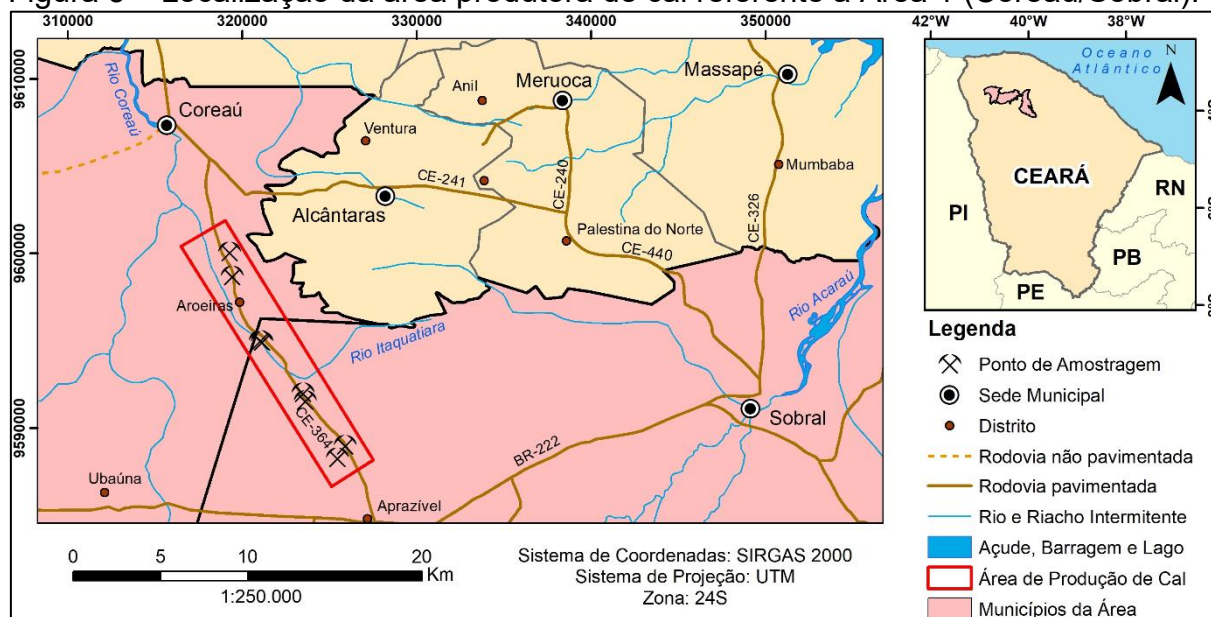
2.1 Área 1 – Coreaú/Sobral

2.1.1 Localização e acesso

Esta área localiza-se na porção norte do Ceará, a cerca de 260 km a oeste de Fortaleza, no limite dos municípios de Coreaú e Sobral, ao longo da rodovia CE-364, onde se situam as comunidades de Aroeiras e Pedra de Fogo, respectivamente (Figura 3).

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 (Sobral), após percorridos 253 Km, de onde continua pela rodovia CE-364 por um percurso de mais 8 Km, perfazendo 261 km. A segunda opção é percorrer inicialmente pela rodovia a BR-222, até a cidade de Umirim (Km 92), seguindo daí pela rodovia CE-354, passando pela cidade de Itapipoca e seguindo até Sobral, por um percurso de cerca de 285 Km, onde se toma novamente a BR-222 por mais 26 Km, até o distrito de Aprazível (Sobral), e prossegue-se daí pela CE- 364, por mais 8 km, chegando-se à área.

Figura 3 – Localização da área produtora de cal referente à Área 1 (Coreaú/Sobral).



Fonte: elaborado pela autora.

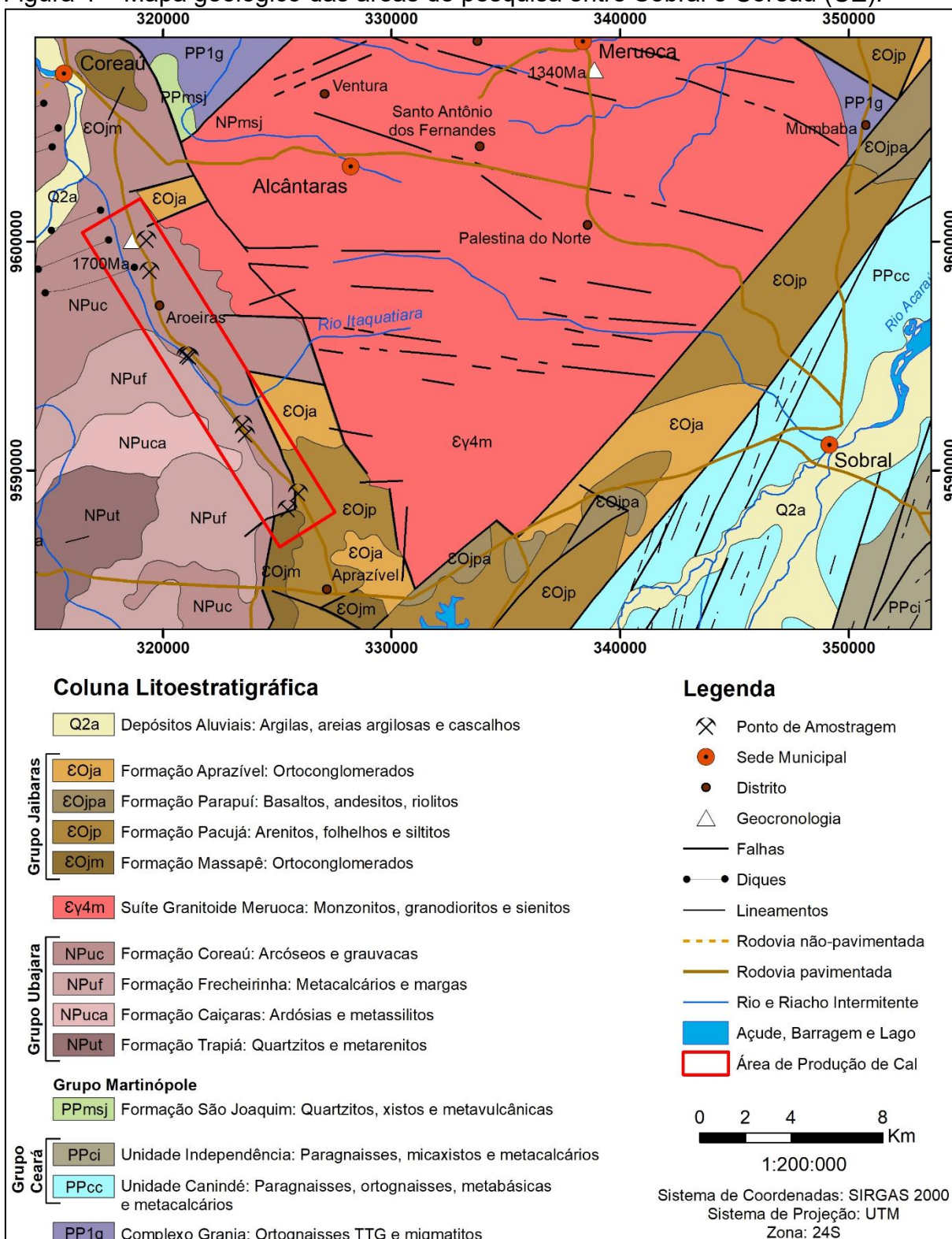
2.1.2 Aspectos geoambientais

A área de Coreaú/Sobral está situada, geologicamente, nos domínios dos calcários sedimentares da Formação Frecheirinha, do Grupo Ubajara, datado do Neoproterozoico (650 – 850 Ma). Seus calcários, essencialmente calcíticos, são essencialmente de colorações escuras, acinzentadas a pretas, de granulação fina, contendo eventuais intercalações de bancos delgados de margas, siltitos e arenitos finos. (CAVALCANTE *et al.*, 2003).

Estratigraficamente, a Formação Frecheirinha encontra-se sobre as Formações Caiçaras (ardósias) e Trapiá (meta-arenitos), e é sobreposta pela Formação Coreaú (arenitos arcoseanos finos). Todo este conjunto que integra o Grupo Ubajara encontra-se metamorfozizado em baixo grau e está intensamente cortado por veios de calcita e sílica. (Figura 4).

A rede de drenagem está representada localmente pelos rios e riachos tributários da margem direita a Bacia do Rio Coreaú. É constituída pelos tributários da margem direita da sub-bacia do rio Itaquiatiara, tendo como principal afluente o riacho Pedra de Fogo, que é intermitente, só havendo corrente de água durante o período chuvoso, assim como os demais cursos d'água desta sub-bacia.

Figura 4 – Mapa geológico das áreas de pesquisa entre Sobral e Coreaú (CE).



Fonte: Adaptado de Cavalcante *et al.* (2003). Escala original 1:500.000.

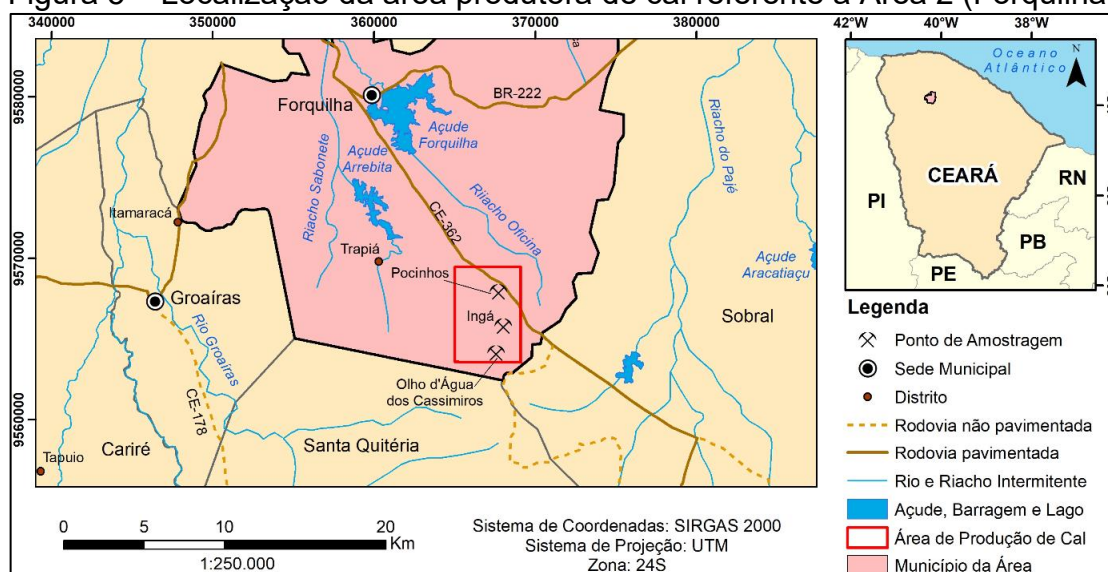
2.2 Área 2 – Forquilha

2.2.1 Localização e acesso

Trata-se de uma área localizada na porção norte do Ceará, 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 5).

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

Figura 5 – Localização da área produtora de cal referente à Área 2 (Forquilha).



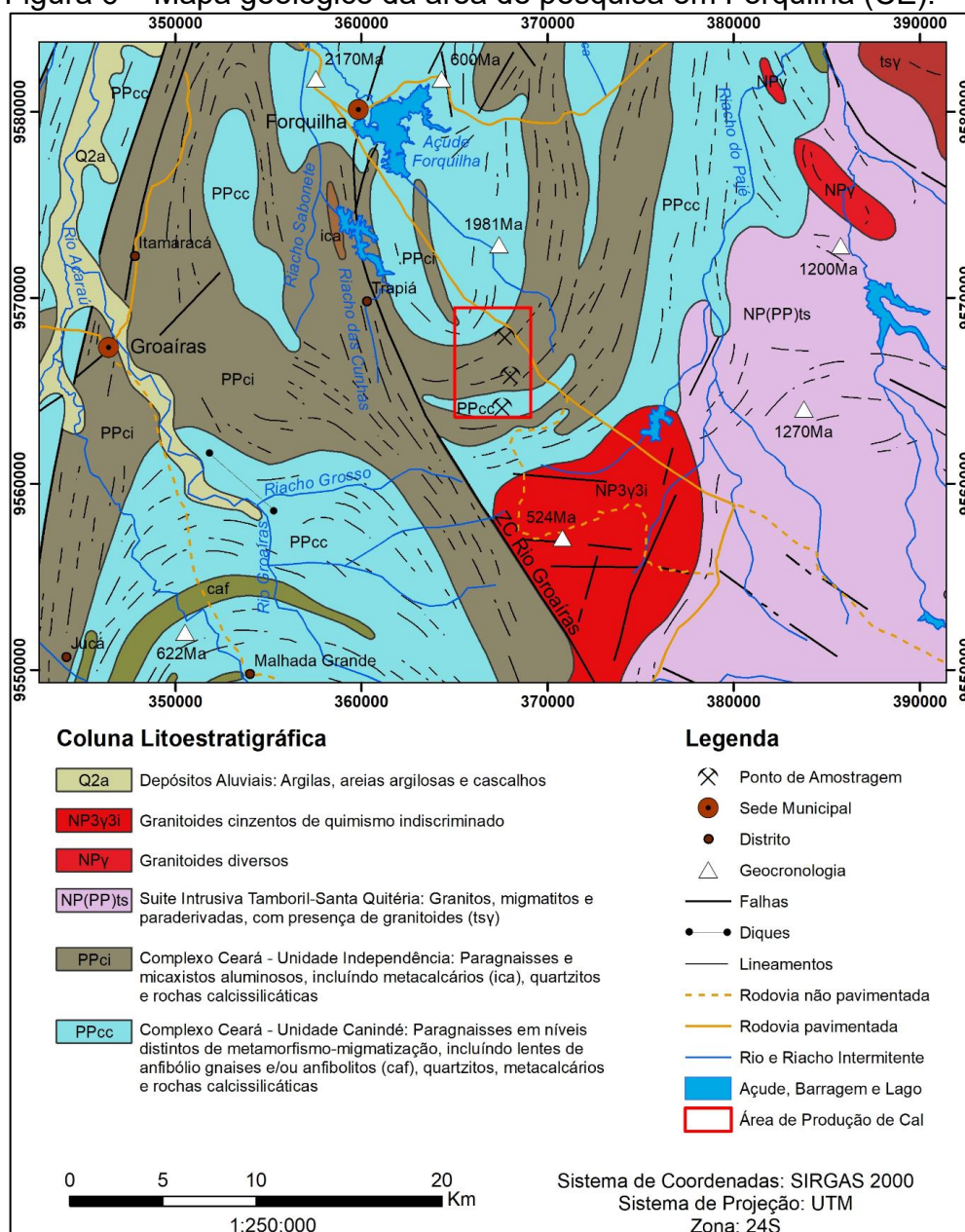
Fonte: elaborado pela autora.

2.2.2 Aspectos geoambientais

A área do município de Forquilha, corresponde às jazidas carbonáticas inseridas geologicamente no Complexo Ceará, abrangendo as Unidades Independência e Canindé (Figura 6). Estas unidades apresentam uma grande variedade de litotipos, compreendendo mármores magnesianos com estruturas

bandadas, cor variando de cinza a esbranquiçada e textura sacaroidal. Ocorrem sob a forma de lentes descontínuas, normalmente espessas e encaixadas em gnaisses paraderivados. Os calcários são utilizados para produção de cal, corretivos de solo, bem como na indústria siderúrgica (CAVALCANTE *et al.*, 2003).

Figura 6 – Mapa geológico da área de pesquisa em Forquilha (CE).



Fonte: Adaptado de Cavalcante *et al.* (2003). Escala original 1:500.000.

Localmente, a área é drenada pela sub-bacia hidrográfica do seu principal curso d'água o riacho Sabonete e seus principais tributários da sua margem direita, que fazem parte da Bacia Hidrográfica do Rio Acaraú. Os principais riachos, afluentes do riacho Sabonete, da sua margem direita, são os riachos dos Cunhas e o Boqueirão.

2.3 Área 3 – Quixeré

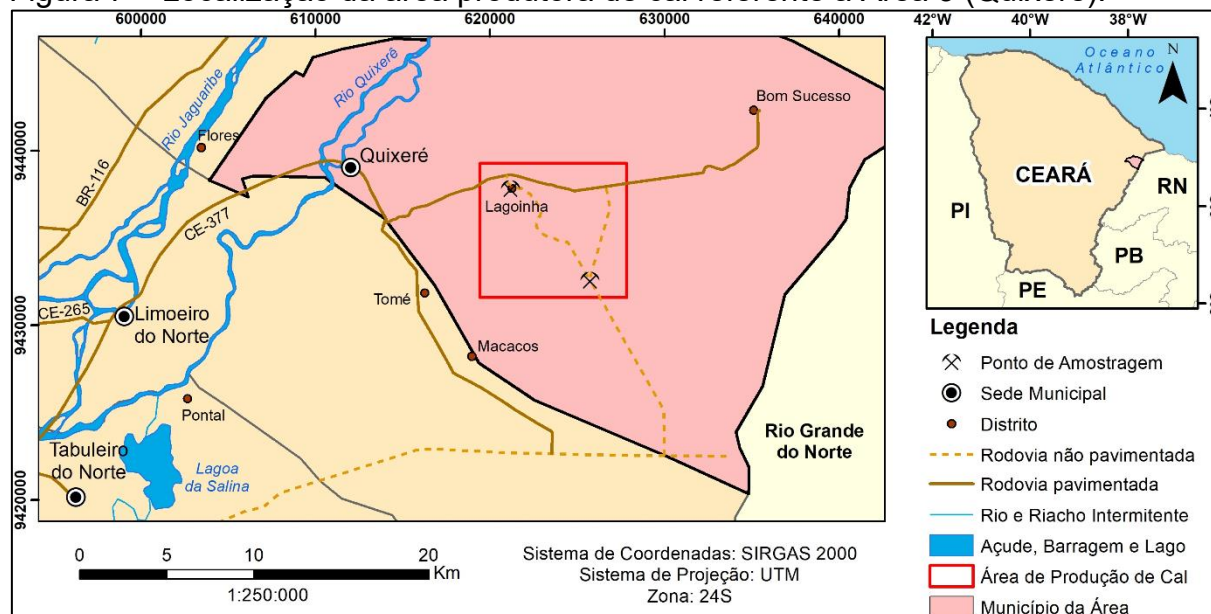
2.3.1 Localização e acesso

Trata-se de uma área produtora de cal, compreendendo as localidades de Lagoinha e Paraiso, no município de Quixeré, na região do Baixo Jaguaribe, nos domínios da Chapada do Apodi (Figura 7).

Para se chegar à localidade de Lagoinha, o acesso mais curto e viável, saindo-se da cidade de Quixeré, é pela rodovia CE-371. Percorrendo-se cerca de 10 km por esta rodovia, no sentido sudeste, até a localidade de Tomé. Daí, toma-se uma estrada carroçável, à esquerda, no sentido norte, por mais cerca de 7 km e chega-se à Lagoinha, num percurso total de aproximado 17 km.

Já o acesso à localidade de fazenda Paraiso, que é onde se localiza a fábrica de cal Fabrical, inicialmente faz-se o mesmo percurso para se chegar à Lagoinha, acima descrito, por 17 km; de Lagoinha, segue-se no sentido norte, por estrada carroçável, por um percurso de mais cerca de 7 km, perfazendo um total de 24 km, de Quixeré.

Figura 7 – Localização da área produtora de cal referente à Área 3 (Quixeré).



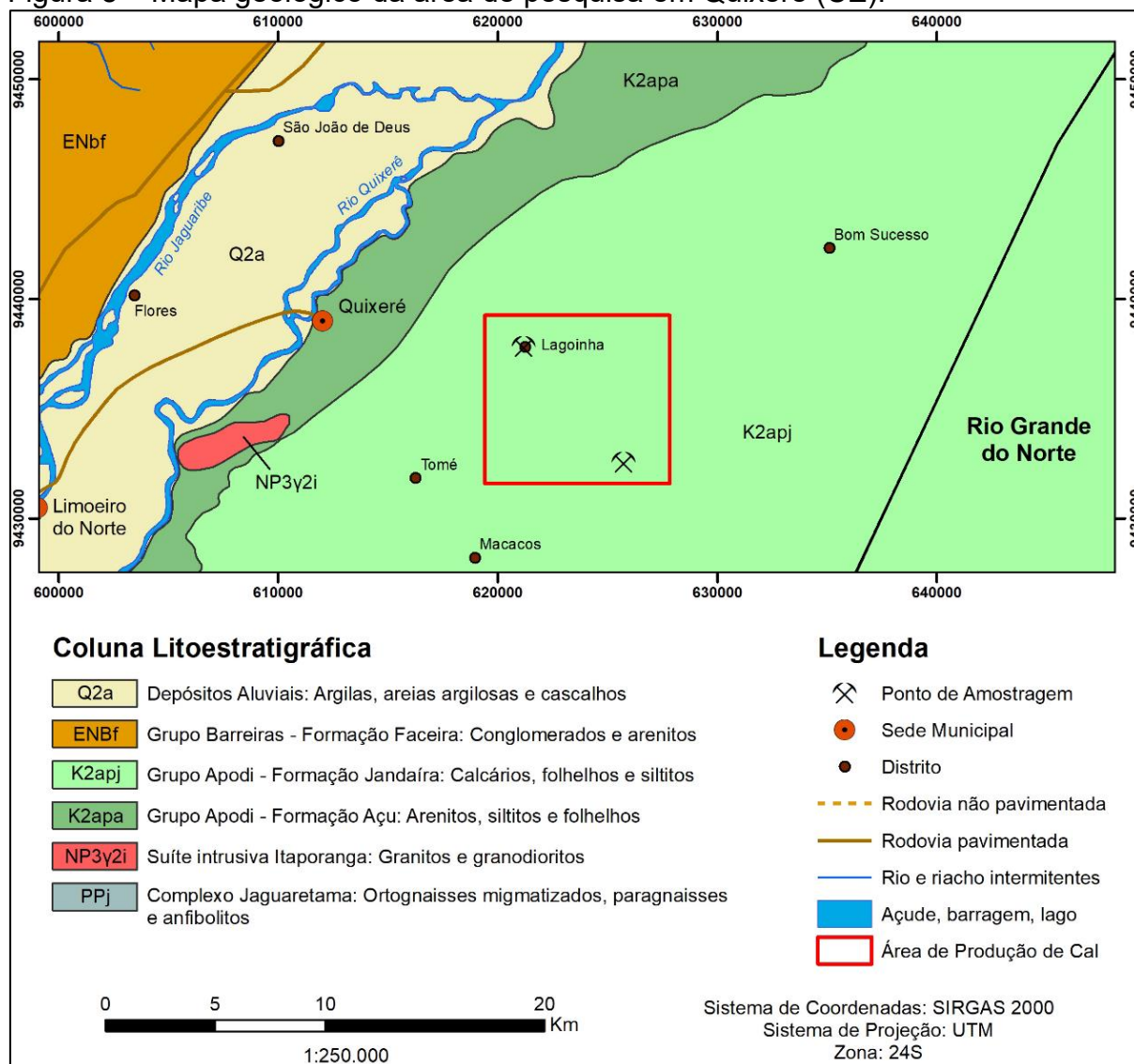
Fonte: elaborado pela autora.

2.3.2 Aspectos geoambientais

Ao sudeste do estado do Ceará, situa-se a Chapada do Apodi, que é definida por uma linha de escarpa irregular, e se erguendo progressivamente em direção ao sudoeste, indo de poucos metros a até cerca de 40 metros acima do nível do relevo da depressão periférica.

Na zona de escarpa, observam-se afloramentos dos calcários da Formação Jandaíra, em forma de paredões, juntamente com a camada superior, constituída da Formação Açú, composta de argilitos e siltitos (Figura 8). No conjunto, forma um relevo típico de queda, de altura pouco expressiva, oscilando em torno de 40 metros, constituindo um altiplano em forma de platô.

Figura 8 – Mapa geológico da área de pesquisa em Quixeré (CE).



Fonte: Adaptado de Cavalcante *et al.* (2003). Escala original 1:500.000.

Geologicamente, no caso da bacia sedimentar da Formação Jandaira, o calcário é de idade cretácea, pertencente a Bacia Potiguar. Seus principais afloramentos ocorrem nos municípios de Jaguaruana, Quixeré e Limoeiro do Norte. O calcário apresenta-se em camadas praticamente horizontais, contínuas, com mergulhos suaves para oeste; coloração variando de branca a amarelada, dependendo da quantidade de argila; granulação de fina a média, com grãos de calcita recristalizados; e contendo fósseis variados. O calcário extraído nestes municípios é utilizado, principalmente, na produção de cal, cimento, pedra de revestimento, rochas ornamentais, corretivos agrícolas e na indústria de tintas. (SOUSA; VIDAL, 2005).

A rede de drenagem é de pouca expressividade, ou quase nula, devido tratar-se, de um relevo planar, de pouco desnível topográfico, com leve desnível em direção ao mar, mas principalmente por estar condicionado às fraturas dos calcários, além da cobertura arenosa. Assim, os cursos d'água estão representados por pequenos riachos, conhecidos como grota, que fazem parte, pela margem direita, da sub-bacia do rio Quixeré, que, por sua vez é tributário da margem direita do rio Jaguaribe.

3 ESTADO DO CEARÁ – CONTEXTO GEOAMBIENTAL

3.1 Características geográficas, recursos naturais e meio ambiente

O Estado do Ceará possui uma área territorial de 148.825,6 km², e está situado na região Nordeste do Brasil. Tem como estados limítrofes o Piauí, a oeste; o Rio Grande do Norte e a Paraíba, a leste; Pernambuco, ao sul; e o Oceano Atlântico, a Norte. Possui localização estratégica devido sua proximidade com a Europa, América do Norte e ainda com o Continente Africano, garantindo grande fluxo turístico internacional e boas condições para o desenvolvimento do comércio exterior. (IPECE, 2021).

O clima predominante no território cearense é o Tropical Quente Semiárido, abrangendo 184 sedes municipais. Esse tipo climático apresenta características como escassez e irregularidades pluviométricas associadas a altas taxas de evapotranspiração. Essas condições tornam a Estado susceptível ao fenômeno das secas. (IPECE, 2021).

Os recursos hídricos apresentam-se, em sua maioria, insuficientes e intermitentes, e exibem ainda níveis comprometedores de poluição, decorrentes principalmente dos grandes centros urbanos, das indústrias e do uso de técnicas rudimentares ligadas a agricultura. (IPECE, 2021).

Os solos predominantes são os Neossolos, cobrindo 36% da área do Estado. Em geral, as condições edáficas no Ceará são frágeis, devido os solos apresentarem-se com pouca profundidade, deficiência hídrica e, principalmente, vulnerabilidade à erosão. Esses tipos de solos, associados às severas condições climáticas, exigem maiores cuidados na exploração dos recursos naturais, sendo a implantação de Unidades de Conservação a forma mais eficiente de proteção/preservação desses recursos. Em todo o Estado, encontram-se implantadas 69 Unidades de Conservação, entre reservas federais, estaduais, municipais e particulares. (IPECE, 2021).

O Ceará apresenta grande diversidade paisagística em suas unidades geoambientais. As superfícies sertanejas submetidas à semiaridez apresentam predominância da vegetação da caatinga. Já as regiões serranas, como o Pico Alto de Guaramiranga (1.112m) e o Pico da Serra Branca (1.154m) possuem condições edáficas e climáticas melhores e podem ser classificadas como paisagens de exceção

no contexto do semiárido. Há ainda as paisagens litorâneas, com ocorrência de dunas e mangues, que detêm temperaturas mais amenas e maiores índices pluviométricos. (IPECE, 2021).

3.2 Atividades de mineração das rochas carbonáticas

Sabe-se que a mineração e a indústria das rochas carbonáticas se constituem em uma atividade de relevante importância para o desenvolvimento econômico e sustentável da Região Nordeste do Brasil, não só pela multiplicidade de seu uso, mas também pelo volume de seus jazimentos, bem como pelos significativos contributos sociais envolvidos. O território cearense é portador de vultosas reservas de rochas carbonáticas, atualmente estimadas em 5.785.102.785 toneladas. Essas rochas são utilizadas, principalmente, como insumos nas indústrias de cimento, cal, ração animal, indústria farmacêutica, siderurgia e tintas. (DNPM/CE, 2005).

As jazidas cearenses mais significativas dessas rochas (calcíticas e dolomíticas) estão localizadas nos municípios de Quixeré, Limoeiro do Norte, Redenção, Acarape, Sobral, Coreaú, Forquilha, Frecheirinha, Canindé, Farias Brito, Santa Quitéria, Itataia, Boa Viagem, Iguatu, Jucás, Icó, Barbalha, Nova Olinda e Santana do Cariri. (SOUSA; VIDAL, 2005).

O estado do Ceará, neste contexto, tem posição de destaque no Nordeste brasileiro, por ser portador de grandes reservas de diferentes tipos de calcário (dolomíticos e calcíticos). Esses recursos minerais se revertem de importantes e versáteis matérias-primas para uma variável gama deste segmento industrial. Podendo, potencialmente, ser um fator indutor para estimular a instalação de novos empreendimentos industriais; e de polos de desenvolvimento, principalmente nos municípios cearenses mais carentes, onde normalmente se localizam esses jazimentos.

4 ESTADO DA ARTE

Na elaboração de um projeto de pavimentação faz-se necessário que o projetista recorra a uma série de ensaios, visando a caracterização dos solos, através da identificação de suas características geotécnicas.

Andrade (2012) explica que a cal virgem é obtida pela calcinação dos calcários, podendo ser dos tipos calcítico (CaCO_3) ou dolomítico (Ca, Mg CO_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 = cal virgem mais liberação de gás carbônico ($\text{CaO} + \text{CO}_2$) (SAMPALHO; ALMEIDA, 2005).

Conforme Andrade (2012), o óxido de cálcio ou mistura de óxidos de cálcio com magnésio, resultante da calcinação de um calcário, é conhecido como cal. Sua fórmula molecular é representada por CaO ou CaO.MgO , que significa a combinação do oxigênio com o cálcio e o magnésio. Neste estágio, ainda antes de sofrer o processo de hidratação, ambas as formas apresentadas são conhecidas como “cal virgem”. Essa transformação, que gera a cal virgem, pode ser expressa pelas seguintes equações estequiométricas:

- Calcário calcítico: $\text{CaCO}_3 + \text{calor} \leftrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- Calcário dolomítico: $\text{CaCO}_3.\text{MgCO}_3 + \text{calor} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{MgO} + \text{CaCO}_3$

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 magnesiana. 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. Complementando, Machado *et al.* (2015) ressalta que o aproveitamento de rejeitos de caieiras na sua incorporação a um solo argiloso contribui para uma melhora significativa da resistência dos índices físicos desse solo, se adequando à sua destinação para uma obra de pavimentação de estradas.

Rezende (2003) relata que entre os materiais alternativos que podem ser aplicados em base e sub-base de pavimentos estão os solos estabilizados granulométrica ou quimicamente, para proporcionar a melhoria de suas propriedades

físicas. O aproveitamento destes materiais poderá promover a redução, ou mesmo a reparação, de danos ambientais, pois esses materiais alternativos estabilizados podem substituir solos granulares naturais, evitando-se a exploração de jazidas, e assim poupando-se, a supressão da cobertura vegetal e da camada de solo fértil, decorrente da extração destes solos.

Conforme Laufer (1967) e Mousavi *et al.* (2017), a estabilização de solos é uma prática milenar desenvolvida, a princípio, de forma rudimentar. Porém, posteriormente, ao longo do tempo, este processo foi sendo aprimorado. Esta técnica tem sido aprimorada por pesquisadores dos segmentos da geotecnia e da engenharia civil, que buscam por soluções mais eficientes e econômicas. Essa técnica tem a finalidade de estabilizar e suplementar as propriedades de resistência do solo, maximizando a sua adequação para satisfazer a um determinado uso. A estabilização do solo pode ser realizada por métodos mecânicos ou químicos.

Segundo Brito *et al.* (2017), é possível que o solo local, encontrado à disposição para a execução de uma obra rodoviária, não apresente as propriedades e características necessárias para suportar os esforços exigidos pelo tráfego, a que se destina a obra, e que possa resistir às intempéries. Desta forma, faz-se necessária a correção do solo disponível, proporcionando-lhe características geotécnicas que atenda às exigências do projeto. Existem diversos métodos para corrigir e estabilizar os solos, sendo fundamental conhecê-los, adequadamente, de modo a fazer-se uma escolha correta, técnica e economicamente.

Ta'negonbadi *et al.* (2017) relatam que, quando os projetos de engenharia geotécnica precisam ser construídos sobre solos fracos e de baixa resistência ao cisalhamento, surgem problemas relacionados à capacidade de rolamento. Então, a estabilização dos solos é um método tecnicamente viável, econômico e duradouro, e comprovadamente eficaz para alcançar as propriedades geotécnicas desejadas.

Bernucci *et al.* (2007) definem que pavimento é uma estrutura formada por camadas de espessuras definidas, construídas após o término da terraplenagem. Que é projetado conforme especificações técnicas, de modo economicamente viável, com a finalidade de proporcionar aos usuários maior segurança e conforto, gerar economia nos transportes e resistir aos esforços produzidos pelo tráfego de veículos e às intempéries climáticas.

Para o DNIT (2006), o pavimento é uma estrutura de camadas em que materiais de diferentes resistências e deformidades são colocados em contato,

resultando daí um elevado grau de complexidade no que se refere ao cálculo de tensões e deformações, e visando obter uma superfície de rolamento capaz de suportar esses esforços, resultantes das cargas impostas pelo tráfego.

Normalmente, a divisão dos pavimentos é classificada em dois grupos: rígidos e flexíveis. No entanto, alguns autores classificam os pavimentos em três grupos distintos, adicionando o grupo de pavimento semirrígidos aos demais.

De acordo com DNIT (2006), pavimento rígido é aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes da carga aplicada. Um exemplo típico é o pavimento constituído por lajes de concreto de cimento Portland.

Ainda segundo o DNIT (2006), pavimento flexível é aquele no qual todas as camadas sofrem deformação elástica sob o carregamento aplicado, dessa forma a carga é distribuída em parcelas equivalentes entre as camadas. Um exemplo típico é o pavimento constituído por uma base de brita (brita graduada) ou por uma base de solo pedregulhoso, revestida por uma camada asfáltica.

Senço (2008) define que pavimentos flexíveis são aqueles que as deformações, em um certo limite, não levam ao rompimento. Para pavimentos flexíveis, a estrutura é formada por quatro camadas principais: subleito, regularização do subleito, reforço do subleito (pode ou não existir), sub-base, base e revestimento asfáltico.

Para o DNIT (2006), pavimento semirrígido é caracterizado por uma base cimentada por algum aglomerante, com propriedades cimentícias (estabilização química). É o caso de uma camada de solo-cimento revestida por asfalto.

Senço (2008) define que a camada mais próxima da superfície é considerada subleito, que é o terreno de fundação do pavimento.

Conforme Souza (1980), o subleito é considerado e estudado até as profundidades em que atuam as cargas impostas pelo tráfego. Do ponto de vista prático, as profundidades das camadas devem estar num intervalo de 0,6 m a 1,5 m.

DNIT (2006) define que camadas estabilizadas por materiais granulares são aquelas constituídas por solos, e por britas de rochas, de escória de alto forno, ou ainda, por mistura desses materiais. Essas camadas, puramente granulares, são sempre flexíveis, e são estabilizadas granulometricamente pela compactação de um material ou de mistura de materiais que apresentem uma granulometria apropriada e índices geotécnicos específicos, fixados em especificações técnicas pré-definidas

cientificamente.

Ainda de acordo com o DNIT (2006), quando esses materiais granulares ocorrem em jazidas, com designações tais como cascalhos, saibros etc., tem-se o caso de materiais naturais (solo in natura). Muitas vezes, esses materiais devem sofrer beneficiamento prévio, como britagem e peneiramento, com vista ao seu enquadramento nas especificações técnicas pré-determinadas.

Quando se utiliza uma mistura de material natural e pedra britada, tem-se as sub-bases e bases de solo-brita.

No caso de se utilizar exclusivamente produtos de britagem, tem-se as sub-bases e bases de brita graduada ou de brita corrida.

O DNIT (2006) define que as bases e sub-bases estabilizadas com aditivos, quase todas, são camadas que passam por processos tecnológicos e construtivos semelhantes às camadas que passaram por processo de estabilização granulométrica, diferente apenas em alguns detalhes.

Solo-cimento: é uma mistura devidamente compactada de solo, cimento Portland e água; a mistura solo-cimento deve satisfazer a certos requisitos de densidade, durabilidade e resistência, dando como resultado um material duro, cimentado, de acentuada rigidez à flexão. O teor de cimento adotado usualmente é da ordem de 6% a 10%.

Solo melhorado com cimento: esta modalidade é obtida mediante a adição de pequenos teores de cimento (2% a 4%), visando à modificação do solo no que se refere à sua plasticidade e sensibilidade à água; sem cimentação acentuada, são consideradas flexíveis.

Solo-cal: uma mistura de solo, cal e água e, às vezes, cinza volante, constituindo uma pozolana artificial. O teor de cal mais frequente é de 5% a 6%, e o processo de estabilização ocorre das seguintes formas:

- por modificação do solo, no que se refere à sua plasticidade e sensibilidade à água;
- por carbonatação, que é uma cimentação fraca; e
- por pozolanização, que é uma cimentação forte.

Senco (2008) define também que reforço do subleito é uma camada de espessura constante, construída acima da regularização do subleito. Esse reforço tem função de complemento da sub-base, com características tecnológicas superiores à da regularização e inferior à da sub-base.

Complementando, Senco (2008) ressalta que uma camada que existe em pavimentos muito espessos é executada com um único objetivo, o de minimizar a espessura da própria camada de sub-base. Essa camada pode ou não existir, dependendo muito das características dos materiais utilizados, do volume de tráfego de veículos, sendo dimensionada em projeto de sua construção.

Segundo Teixeira (2010), a estabilização química consiste em uma técnica de melhoramento permanente, com a incorporação de uma substância química ao solo natural. Os produtos mais aplicados, no âmbito da pavimentação, é o aglomerante cimento, em maior proporção, e a cal hidratada, onde por meio de reações químicas entre os grãos do solo e o material estabilizante resulta uma mistura com requisitos necessários para seu emprego.

Para Corteleti (2013), é muito importante, para obtenção de uma estabilização eficiente o conhecimento do princípio de atuação da substância adicionada, bem como das características do solo a ser tratado, pois a interação entre as partículas e o aditivo é distinta para cada procedimento, seja por cimentação, por modificação mineralógica, troca de íons, precipitação, dentre outros.

De acordo com Brito *et al.* (2017), a estabilização química pode ser executada com diferentes tipos de aditivos, como a cal, o cimento, a emulsão betuminosa, pozolanas, produtos industriais e resíduos industriais.

De acordo com Andrade (2012), 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. Também 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).

De acordo com Rezende (2003), 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; 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 pozolânicas é responsável pelo aumento da sua resistência (SILVA, 2007; VIZCARRA, 2010; SZELIGA, 2014).

De acordo com Brito e Paranhos (2017), alguns efeitos podem ser esperados pela adição de cal ao solo, como a modificação da granulometria do solo, devido à floculação, o aumento do limite de plasticidade (LP) e a redução do limite de liquidez (LL); e das variações de volume dos solos expansivos, assim como a redução da densidade e a elevação do teor da umidade; além do aumento da resistência à compressão simples.

De acordo com Alsafi *et al.* (2017), existem muitos estudos que discutem o uso de cinza volante para a estabilização de solos, com utilização prática como estabilizante consolidada. A cinza pode ser usada como agente estabilizador em bases, subgrades ou como taludes para reduzir a pressões laterais, além de contribuir para melhorar a resistência à compressão dos solos expansivos.

Ainda segundo Alsafi *et al.* (2017), as pesquisas mais recentes têm se concentrado no estudo da cinza volante geopolimerizada para estabilizar solos que possuem cálcio em sua composição mineralógica. A cinza volante geopolimerizada age como aglutinante, cobrindo e imobilizando as partículas de cálcio presentes no solo, para evitar o contato entre elas e água, impedindo a formação de gesso e etringita (C_6ASH_{32}), que são as principais causas de propagação de fissuras e colapso do solo endurecido. Além disso, o aglutinante pode fornecer propriedades resistentes ao sulfato.

Choobbasti *et al.* (2017), relatam que o tratamento do solo com agentes de cimento misturado à cal, gesso e cinzas volantes tem sido uma técnica de melhoria do solo praticada por muitos anos. Nos estudos de tratamento de solo, foram

realizadas várias pesquisas para investigar as propriedades mecânicas de um solo arenoso tratado com cimento, adicionando-se zeólita, vidro, fibra, cinzas volantes. Como resultado, verifica-se o aumento da rigidez do solo, maior resistência ao cisalhamento e à compressão, redução da compressibilidade e permeabilidade do material.

Segundo Choobbasti *et al.* (2017), recentemente, com o advento dos nanomateriais, iniciaram-se novos programas experimentais. Um deles, é o estudo do impacto da adição de nanosilica (nS) nas propriedades da microestrutura e nas características mecânicas da areia estabilizada com cimento. As pesquisas vêm mostrando que a nanosilica contribui para a formação de uma estrutura mais uniforme, bem como proporciona o aumento da intensidade do pico de hidrato de silicato de cálcio e de hidróxido de cálcio, resultando em melhorias nas propriedades mecânicas e na microestrutura do solo. Foi constatado também que a adição de partículas de nanosilica na estabilização de solo com cimento aumenta a coesão do material, assim como reduz o índice de plasticidade, contribuindo para melhoria da resistência do solo.

Segundo Pontes *et al.* (2013), embora a mineração seja uma atividade econômica importante para o desenvolvimento e a melhoria de vida da sociedade, seus efeitos e consequências devem ser analisados de forma detalhada, ressaltando-se o bem-estar socioambiental, sendo necessária a adoção de mecanismos que proporcionem a mitigação de impactos negativos ao meio ambiente.

Araújo *et al.* (2014) reforçam que a indústria extrativista mineral está entre as atividades antrópicas que mais causam impactos socioeconômicos positivos para a sociedade, no entanto são geradores de impactos ambientais negativos, afetando, portanto, o local do empreendimento mineral e o seu entorno.

Conforme Moura *et al.* (2002), atualmente grande parte da atividade de extração mineral é fonte geradora de resíduos, nas formas de gases, líquidos ou sólidos, podendo causar degradação ambiental e prejudicar o 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) relatam que a pesquisa sobre a reciclagem de

resíduos vem sendo intensificada em diversas partes do mundo, sendo a reciclagem 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, da fauna e da flora.

Complementando, Silva *et al.* (2008) destacam 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), embora comparativamente ocorra em 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.

Segundo Pontes *et al.* (2013), outros materiais potencialmente recicláveis são os rejeitos oriundos do corte e polimento de mármore e de outras rochas ornamentais, empregados na correção da acidez e na remineralização de solos. Somam-se a este contexto os rejeitos de calcários, que são utilizados na formulação de argamassa (SILVA *et al.*, 2008).

Barreto (2001) destaca alguns pontos relevantes sobre a sustentabilidade ambiental, tais como: buscar sempre 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-se um novo uso para esses materiais.

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.

De acordo com Possibom (2001), como não bastassem as discussões em torno da depredação ambiental, a exploração de calcário também preocupa pelas condições de trabalho reinante nessa atividade. Com efeito, nas minas, frequentemente, os trabalhadores são expostos a ruídos, vibrações, ao calor e à poeira sílica – que pode provocar fibrose pulmonar irreversível: silicose.

Leite, Silva e Barbosa (2003) ressaltam que para, não ser considerada uma indústria destrutiva, com alto potencial impactante não só sobre o ambiente, mas também para a população residente no entorno das áreas de mineração, e ao próprio

trabalhador, a atividade de extração mineral deve ser avaliada em sua totalidade: no seu ciclo produtivo, incluindo aí a reciclagem dos minerais ou de produtos deles derivados (vidros, metais, etc.); no uso que faz de novas tecnologias; no controle e na reabilitação da área ambiental atingida; na obediência a uma política ambiental que determine o que explorar e em que taxas, e na preocupação com as condições de trabalho nas minas.

A implementação das indústrias de calcário também geram impactos ambientais conhecidos pela sociedade, como pode ser constatado na definição de impacto ambiental: “qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causadas por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a fauna e a flora; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; e a qualificação dos recursos ambientais” (BARRETO, 1986).

5 MEIO AMBIENTE E MINERAÇÃO

Neste estudo o tema meio ambiente e mineração é abordado sob o ponto de vista do desenvolvimento sustentável das atividades dos empreendimentos de mineração de calcário e indústrias de cal em três áreas escolhidas para os estudos, localizadas nos municípios de Coreaú/Sobral, Forquilha e Quixeré, no estado do Ceará. O foco das pesquisas é o aproveitamento dos rejeitos advindos das indústrias de cal, na composição de misturas com solo argiloso, visando o seu emprego na construção de base na pavimentação de rodovias e de aterros especiais.

O aproveitamento desses rejeitos poderá proporcionar significativos benefícios, tanto ambientais com a sua retirada, bem como econômicos, com seu emprego na construção de estradas. São resíduos resultantes do calcário não calcinado que são acumulados ao redor dos fornos de cal, denominados de caieiras. Este trabalho tem como objetivo a elaboração desta tese de Doutorado. É resultante de estudos de campo realizados, através de visitas técnicas às empresas mineradoras de calcário e produtoras de cal, situadas nos municípios de Coreaú/Sobral, Forquilha e Quixeré, no estado do Ceará.

Sabe-se que, de um modo geral, a mineração causa impacto ao meio ambiente pois, quase sempre, o desenvolvimento dessa atividade implica em supressão de vegetação que, por sua vez, acarreta exposição do solo aos processos erosivos, às vezes afetando a qualidade dos recursos hídricos superficiais; podendo também causar poluição do ar, bem como outros impactos negativos. Portanto, os cuidados com a prevenção e a mitigação desses impactos fazem-se necessárias, com vista à preservação do meio ambiente.

Considerando-se que a mineração se constitui em uma atividade econômica de fundamental importância, contribuindo com o desenvolvimento do Brasil, inclusive do estado do Ceará. Por sua vasta aplicação, a industrialização dos calcários se reveste de fundamental relevância para a geração atual e futura. Como um dos setores básicos da economia, sabe-se que a mineração pode contribuir decisivamente para a melhoria da qualidade de vida da população. Para isto, considera-se necessário que haja uma atuação com responsabilidade social e ambiental, pautada nos preceitos do desenvolvimento econômico e social, ambientalmente sustentável.

A exploração dos recursos minerais pode implicar em alterações do meio

socioambiental da área do empreendimento, às vezes de forma positiva ou negativa. As alterações ou impactos adversos nos recursos ambientais e sociais devem ser alvo de controle direto, de responsabilidade do empreendedor e, indiretamente, dos órgãos públicos de fiscalização. O cumprimento da legislação e dos processos de licenciamento ambientais são ações fundamentais para o controle e a minimização dos impactos ambientais advindos dessa atividade.

No Brasil, muitas ações positivas na atuação do setor da mineração vêm sendo implementadas, principalmente nos últimos 30 anos, com a promulgação da Constituição de 1988. Também de fundamental importância, nesse sentido, é a evolução do amparo legal ambiental, seja a nível federal, seja a níveis estadual e municipal. Essas mudanças são também um reflexo das pressões dos ambientalistas, e das diretrizes internacionais. Esse despertar pelo zelo com a preservação do meio ambiente, cada vez mais, tem levado o mundo à conscientização da necessidade de os países envidarem ações visando o desenvolvimento sustentável, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida no planeta.

A atividade de exploração dos recursos minerais no estado do Ceará tem sido foco da Política Ambiental, com o respaldo de todo um instrumento legal, bem como de um sistema estruturado em órgãos ambientais voltados para o licenciamento, controle e fiscalização. Esse cuidado com a preservação ambiental também foca no estabelecimento de padrões de sustentabilidade socioambiental e na proposição de estratégias para o desenvolvimento sustentável.

Cabe destacar que, cada vez mais, por força de lei e por conscientização, o setor de mineração busca se adequar aos padrões ambientais exigidos, sob pena de sofrer sanções administrativas, civis e até penais. A sociedade também tem se mostrado mais consciente em relação às questões ambientais e sociais, e mais atenta às empresas que respeitam ou não o meio ambiente.

A exploração dos recursos minerais com sustentabilidade tem sido um grande desafio para as empresas, para o governo e para a sociedade em geral. Sabe-se que, para uma atuação eficaz visando o zelo com o meio ambiente, faz-se necessário que se busque continuamente a melhoria na conciliação das atividades de mineração com as questões socioambientais. Buscando-se como resultado a garantia do desenvolvimento econômico, e proporcionando o bem-estar social das atuais comunidades e futuras gerações, bem como zelando pela própria sustentabilidade do setor de mineração.

A participação ativa do empreendimento de mineração na construção do desenvolvimento sustentável é exigência cada vez maior da sociedade. Essa participação vem contribuindo para a recuperação e conservação ambiental, e para o fortalecimento e o desenvolvimento socioeconômico, resultando em significativos legados para as diversas esferas: econômica, social e ambiental. Mesmo assim, considera-se fundamental que continuamente sejam traçadas e implementadas estratégias que permitam aliar o desenvolvimento econômico e social advindo da mineração com a mitigação dos impactos adversos, resultando no efetivo desenvolvimento sustentável.

Além da avaliação dos impactos ambientais, o presente estudo tem também o objetivo de levantar os benefícios advindos da atividade de mineração do calcário aliada à indústria de cal.

Visando levantar os benefícios sociais advindos da atividade minero-industrial, foi aplicado um questionário (Trabalho de Campo) junto aos moradores da região dos empreendimentos das unidades produtivas e junto aos seus funcionários. Vale destacar que esses empreendimentos geram uma grande quantidade de empregos, diretos e indiretos, envolvendo os transportadores, produtores de lenha, transporte coletivo de funcionários, mecânico etc. Somando-se a esses benefícios sociais, cita-se a geração de divisas para o Município local do empreendimento e para o Estado, através da arrecadação de impostos.

6 MATERIAL E MÉTODOS

Para a composição das amostras, utilizadas para a realização dos ensaios geotécnicos, foi misturado o solo argiloso ao rejeito de caieira, em variados percentuais desses componentes.

6.1 Solo

O solo utilizado na composição das amostras de solo-rejeito é do tipo argilo-silto-arenoso, de coloração avermelhada, contendo raros pedregulhos de biotita-gnaiss, e de quartzo. Foi coletada uma única amostra de solo para composição das amostras, em torno de 90 kg, no município de Caridade, no estado do Ceará, à margem da rodovia BR 020, no seu km 381, a cerca de 115 km a oeste de Fortaleza. (Figura 9).

Figura 9 – Solo argiloso, utilizado na mistura solo-rejeito. Amostras coletadas em dezembro/2016.



Fonte: autora.

De acordo com a classificação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2018), pedologicamente o solo utilizado para a composição das misturas solo-rejeito classifica-se como um Luvisolos, constituído por material mineral, apresentando horizonte B textural, com argila de atividade alta e saturação por bases altas na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA) e imediatamente abaixo, de horizonte A ou horizonte E.

Conforme ainda EMBRAPA (2018), trata-se de solos que variam de bem a imperfeitamente drenados, sendo normalmente pouco profundos, com sequência de horizontes A, Bt e C e nítida diferenciação entre os horizontes A e Bt, devido ao contraste de textura, cor e/ou estrutura entre eles. A transição para o horizonte B textural é clara ou abrupta, e grande parte dos solos desta classe possui mudança textural abrupta. Podem ou não apresentar pedregosidade na parte superficial e caráter sódico na parte subsuperficial.

São solos moderadamente ácidos a ligeiramente alcalinos, com teores de alumínio extraível baixo ou nulos e com valores elevados para a relação molecular Ki no horizonte Bt, normalmente entre 2,4 e 4,0, denotando presença, em quantidade variável, mas expressiva, de argilominerais do tipo 2:1. (EMBRAPA, 2018).

6.2 Rejeito

Refere-se a um rejeito advindo do processo de calcinação do calcário e produção de cal, cujas amostras foram coletadas nas áreas estudadas, nas indústrias de cal.

As amostras de rejeitos utilizadas nos estudos foram coletadas em três áreas distintas: Coreaú/Sobral, Forquilha e Quixeré, no estado do Ceará, conforme as localizações apresentadas nas figuras 3, 5 e 7, previamente apresentadas.

Os rejeitos são resultantes do processo de beneficiamento da cal hidratada, que consiste no seu peneiramento em uma tela metálica de malha de 1” (uma polegada) (Figura 10). Esses resíduos são constituídos de uma mistura de pedras de calcário não calcinado, da rocha encaixante (arenito) e de restante da cal, então não hidratada totalmente, bem como um pouco de cinza.

Figura 10 – Tela metálica (peneira) utilizada no processo de peneiramento da cal.



Fonte: autora.

Vale salientar que esses rejeitos, por ainda não terem um destino útil adequado para o seu aproveitamento, acabam sendo acumulados ao redor dos fornos de cal (caieiras), formando verdadeiras pilhas de entulho (Figuras 11, 12 e 13).

Figura 11 - Pátio de uma unidade produtiva de cal, mostrando um acúmulo de rejeito ao redor da caieira, no município de Forquilha (CE). Foto de junho/2017.



Fonte: autora.

Figura 12 – Acúmulos de rejeito observado ao redor de uma caieira, no município de Sobral (CE). Foto de setembro de 2018.



Fonte: autora.

Figura 13 - Caieira na localidade de Aroeiras, município de Coreaú (CE). Foto de setembro de 2018.

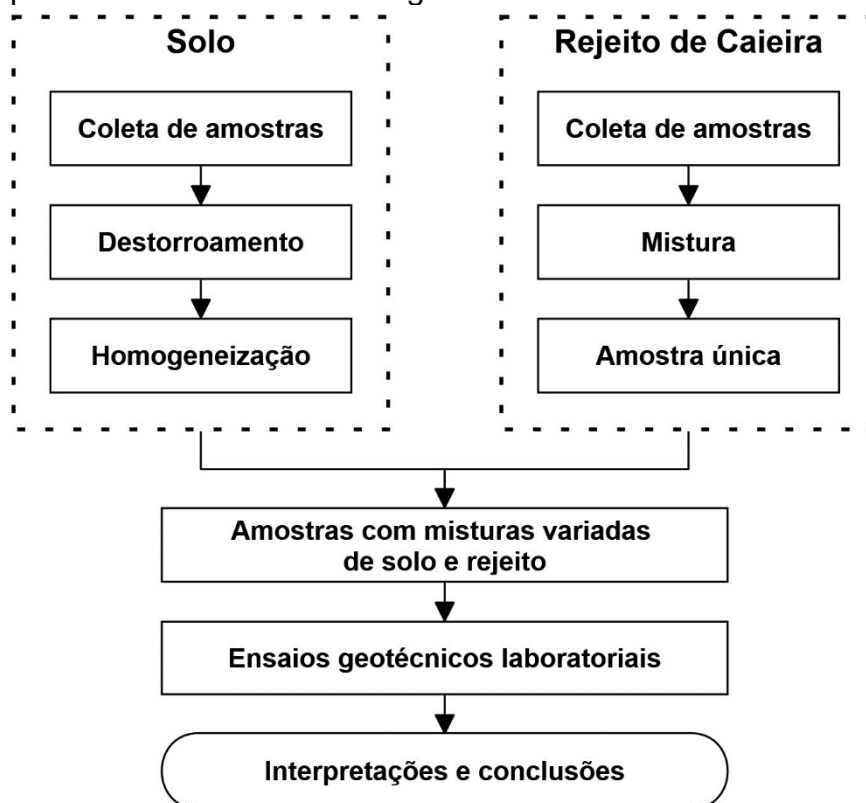


Fonte: autora.

6.3 Ensaio geotécnicos

Conforme já referido, os materiais utilizados neste estudo são o solo e os rejeitos das indústrias de calcinação de calcário, também denominados de rejeito de caieira. Visando proporcionar um melhor entendimento, com uma visualização resumida sobre os materiais empregados nas pesquisas e os procedimentos aqui adotados no provimento e preparação das amostras de solo-rejeito, adotando-se diferentes dosagens do rejeito, para serem submetidas a ensaios de caracterização geotécnica de laboratório (Figura 14).

Figura 14 – Fluxograma da metodologia empregada na dinâmica das coletas e composição das amostras e envio para laboratório de ensaios geotécnicos.



Fonte: Adaptado de Machado *et al.* (2015)

Em cada uma das três áreas adotadas para os estudos foram coletadas amostras de rejeito, cada uma pesando cerca de 18 kg. Para os ensaios geotécnicos de laboratório foram encaminhadas 21 amostras de rejeito, sendo que, 7 amostras para cada uma das três áreas. E uma amostra de solo, pesando ao todo cerca de 90 kg. As amostras de rejeito coletadas em cada área de pesquisa foram misturadas

manualmente, de modo a comporem uma única amostra homogênea, de cada área. Em seguida, partes desta amostra foram adicionadas a porções da amostra de solo, formando um conjunto de amostras de solo-rejeito, nos percentuais em rejeito de 0 (zero), 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80%, sendo que o percentual de 0% correspondente apenas ao solo e os demais formando a mistura solo-rejeito 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 acima citadas. Após esta preparação, as amostras foram submetidas aos ensaios geotécnicos de laboratório, para determinação dos seguintes índices físicos: Granulometria; Limite de Liquidez (LL); Índice de Plasticidade (LP); 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).

Os ensaios geotécnicos foram executados no laboratório de solos do Departamento de Edificações e Rodovias do Governo do Estado do Ceará (DER/CE), conformes os Apêndices D, E e F.

No intuito de tornar mais compreensível o diagnóstico dos resultados dos ensaios geotécnicos, apresenta-se a seguir as definições dos índices considerados parâmetros determinantes na caracterização de um material terroso adequado para seu emprego na construção de pavimento de estradas, bem como de obras similares. Esses índices são os de suporte Califórnia (ISC/CBR), de expansão, de plasticidade (IP), e o Índice de Grupo (IG).

O Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) 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 (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 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) 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.

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.

6.4 Caracterização química dos calcários

Com o objetivo de determinar a composição química dos calcários das áreas em estudo, foram realizadas análises por fluorescência de raios-x através do Laboratório de Física da Universidade Federal do Ceará – UFC.

Segundo Sousa (2014), a técnica de FRX consiste em submeter o átomo a um processo de irradiação proveniente de um tubo de Raios-X, no qual ocorre a excitação dos elétrons, que são ejetados das camadas eletrônicas mais internas. Para a estabilização do átomo, em frações de segundo, as vacâncias são imediatamente preenchidas por elétrons da camada externa, liberando uma diferença de energia existente entre os dois níveis eletrônicos envolvidos. No entanto, o processo de transição envolve níveis de energia que são característicos para cada elemento químico.

Para a realização dessas análises, primeiramente, as amostras de calcário foram moídas e devidamente peneiradas, de modo a obter-se uma seleção de partículas com granulação inferior a 200 *mesh*. Após este processo, as amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Física da UFC, para a realização das análises químicas, tendo sido empregado um equipamento da fabricante Rigaku, modelo ZSX Mini II.

A partir destas equações, verifica-se que a origem do calcário é quem define se a cal resultante tem magnésio ou não em sua composição; caso tenha, configura tratar-se de um calcário magnesiano. Durante o processo de calcinação, há a necessidade de se controlar as temperaturas empregadas, pois caso as

temperaturas do processo de calcinação forem demasiado elevadas, resultam em um produto sobre calcinado, de lenta hidratação. Isto ocorre devido ao aumento da cristalinidade dos óxidos a altas temperaturas, e, se as temperaturas forem demasiadamente baixas, a cal virgem obtida contém uma parcela do carbonato original que a inviabiliza para os serviços de estabilização, de acordo com (HERRIN; MITCHEL, 1967).

Ressalta-se que o método FRX tem sido amplamente utilizado para a análise da composição química de calcário, por ser uma técnica não destrutiva e rápida nas determinações, permitindo a obtenção dos resultados em menos de cinco minutos, por não necessitar de pré-tratamento das amostras, bem como por realizar determinações de muitos elementos simultaneamente, que variam do sódio ao urânio (HAN *et al.*, 2006; SALVADOR, 2006; SALVADOR, 2010).

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados desta pesquisa foram publicados em periódicos indexados e com classificação no Qualis Referência (classificação 2017-2020).

A Revista de Geologia (ISSN 0103-2410, Qualis B4), no seu Vol. 31, nº 1, de 2018, publicou parte de alguns resultados das pesquisas objetos desta tese, até então obtidos. Esses resultados são referentes aos estudos geotécnicos para avaliação do efeito dos rejeitos das indústrias de cal da Área 2, do município de Forquilha, sob o título: Investigação da Viabilidade Técnica do Aproveitamento dos Rejeitos das Indústrias de Cal do Município de Forquilha - CE, com Foco na Reparação de Dano Ambiental (Apêndice A).

Por vez, no seu volume 13, nº 03, de 2020, a Revista Brasileira de Geografia Física (ISSN 1984-2295, Qualis A2) publicou um artigo expondo os resultados das pesquisas geotécnicas visando o aproveitamento racional e econômico dos rejeitos das indústrias de cal das áreas dos municípios de Coreaú/Sobral, Forquilha e Quixeré. Esse artigo foi publicado sob o título: Aproveitamento dos Rejeitos das Indústrias de Calcinação de Calcário na Porção Setentrional do Estado do Ceará, com foco na reparação de dano ambiental (Apêndice B).

7.1 Análise socioambiental

Visando levantar os benefícios sociais advindos da atividade mineroindustrial, foi aplicado um questionário (Apêndice C) junto aos moradores da região dos empreendimentos das unidades produtivas e junto aos seus funcionários. Vale destacar que esses empreendimentos geram uma grande quantidade de empregos, diretos e indiretos, envolvendo os transportadores, produtores de lenha, transporte coletivo de funcionários, mecânico etc. Somando-se a esses benefícios sociais, cita-se a geração de divisas para o Município local do empreendimento e para o Estado, através da arrecadação de impostos.

Com base nos resultados dessas pesquisas, foi possível propor soluções para atenuar os danos advindos dessa atividade mineroindustrial.

Nesse contexto, para uma avaliação dos possíveis problemas sociais e ambientais, realizou-se uma análise cujos resultados estão indicados nos quadros 1

e 2, a seguir.

As atividades mineroprocessuais são realizadas em diversas etapas operacionais. Primeiramente, vem a extração do calcário é realizada através de detonação de explosivos. Em seguida, é feita a calcinação do calcário, gerando a cal. Na sequência, vem o beneficiamento da cal, seu transporte; envolvendo também a deposição dos rejeitos, no entorno das caieiras. Vale ressaltar que esses procedimentos operacionais são indispensáveis para o desenvolvimento desses empreendimentos, embora possam causar os impactos ambientais adversos apontados no quadro 1.

Quadro 1 – Atividades de mineração e indicação de medidas mitigadoras de controle dos impactos ambientais.

Atividade	Impacto	Grau de importância	Medidas mitigadoras
Beneficiamento, transporte e armazenamento	Poeiras nas áreas residenciais e riscos à saúde dos funcionários devido às partículas de SiO ₂ suspensas.	Médio	Controlar a poeira fugitiva; molhar as estradas; utilizar filtro para aspirar o pó no beneficiamento; uso de cortina vegetal.
Detonações das rochas	Incômodo aos moradores locais, como ruídos.	Alto	Ter um controle de monitoramento de ruídos; utilização de protetor auricular como EPI de segurança.
Armazenamento de estéril e rejeitos a céu aberto	Contaminação do lençol freático; visual e ambiental.	Alto	Monitorar a qualidade da água com testes laboratoriais; não colocar a pilha de estéril em locais como zonas de fraturas ou solo com alta permeabilidade.
Água da chuva	Erosão dos taludes	Baixo	Incidência de pouca chuva.
Água subterrânea	Enchimento da cava explorada.	Baixo	Bombeamento de água e análise constante do pH.
Beneficiamento do minério em fornos (caieiras)	Depredação da fauna e flora; retirada da mata nativa; impacto visual; emissão de dióxido de carbono devido à queima.	Médio	Não deixar o solo exposto aos agentes intempéricos por longos períodos; retirada do material resultante dos rejeitos.

Fonte: elaborado pela autora.

Embora a atividade seja potencialmente causadora de impactos ambientais adversos, a adoção de medidas mitigadoras, que neste contexto são de fácil procedimento, pode atenuar esses impactos. Por outro lado, a implantação de empresas mineradoras também traz impactos benéficos, com a geração de benefícios sociais, traduzidos pelo desenvolvimento econômico para a população do local do empreendimento e de seu entorno, conforme apontados no quadro 2.

Quadro 2 – Benefícios sociais implantados em decorrência de um empreendimento miner industrial.

Atividade	Impacto	Grau de importância
Implementação de escola	Desenvolvimento político-social	Alto
Lazer esportivo	Qualidade de vida para empregados na região	Alto
Limpeza e manutenção	Qualidade de vida para os moradores	Alto
Poços artesianos	Tratamento de água para os moradores	Alto
Meios de comunicação	Ligados com o mundo	Alto

Fonte: elaborado pela autora.

7.2 Parâmetros geotécnicos

Quanto aos resultados dos ensaios geotécnicos das 21 amostras de misturas solo-rejeito, sendo sete correspondentes a cada uma das três áreas de onde foram coletadas as amostras de rejeitos, bem como a referente à amostra de solo argiloso (sem o rejeito), totalizando 22 amostras. Esses ensaios definiram os índices físicos dessas amostras (Tabelas 1, 2 e 3).

O solo utilizado na mistura solo-rejeito foi o mesmo para todas as amostras. Os ensaios foram executados no laboratório de solos do Departamento de Edificações e Rodovias do Governo do Estado do Ceará – DER/CE.

Em termos geotécnicos, de acordo com sua granulometria (Tabela 4), o seu Índice de Plasticidade (IP), o solo utilizado para composição das amostras de misturas solo-rejeito caracteriza-se como um material argilo-silto-arenoso, de coloração avermelhada. Trata-se de um solo pertencente ao subgrupo A-2-6, por apresentar percentual granulométrico passando na peneira 200 igual a 35% e seu índice de

plasticidade (IP) com 13%. Isso configura tratar-se de um material argiloso de alta plasticidade.

Tabela 1 – Caracterização geotécnica das amostras das misturas compostas de rejeito e de solo argiloso, referentes à Área 1 – de Coreaú / Sobral.

Amostra Nº	Solo (%)	Rejeito (%)	CBR (%)	Exp. (%)	LL	IP	IG	Class. HRB
1	100	0	4	2,78	31	13	2	A-2-6
2	80	20	24	0,30	NL*	NP*	0	A-2-4
3	70	30	39	1,83	NL*	NP*	0	A-2-4
4	60	40	55	0,09	NL*	NP*	0	A-1-b
5	50	50	52	0,00	NL*	NP*	0	A-1-b
6	40	60	47	0,09	NL*	NP*	0	A-1-b
7	30	70	71	0,17	NL*	NP*	0	A-1-b
8	20	80	55	0,17	NL*	NP*	0	A-2-4

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

IP: Índice de Plasticidade

IG: Índice de Grupo

Clas. HRB: Grupo *Highway Research Board*

NL*: Não líquido

NP*: Não plástico

Tabela 2 – Caracterização geotécnica das amostras das misturas compostas de rejeito e de solo argiloso, referentes à Área 2 – Forquilha.

Amostra Nº	Solo (%)	Rejeito (%)	CBR (%)	Exp. (%)	LL	IP	IG	Class. HRB
1	100	0	4	2,78	31	13	2	A-2-6
2	80	20	28	2,35	39	10	1	A-2-6
3	70	30	24	1,57	34	12	0	A-2-6
4	60	40	26	1,48	35	10	0	A-2-6
5	50	50	30	0,83	34	9	0	A-2-4
6	40	60	45	0,7	35	8	0	A-2-4
7	30	70	53	0,61	39	9	0	A-2-4
8	20	80	48	1,39	36	8	0	A-2-4

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

IP: Índice de Plasticidade

IG: Índice de Grupo

Clas. HRB: Grupo *Highway Research Board*

NL*: Não líquido

NP*: Não plástico

Tabela 3 – Caracterização geotécnica das amostras das misturas compostas de rejeito e de solo argiloso, referentes à Área 3 – Quixeré.

Amostra Nº	Solo (%)	Rejeito (%)	CBR (%)	Exp. (%)	LL	IP	IG	Class. HRB
1	100	0	4	2,78	31	13	2	A-2-6
2	80	20	27	0,00	NL*	7	1	A-4
3	70	30	38	0,00	NL*	2	0	A-4
4	60	40	31	0,00	NL*	NP*	0	A-4
5	50	50	30	0,00	NL*	NP*	0	A-4
6	40	60	42	0,90	NL*	NP*	0	A-4
7	30	70	57	0,00	NL*	NP*	1	A-4
8	20	80	54	0,00	NL*	NP*	0	A-4

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

Clas. HRB: Grupo *Highway Research Board*

Tabela 4 – Caracterização geotécnica da granulometria das amostras compostas de rejeito e de solo argiloso, referentes às Áreas 1 – Coreau/Sobra; Área 2 – Forquilha e Área 3 – Quixeré.

Amostra Nº	Solo (%)	Rejeito (%)	Granulometria (%) passa peneira					
			Área 1 Coreau/Sobra		Área 2 Forquilha		Área 3 Quixeré	
			Nº 40	#200	Nº 40	#200	Nº40	#200
1	100	0	61	35	61	35	61	35
2	80	20	48	27	68	46	56	36
3	70	30	50	28	44	21	58	41
4	60	40	43	24	56	37	56	38
5	50	50	43	23	50	27	62	47
6	40	60	45	25	44	25	62	46
7	30	70	44	25	43	24	62	47
8	20	80	47	26	47	28	66	52

Fonte: elaborada pela autora.

Na busca por obtenção de um material terroso de boas características técnicas para seu emprego na pavimentação de rodovia e para aterros especiais,

comumente faz-se necessária a correção do solo disponível, proporcionando-lhe características geotécnicas que atendam às exigências do projeto. Sabe-se que existem diversos meios tecnológicos para corrigir e estabilizar os solos, sendo fundamental conhecê-los adequadamente, de modo a fazer-se uma escolha correta desses corretivos - técnica e economicamente. O emprego do rejeito de caieira é um deles, conforme aqui demonstrado pelos resultados dos ensaios geotécnicos.

Contatou-se que, ao se misturar ao solo um determinado percentual do rejeito de caieira, o solo adquiriu, em geral, uma crescente resistência física, à proporção que a dosagem (percentual) foi aumentada.

A estabilização química do solo utilizado neste estudo ocorre devido à reação da cal com o solo argiloso, de granulometria média a fina. Essa reação proporcionou ao solo mudanças na plasticidade, expansão, bem como na sua estabilidade. Sabe-se que, ao incorporar o rejeito ao solo, podem ocorrer variadas reações químicas simultaneamente, destacando-se a troca catiônica, floculação, carbonatação e reações de sedimentação.

A adição do rejeito de caieira a um solo argiloso pode proporcionar à mistura solo-rejeito um significativo aumento na solubilidade da sílica e da alumina, acarretando uma elevação do pH dessas misturas. Isto acontece em decorrência da troca de cátions entre o solo 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 a trabalhabilidade do solo, enquanto a reação pozolânicas é responsável pelo aumento da sua resistência.

Ao avaliar os resultados dos ensaios geotécnicos, observa-se que o rejeito, ao ser incorporado ao solo para composição das amostras de solo-rejeito, contribuiu com umas 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 e Índice de Plasticidade (IP).

Segundo DER/CE (2005), é considerado aceitável para construção de uma base de pavimento rodoviário um solo com CBR a partir de 25%, com a aplicação da

energia intermediária, enquanto para construção de um revestimento primário, um solo com CBR a partir de 18% já é considerado de qualidade satisfatória. Embora, por maior segurança, recomende-se um valor a partir de 20%. Revestimento primário é definido como sendo 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.

Os resultados encontrados dos valores de CBR, e comprovados através dos ensaios geotécnicos desses estudos, apontam que a partir de 20% de rejeito incorporado ao solo, já é considerado aceitável para aplicação em revestimento primário, na construção de pavimento de uma estrada. E que, com 40% de rejeito aplicado na mistura solo-rejeito, é aceitável para construção de uma base de pavimento rodoviário. Considerando os resultados obtidos nas análises dos ensaios geotécnicos das três áreas estudadas.

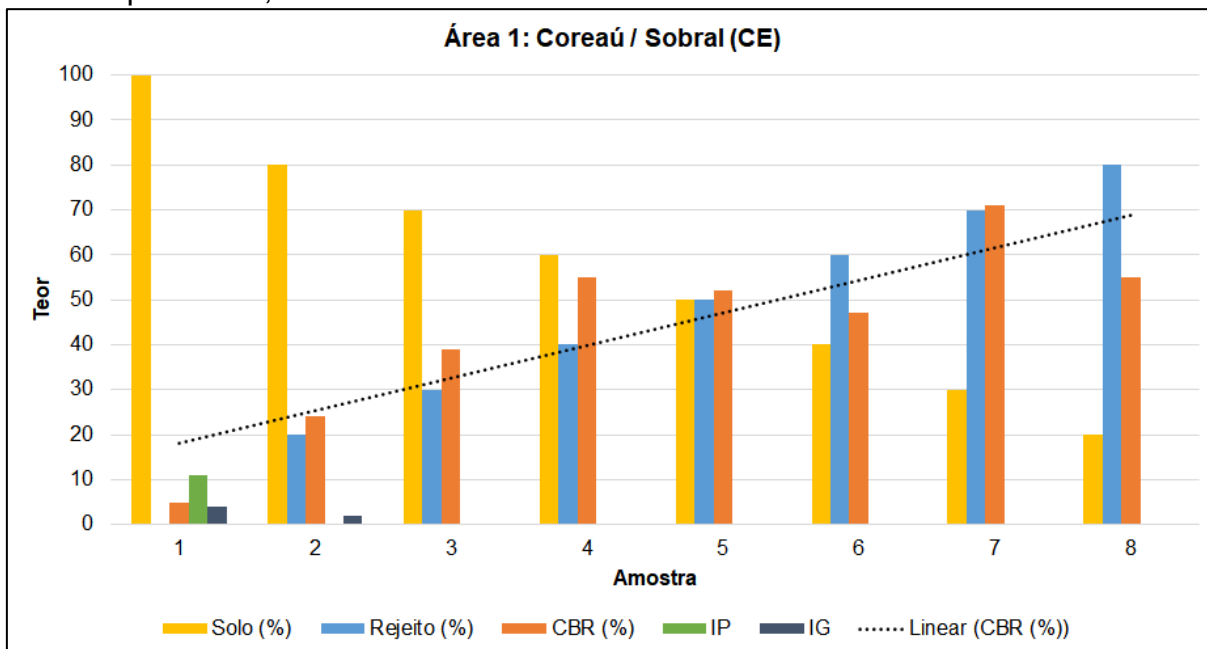
Neste contexto, um solo com caráter mais argiloso, que é o material mais comum nas estradas que apresentam maior frequência de problemas críticos de trafegabilidade, pode ser beneficiado, pois esses solos argilosos, se estabilizados adequadamente, adquirem propriedades físicas satisfatórias para construção de base de revestimento primário de uma rodovia.

A resistência física é medida pelo Índice de Suporte Califórnia (CBR). O desempenho deste índice em decorrência da adição do rejeito ocorre devido à estabilização química proporcionada pela sua incorporação ao solo, conforme resultados apontados nas tabelas 1, 2, 3 e 4.

Embora seja de se esperar que a adição de rejeito na composição das amostras proporcionasse um aumento crescente e contínuo do índice CBR das misturas, à medida que fosse aumentando a sua dosagem. No entanto, verificou-se que ocorreram incoerências, como no caso das amostras do lote 1 (Coreaú/Sobral), onde a amostra 4 (com 40% de rejeito) teve CBR de 55%, enquanto 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 a amostra 7 (com 70% de rejeito) apresentou índice de 71%, e a da amostra 8 (com 80% de rejeito) apresentou um CBR de 55%. Este fato também ocorreu de maneira similar com as amostras 2 e 3. Apesar destas variações, observou-se a tendência crescente do CBR partindo da amostra 2 (com 20% de rejeito), os valores dos parâmetros geotécnicos entre as amostras ensaiadas, confirmando a propensão geral de melhoria da

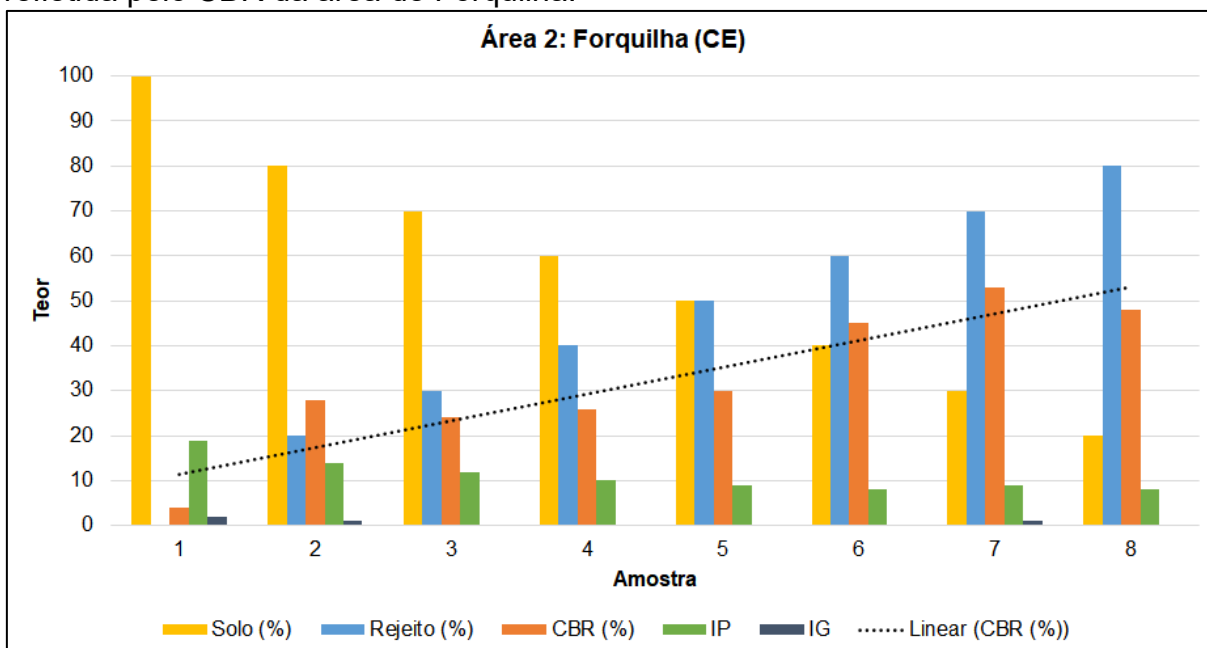
qualidade do solo, que ao ser misturado o rejeito, já apresentou variações em seu CBR (Gráficos 1, 2 e 3).

Gráfico 1 - Efeito do rejeito de cal hidratada na estabilização de um solo argiloso, refletida pelo CBR, concernente à área de Coreaú / Sobral.



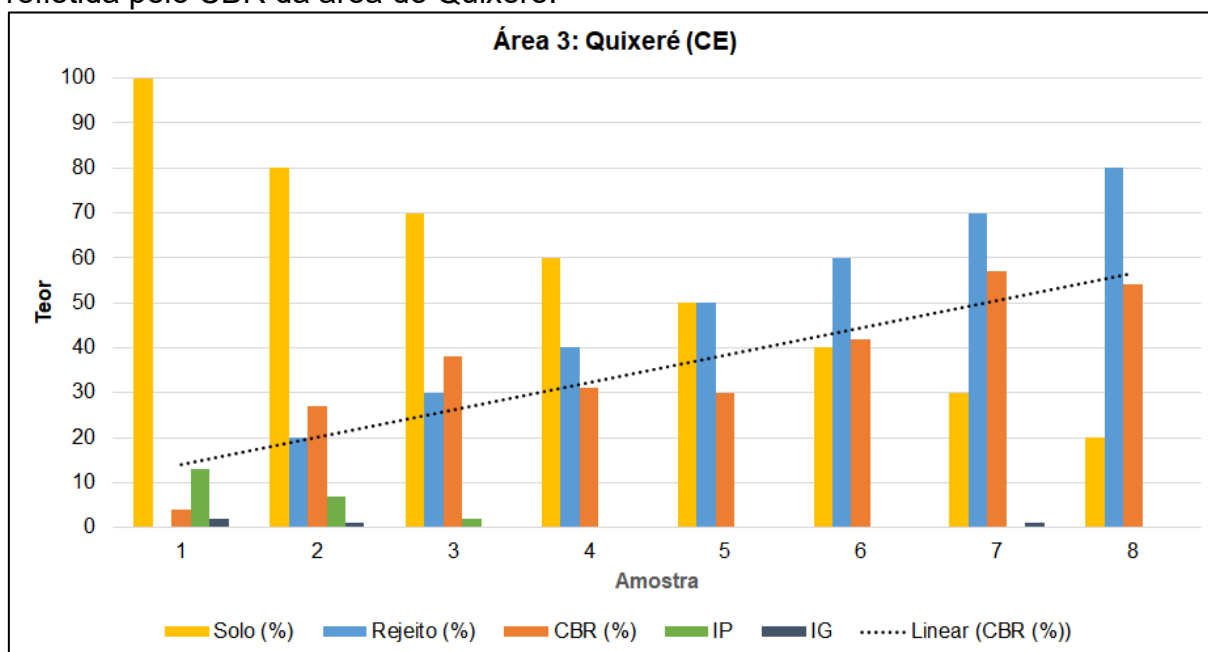
Fonte: elaborado pela autora.

Gráfico 2 - Efeito do rejeito de cal hidratada na estabilização de um solo argiloso, refletida pelo CBR da área de Forquilha.



Fonte: elaborado pela autora.

Gráfico 3 - Efeito do rejeito de cal hidratada na estabilização de um solo argiloso, refletida pelo CBR da área de Quixeré.



Fonte: elaborado pela autora.

As variações dos índices CBR entre as amostras, das três áreas 1, 2 e 3, podem refletir mudanças químicas da rocha-fonte dos resíduos; possibilidade de maior quantidade de cal ou cinza, ao serem misturados os rejeitos ao solo. Os calcários de cada uma das três áreas possuem gêneses diferentes, recomendando-se assim um estudo mais aprofundado na química destes materiais, como a Difractometria de raios X, a fim de gerar uma melhor explicação para cada um de seus resultados.

Comparando-se os resultados dos ensaios geotécnicos de todas 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 50% de rejeito evidenciou uma variação dos valores de CBR para 52%, 30% e 30%, respectivamente, indicando que as misturas nestes teores já podem ser aproveitadas, satisfatoriamente, para a construção de uma base de pavimento e aterros especiais.

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 na composição das misturas solo-rejeito, a expansão foi decrescendo, configurando o processo de estabilização do solo.

A redução do Índice de Plasticidade (IP) também corroborou com os resultados sobre o efeito estabilizante do rejeito. Nas amostras 1, compostas apenas de solo, o valor de IP foi de 13%. Já as amostras 2, que contaram com adição de 20% de rejeito, influenciou a queda do IP em todas elas, correspondentes às áreas 1, 2 e 3. Passando para 0% na área 1; 10% na amostra da área 2 e 7% na amostra da área 3, 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 as amostras 1 de todos os lotes, compostas somente de solo.

As investigações geotécnicas, através da classificação HRB (Highway Research Board), também retrataram as características das amostras ensaiadas. Essa classificação é função da granulometria e da 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 realizados nas amostras de solo-rejeito referentes a Área -1 - Coreaú/Sobral, esses materiais estão inseridos nos grupos A-1 e A-2, revelando tratar-se de um solo do tipo granular, sendo que as amostras nº 2, 3 e 8 correspondem ao subgrupo A -2- 4, enquanto as amostras de nº 4 a 7 estão enquadradas no subgrupo A-1-b.

As amostras referentes à Área 2 – Forquilha, todas as amostras estão inseridas no grupo A-2, revelando tratar-se de um solo do tipo granular, sendo que as amostras de nº 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) igual a 10%. Isto configura tratar-se de um material argiloso de alta plasticidade. Já as amostras de nº 5 a 8 estão enquadradas no subgrupo A-2-4, uma vez que apresentam 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.

Quanto as amostras de solo-rejeito relativas à Área – 3 – Quixeré, de acordo com os resultados apresentados pelos ensaios, as amostras de nº 2 a 8, estão

inseridas no grupo A-4, tratando-se de um solo siltoso com percentual maior que 35% passando na peneira 200.

Com relação às análises químicas dos calcários, como pode-se verificar os dados expressos na tabela 5, constata-se que as análises químicas revelaram que os calcários das áreas de Coreaú/Sobral e Quixeré são do tipo calcítico, enquanto o calcário da área de Forquilha é do tipo magnésiano.

Tabela 5 – Composições químicas das rochas carbonáticas (calcários), analisados através do método de fluorescência de Raios-X.

Composto Químico (%)	Procedência			
	Coreaú	Sobral	Forquilha	Quixeré
Al ₂ O ₃	0,2276	-	-	0,4350
SiO ₂	1,0751	0,4886	0,2035	1,1211
K ₂ O	0,2100	0,1484	0,0722	0,3330
CaO	96,688	97,033	93,261	96,635
Fe ₂ O ₃	1,1437	0,7325	0,4838	1,2201
SrO	0,6556	0,9004	-	0,0807
P ₂ O ₅	-	0,1580	0,1231	0,1277
SO ₃	-	0,0704	-	0,0473
MgO	-	-	5,8018	-
Cl	-	-	0,0547	-
Rh ₂ O ₃	-	0,4685	-	-

Fonte: elaborada pela autora.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

8.1 Conclusões

Ao avaliar os resultados dos ensaios geotécnicos, conclui-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 Índice de Suporte Califórnia (ISC/CBR), Expansão, Índice de Plasticidade (IP) e Índice de Grupo (IG).

As melhorias dos parâmetros geotécnicos do solo a partir da incorporação dos rejeitos de caieira refletem a viabilidade técnica do aproveitamento desses resíduos. Com base nos resultados obtidos, consta-se a adequação técnica, através de correções dos solos para construção ou recuperação de vias, especialmente aqueles cujas jazidas ao lado ou localizadas a pouca distância. O aproveitamento desses solos implica na redução dos transportes. No que concerne especialmente às vias de pouco movimento de veículos, a sua pavimentação pode ser feita com revestimento primário, que possui, relativamente, baixo custo operacional.

Diante desta realidade, entre os materiais utilizáveis na construção de base e sub-base de pavimentos, estão os solos estabilizados granulométrica ou quimicamente. É muito comum que o solo existente no local de uma obra rodoviária não apresente as propriedades e características físicas satisfatórias para construção de camada de base capaz de suportar os esforços exigidos pelo tráfego, bem como resistir às intempéries do tempo.

Os ensaios geotécnicos revelaram que a incorporação do rejeito de caieira na mistura solo-rejeito, proporcionou uma significativa performance na estabilização do solo. Isto está retratado pela redução da plasticidade e expansão do solo, bem como o aumento na sua trabalhabilidade e na resistência ao cisalhamento. Logo, o ganho na capacidade de suporte do solo reflete um dos principais efeitos da sua estabilização.

Os valores do CBR, revelados através dos ensaios geotécnicos desses estudos, apontam que, a partir de um percentual de 20% de rejeito incorporado ao solo, já é considerado suficiente e aceitável para aplicação na construção de revestimento primário e de pavimento de uma rodovia. E que, com a incorporação de 40% de rejeito à mistura solo-rejeito, é tecnicamente satisfatório para construção de

uma base de pavimento rodoviário. Considerando os resultados obtidos nas análises dos ensaios geotécnicos das três áreas estudadas.

O aproveitamento destes materiais poderá promover a redução, ou mesmo a reparação, de danos ambientais, pois esses materiais alternativos estabilizados podem substituir solos granulares naturais, evitando-se a supressão da cobertura vegetal e da extração destes solos.

Por fim, conclui-se que os rejeitos das indústrias de cal dos municípios de Coreaú/Sobral (Área 1); de Forquilha (Área 2); e de Quixeré (Área 3) podem ter uma destinação racional, reduzindo seu risco de dano ambiental e proporcionando às estradas locais melhores condições de trafegabilidade e durabilidade.

8.2 Recomendações

Entende-se que as pesquisas a que se propôs o projeto de elaboração desta Tese de Doutorado cumpriram plenamente os seus objetivos. Vale ressaltar, no entanto, que, na composição das misturas solo-rejeito, a massa residual advinda das indústrias de cal não foi submetida a uma redução dos seus componentes rochosos maiores. O que realmente entrou na composição das amostras de solo-rejeito foram os resíduos que ficaram retidos na peneira utilizada pelos produtores de cal, de malha de 1" (uma polegada), utilizada nos processos de beneficiamento da cal.

Porém, na massa dos rejeitos retida na referida peneira estão incluídos pedaços do calcário e da rocha encaixante (arenito) de vários tamanhos, chegando até a mais de 10 cm de diâmetro. Diante destas características de composição, esses pedregulhos graúdos, por limitações técnicas para realização dos ensaios geotécnicos, visando o seu emprego não foram incluídos na composição das amostras submetidas aos ensaios geotécnicos realizados nos estudos.

Portanto, tendo em vista as limitações anteriormente descritas, recomenda-se que sejam realizados estudos visando avaliar a viabilidade técnica, socioeconômica e ambiental, para o aproveitamento integral de toda a massa dos rejeitos de caieira. Como se sabe, para que esse aproveitamento ocorra em sua totalidade, faz-se necessário que os pedregulhos graúdos sejam submetidos a um processo de britagem, permitindo a sua incorporação aos materiais finos, o que poderá contribuir ainda mais com os efeitos de estabilização de solo argiloso.

As variações dos índices CBR entre as amostras, das três áreas 1, 2 e

3, podem refletir mudanças químicas da rocha-fonte dos resíduos; possibilidade de maior quantidade de cal ou cinza, ao serem misturados os rejeitos ao solo. Os calcários de cada uma das três áreas possuem gêneses diferentes, recomendando-se assim um estudo mais aprofundado na química destes materiais, como a Difractometria de raios X, a fim de gerar uma melhor explicação para cada um de seus resultados.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Solo: Ensaio de Compactação**. NBR 7182. Rio de Janeiro. 10 f. 1968.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Solo: Determinação do Limite de Liquidez**. NBR 6459. Rio de Janeiro. 6 f. 1984.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Solo: Determinação do Limite de Plasticidade**. NBR 7180. Rio de Janeiro. 3 f. 1984.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Solo: Índice Suporte Califórnia**. NBR 9895. Rio de Janeiro. 14 f. 1987.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Análise granulométrica**. NBR-7181. Rio de Janeiro, 1984.
- ALSAFI, S.; FARZADNIA, N.; ASADI, A.; HUAT, B. K. **Collapsibility potential of gypseous soil stabilized with fly ash geopolymer; characterization and assessment**. *Construction and Building Materials*, v. 137, p. 390–409, 2017.
- ANDRADE, Clarice. **Materiais para Construção Civil a Base de Cinzas de Madeira, Lodo de ETA e Resíduos da Produção de Cal**. 2012. 56 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná.
- ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. **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*, 2003, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo, 2003.
- ARAÚJO, E. R.; OLIVIERI, R. D.; FERNANDES, F. R. C. **Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente**. CETEM/MCTI, 2014.
- BARRETO, M.L. **Ensaio sobre a Sustentabilidade da Mineração no Brasil**. Rio de Janeiro, CETEM/MCT. 130 f. 2001.
- BERNUCCI, L. B; MOTTA, L. M. G; CERATI, J. A. P; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**. Rio de Janeiro, 2007.
- BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. **Sumário Mineral**. Brasília. 2005.
- BRITO, L. C.; PARANHOS, H. S. Estabilização de Solos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. v. 6, n. 1, p. 425-438, 2017.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações. Fundamentos**, volume 1. 6ª Edição. Editora LTC. Rio de Janeiro. 1988.

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. **Mapa geológico do Estado do Ceará – Escala 1:500.000**. Fortaleza, Ministério das Minas e Energia/Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). 2003.

CEARÁ, IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Perfil Básico Municipal**, Fortaleza – CE, 2021. Disponível em: <http://www.ipece.ce.gov.br> Acessado em 10 jan. 2022.

CHOOBBASTI, A. J.; KUTANAEI, S. S. Microstructure characteristics of cement-stabilized sandy soil using nanosilica. *In: Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 9, n. 5, p. 981-988, 2017.

CORTELETI, Estevo José Baraldi. **Melhoramento do solo residual de lajeado com adição de cal**. 57 f. Monografia - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2013. Disponível em: <https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/376/1/EstevãoCorteleti.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2016.

DNIT (2006). **Manual de Pavimentação. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. Publicação IPR 719**, 3 ed. Rio de Janeiro, RJ. 278p.

DNIT 137/2010 - ES - **Regularização do subleito** - Especificação de serviço DER/CE. Departamento de Edificações e Rodovias do Estado do Ceará. **Especificações Gerais para Serviços**. Fortaleza. 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 049/94. **Solos - determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 129/94: **Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1994. 5p

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

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Informações Técnicas. 2018. P. 95. 5 ed. Brasília, DF.

HAN, X.Y.; ZHUO, S.J.; SHEN, R.X.; WANG, P.L.; JI, A. **Comparison of the quantitative results corrected by fundamental parameter method and difference calibration specimens in X-ray fluorescence spectrometry**, *In: Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. V. 97, p. 68-74, 2006.

HERRIN, M.; MITCHELL, H. Lime-Soil Mixtures. **Highway Research Board**, v. 304, p. 99-121, 1961.

LAUFER, B. **Chinese Clay Figures, Part 1: Prolegomena on the History of Defensive Armor**. Kessinger Publishing: Whitefish, 1967.

LEITE, Ana Lúcia de Souza; SILVA, C. M. Gonçalves da; BARBOSA, R. da Silva. **Análise ergonômica no processo produtivo da extração de calcário laminado - estudo de caso**. In: XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Ouro Preto, 21 - 24 out. 2003. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2003_TR0403_0902.pdf. Acesso

LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; SILVA, C. H. C. **Estabilização de Solos II - Técnicas e Aplicações a Solos da Microrregião de Viçosa**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa – Imprensa Universitária. 32 f. 1993.

MACHADO, Francisco Pessoa. **Aproveitamento de Rejeito de Caieira na Pavimentação de Estradas Vicinais: Mitigação de Dano Ambiental**. Fortaleza, Nova Edições Acadêmicas. 64 f. 2014

MACHADO, F.P.; PESSOA, A. C. C.; SABADIA, J. A. B. **Aproveitamento de Rejeitos de Caieiras na Melhora Significativa da Resistência dos Índices de Pavimentação de Estradas e Mitigação de Dano Ambiental**. Revista de Geologia, v. 28, n. 1, p: 53-70, 2015.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p: 303-313, 2002.

MOURA, A. W.; GONÇALVES, J. P.; LEITE, R. S. **Utilização do Resíduo de Corte de Mármore e Granito em Argamassas de Revestimento e Confecção de Lajotas para Piso**. *Sitientibus*, v. 26, p: 49-61, 2002

MOUSAVI, S. E.; KARAMVAND, A. Assessment of strength development in stabilized soil with CBR PLUS and silica sand. In: **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, v. 4, n. 4, p: 412-421, 2017.

PESSOA, A.C.C; MACHADO, F.P.; SILVA NETO, C.A.; SABADIA, J.A.B. **Investigação da Viabilidade Técnica do Aproveitamento dos Rejeitos das Indústrias de Cal do Município de Forquilha- CE, Com Foco na Reparação de Dano Ambiental**. Revista de Geologia, Vol.31, nº 1, 7-22- 2018. Fortaleza – CE.

PESSOA, A.C.C; MACHADO, F.P.; SILVA NETO, C.A.; SABADIA, J.A.B.; DUARTE, C.R.; VERÍSSIMO, C.U.V. **Aproveitamento dos rejeitos das indústrias de calcinação de calcário na porção setentrional do estado do Ceará com foco na reparação de dano ambiental**. Revista Brasileira de Geografia Física, v.13, n.03. Recife, .2020.

PONTES, J. C.; FARIAS, M. S. S.; LIMA, V. L. A. **Mineração e seus reflexos socioambientais: Estudo de Impactos de vizinhança (EIV) causados pelo desmonte de rochas com uso de explosivos. POLÊM! CA**, v. 12, n. 1, p: 77-90, 2013.

POSSIBOM, W. L. P. NRs 7,9 e 17 PCMSO – PPRA- **Ergonomia: Métodos para a elaboração dos programas**. LTR, São Paulo, 2001

REZENDE, Lilian Ribeiro de. **Estudo de Comportamento de Materiais Alternativos Utilizados em Estruturas de Pavimentos Flexíveis**, 2003. 372 f. Tese de Doutorado em Geotécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. 2003.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Calcário e Dolomito**. *In*: FREITAS, L.F.A. & LUZ, A.L. (Org.) Rochas e Minerais Industriais. CETEM/MCT, p. 327-350. 2005.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: Ed. Pini, 2008. 2ª Edição.

SILVA, A. D. A.; FILHO, J. L. R.; SOUZA, J. C.; BARROS, M. L. D. S. C.; LIRA, B. B. **Aproveitamento de rejeito de calcário do Cariri Cearense na formulação de argamassa. Estudos Geológicos**, v. 18, n. 1, p: 89-93, 2008.

SILVA, Cláudia Claumann da. **Comportamento de Solos Siltosos quando Reforçados com Fibras e Melhorados com Aditivos Químicos e Orgânicos**. 2007. 170 f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, 2007.

SILVA, C. P.; RODRIGUES, A. B.; DIAS, M. S. A. **Percepção de caieiros quanto às consequências do trabalho no processo saúde-doença. Revista de Saúde Pública**, v. 41, p: 858-860, 2007.

SILVA, J. O. **Perfil da Cal**. Brasília, Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. 39 f. 2009.

SOUSA, Joel Pedrosa. **Caracterização Tecnológica de Argilas utilizadas na Fabricação de Cerâmica vermelha no município do Crato-CE**. 2014. 85 f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2014.

SOUZA, M.L. (1980). **Pesquisa sobre métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis. Pavimentação Rodoviária**. 2ª ed. Rio de Janeiro -RJ. LTC Editora.

SZELIGA, Lucianna. **Estudo Experimental de um Solo Arenoso Estabilizada com Cinzas de Resíduo Sólido Urbano e Cal**. 2014. 153 f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio. 2014.

TA'NEGONBADI, B.; NOORZAD, R., 2017. Stabilization of clayey soil using lignosulfonate. **Transportation Geotechnics**, v. 12, p: 45-55.

TEIXEIRA, C.C.R.. **Avaliação do potencial de ligantes à base de sódio e cinzas volantes na estabilização de solos- comparação com soluções tradicionais.** 2010. 90 f. Dissertação de Mestrado. Curso de Engenharia Civil.

VIDAL, F. W. H.; SOUSA, J.F. de. 2005. **Rochas e Minerais Industriais do Ceará, Rochas Carbonáticas:** CETEM/MCT e FUNCAP/Fortaleza, p. 49-66.

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

**APÊNDICE A – CAPA DO ARTIGO PUBLICADO NA REVISTA DE GEOLOGIA
(ISSN 0103-2410, QUALIS B4)**

Artigo completo em: <http://www.periodicos.ufc.br/geologia/article/view/40771>



Revista de Geologia, Vol. 31, nº 1, 7 - 22, 2018
<http://www.periodicos.ufc.br/index.php/geologia>



**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.

APÊNDICE B – CAPA DO ARTIGO PUBLICADO NA REVISTA BRASILEIRA DE GEOGRAFIA FÍSICA (ISSN 1984-2295, QUALIS A2)

Artigo completo em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/242722>

Revista Brasileira de Geografia Física v.13, n.03 (2020) 1309-1323.



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



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.

**APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO SOCIOECONÔMICO APLICADO JUNTO AOS
PRODUTORES DE CAL DAS TRÊS ÁREAS ESTUDADAS NESTA PESQUISA**

1. Nome da unidade produtiva: _____
2. Volume de produção de cal / mês na unidade produtiva: _____
3. Produção de cal hidratada bruta (kg): _____
4. Produção líquida cal hidratada peneirada (kg): _____
5. % de rejeito revelado pelo processo de peneiramento da cal hidratada: _____
6. Toda a produção da cal é vendida bruta, ou peneirada? _____
7. Quantas pessoas estão envolvidas nos processos de hidratação da cal virgem e de peneiramento da cal hidratada nesta unidade produtiva? _____
8. Para onde é vendida a produção de cal desta unidade produtiva? _____
9. Há venda fácil e mercado constante para a sua produção? _____
10. Se não, quais as dificuldades de comercialização? _____
11. Quais os meses de melhor produção? _____
12. Os trabalhadores das caieiras, quando não estão nesta atividade, se ocupam da agricultura de subsistência? () Sim () Não () Nem todos
13. Quantos dias são necessários para o processo de calcinação do calcário, esfriamento e descarga da caieira? _____
14. Como é feito o transporte da cal? _____

15. Como é feito o armazenado da cal? _____

16. O que é feito com o rejeito das caieiras? _____

17. Como é feito o desmonte do calcário? _____


18. Quem manuseia o explosivo utilizado no desmonte do calcário? _____

19. Qual o tipo de comunicação disponível nas comunidades produtoras de cal?


() Internet () Celular () Correios () Outros

20. Como é o abastecimento de água das comunidades produtoras de cal e das caieiras? () Poço () Cisterna () Outros _____


APÊNDICE D – RESULTADOS DOS ENSAIOS GEOTÉCNICOS
ÁREA 1 – COREAÚ / SOBRAL

FURO Nº		1	2	3	4	5	6	7	8		
Profundidade (m)	DE										
	ATÉ										
Estaca											
Posição											
G R A N D U L O M E T R I A	%	2"	100	100	100	100	100	100	100	100	
		1"	100	100	100	100	92	100	100	100	
		3/8"	100	91	93	87	82	91	89	93	
		Nº 4	99	89	89	83	76	87	82	87	
		Nº 10	93	81	81	73	66	76	70	74	
		Nº 40	61	48	50	43	43	45	44	47	
		Nº 200	35	27	28	24	23	25	25	26	
LL		31	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL		
IP		13	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP		
IG		2	0	0	0	0	0	0	0		
EA											
GRUPO HRB		A-2-6	A-2-4	A-2-4	A-1-b	A-1-b	A-1-b	A-1-b	A-2-4		
FAIXA		FF	FF	FF	FF	FF	FF	FF	FF		
26 GOLPES	hót.	12,7	12,7	10,9	10,8	14,0	13,8	12,9	12,9		
	dmáx.	1890	1942	1987	1979	1849	1874	1874	1861		
	Expansão	2,78	0,30	1,83	0,09	0,00	0,09	0,17	0,17		
	ISC	4	24	39	55	52	47	71	55		
Grau de compactação											
Umidade Natural											
QUADRO RESUMO: Base com Mistura											
Rodovia:					DATA: 26/06/2016			 GELAP			
Trecho: L1					Folha: 1 / 1						
Coreaú / Sobral											

APÊNDICE E – RESULTADOS DOS ENSAIOS GEOTÉCNICOS
ÁREA 2 – FORQUILHA

FURO Nº		1	2	3	4	5	6	7	8			
Profundidade (m)	DE											
	ATÉ											
Estaca												
Posição												
G R A N U L O M E T R I A	%	P A S S A N D O	2"	100	100	100	100	100	100	100		
			1"	100	100	100	100	92	100	100	100	
			3/8"	100	91	93	87	82	91	89	93	
			Nº 4	99	89	89	83	76	87	82	87	
			Nº 10	93	81	81	73	66	76	70	74	
			Nº 40	61	68	44	56	50	44	43	47	
			Nº 200	35	46	21	37	27	25	24	28	
LL		31	39	34	35	34	35	39	36			
IP		13	10	12	10	9	8	9	8			
IG		2	1	0	0	0	0	1	0			
EA												
GRUPO HRB		A-2-6	A-2-6	A-2-6	A-2-6	A-2-4	A-2-4	A-2-4	A-2-4			
FAIXA		FF	FF	F	FF	FF	F	F	FF			
26 GOLPES	hót.	12,7	17,6	10,3	10,3	17,7	17,2	16,5	16,6			
	dmáx.	1890	1764	1889	1877	1808	1830	1839	1836			
	Expansão	2,78	2,35	1,57	1,48	0,83	0,7	0,61	1,39			
	ISC	4	28	24	26	30	45	53	48			
Grau de compactação												
Umidade Natural												
QUADRO RESUMO: Base com Mistura												
Rodovia:					10/04/2017			 GELAP				
Trecho L2					Folha: 1 / 1							
Forquilha												

APÊNDICE F – RESULTADOS DOS ENSAIOS GEOTÉCNICOS
ÁREA 3 – QUIXERÉ

FURO Nº		1	2	3	4	5	6	7	8	
Profundidade (m)	DE									
	ATÉ									
Estaca										
Posição										
G R A N D I S S I M O L L U M E N T E R I A	P A S S A N D O	2"	100	100	100	100	100	100	100	100
		1"	100	100	100	100	100	100	100	100
		3/8"	100	96	95	97	97	98	98	98
		Nº 4	99	91	89	93	94	95	94	95
		Nº 10	93	83	88	84	86	87	87	88
		Nº 40	61	56	58	56	62	62	62	66
		Nº 200	35	36	41	38	47	46	47	52
LL		31	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL	
IP		13	7	2	NP	NP	NP	NP	NP	
IG		2	1	0	0	0	0	1	0	
EA										
GRUPO HRB		A-2-6	A-4	A-4	A-4	A-4	A-4	A-4	A-4	
FAIXA		FF	FF	FF	FF	FF	FF	FF	FF	
26 GOLPES	hót.	12,7	13,6	13,5	13,7	13,7	14,5	14,2	13,8	
	dmáx.	1890	1937	1925	1922	1889	1881	1897	1881	
	Expansão	2,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,90	0,00	0,00	
	ISC	4	27	38	31	30	42	57	54	
Grau de compactação										
Umidade Natural										
QUADRO RESUMO: Base com Mistura										
Rodovia:					DATA: 26/06/2016			 GELAP		
Trecho L3 Quixeré					Folha: 1 / 1					