



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR DE
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL



ANDRÉ ALBINO DE SOUSA

**POTENCIAL DE SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR RESÍDUO
CERÂMICO EM MISTURA DE SOLO-CIMENTO PARA APLICAÇÃO EM
CAMADA DE PAVIMENTAÇÃO**

Cajazeiras
2020

ANDRÉ ALBINO DE SOUSA

**POTENCIAL DE SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR RESÍDUO
CERÂMICO EM MISTURA DE SOLO-CIMENTO PARA APLICAÇÃO EM
CAMADA DE PAVIMENTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-
Campus Cajazeiras, como parte dos
requisitos para a obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Cinthya Santos da Silva
Coorientador: Robson Arruda dos Santos

Cajazeiras
2020

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catálogo na fonte: Daniel Andrade CRB-15/593

S725p

Sousa, André Albino de.

Potencial de substituição do cimento portland por resíduo cerâmico em mistura de solo-cimento para aplicação em camada de pavimentação / André Albino de Sousa; orientadora Cinthya Santos da Silva; coorientador Robson Arruda dos Santos. – Cajazeiras, 2020.

59 f. : il.

Orientadora: Cinthya Santos da Silva

TCC (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2020.

1. Solo-cimento | 2. Resíduo cerâmico vermelho | 3. Pavimentação |. Título

CDU 691.328.5 (0.067)

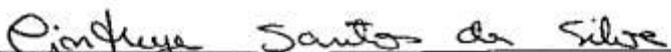
ANDRÉ ALBINO DE SOUSA

**POTENCIAL DE SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR RESÍDUO
CERÂMICO EM MISTURA DE SOLO-CIMENTO PARA APLICAÇÃO EM
CAMADA DE PAVIMENTAÇÃO**

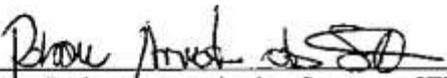
Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,
como parte dos requisitos para a obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 10 de fevereiro de 2020.

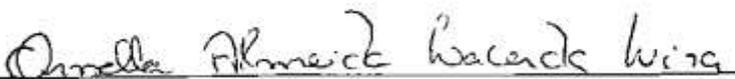
BANCA EXAMINADORA



Prof.^a Me. Cinthya Santos da Silva – IFPB-Campus Cajazeiras
Orientadora



Prof. Me. Robson Arruda dos Santos – IFPB-Campus Cajazeiras
Coorientador



Prof.^a Esp. Ornella Almeida Lacerda Lira – IFPB-Campus Cajazeiras
Examinadora interna

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Lúcia e Francisco, ao meu tio Manoel (*in memoriam*) e a minha avó Maria (*in memoriam*), por compartilharem e torcerem sempre pela minha felicidade.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, que tem sido meu guia e protetor.

Aos meus pais, Lúcia e Francisco, por todo esforço, dedicação e pelos sonhos que realizamos juntos todos os dias sempre com muita coragem para alcançar objetivos e sonhos.

Às minhas irmãs, Amanda e Marcela, presentes que têm me dado ainda mais força e refúgio nos momentos de maiores dificuldades.

Aos demais familiares, que sempre estiveram presentes, ajudando de algum modo a completar essa caminhada.

Aos professores que fizeram parte da minha formação, tanto pessoal quanto acadêmica. Especialmente aos meus orientadores, Cinthya Santos da Silva e Robson Arruda dos Santos, que sempre me incentivaram e que nunca mediram esforços quando solicitados, pelo comprometimento e toda ajuda no desenrolar desta pesquisa.

Aos amigos com os quais o curso me presenteou, em especial a sagrada família e agregados: Alex, Assis, Manu, Alice, Leonardo, Álison, Breno, Geovany e Alexandra que foram meu refúgio nos dias de saudade de casa, nos momentos mais difíceis e especialmente nos mais alegres, pessoas pelas quais sou muito grato em tê-las conhecido.

À Mel, Ana Paula e Kelcylany pela ajuda na execução dos ensaios nos laboratórios. À banca examinadora pelas contribuições ao trabalho apresentado.

À Faculdade Santa Maria, por ceder seus laboratórios para realização de ensaios fundamentais para esta pesquisa.

E em especial, ao IFPB – Campus Cajazeiras, pelas condições e estruturas disponibilizadas ao desenvolvimento dessa e de tantas outras atividades.

RESUMO

Em 2018, de uma extensão total de 87.563km de malha rodoviária apenas 34,2% do total apresentavam condições satisfatórias aos usuários. Um dos principais motivos para este cenário está ligado ao custo elevado de manutenção, incluindo a necessidade de estabilização de solos, visto que a composição das camadas de pavimentação está diretamente ligada à sua resistência e durabilidade. Neste cenário a técnica de estabilização química com solo-cimento surge como uma alternativa de aproveitamento do solo, que inicialmente não apresentavam parâmetros correspondentes para respectiva utilização. Entretanto, a crescente demanda na substituição do Cimento Portland nos serviços de engenharia, devido os índices de dióxido de carbono lançados na atmosfera durante sua produção, tem embasado pesquisas que tratam da substituição do aglomerante por resíduos gerados pelos setores de produção, a saber, o resíduo de cerâmica vermelha, advindo da indústria de blocos cerâmicos. Esta pesquisa tem como objetivo avaliar a capacidade de carga de solos estabilizados com cimento e substituição parcial deste por resíduos de cerâmica vermelha. Foram então realizados ensaio de caracterização do solo, que forneceram parâmetros para a dosagem dos materiais, e posterior realização dos ensaios de compactação, expansão e penetração. A partir da constatação da necessidade de estabilização do solo classificado como argiloso, grupo A-7-6, e suscetível a grande variação de volume, foi avaliada a adição de 13% em massa de Cimento Portland a mistura e posterior substituição do aglomerante nas porcentagens de 20 e 30%. Os resultados demonstraram uma redução da massa específica mediante ao aumento de substituição por RCV (Resíduo Cerâmico Vermelho), e também para a expansão apresentada pelos compostos. O ensaio de CBR avaliou a porcentagem de 20% de substituição como a que apresenta maior capacidade de carga. Para fins de pavimentação ambas porcentagens de substituição analisadas estão dentro dos parâmetros que satisfazem suas respectivas utilizações em camadas de sub-base de pavimentos flexíveis.

Palavras-Chave: Solo-cimento; Estabilização; Resíduo cerâmico vermelho.

ABSTRACT

In 2018, of a total extension of 87,563 kilometers of road network, only 34.2% of the total presented satisfactory conditions to users. One of the main reasons for this scenario is linked to the high cost of maintenance, including the need for soil stabilization, since the composition of the pavement layers is directly linked to its resistance and durability. In this scenario, the chemical stabilization technique with soil-cement emerges as an alternative for using the soil, which initially did not present corresponding parameters for the respective use. However, the growing demand for replacement of Portland Cement in engineering services, due to the carbon dioxide levels released into the atmosphere during its production, has supported research that deals with the substitution of binder by waste generated by the production sectors, namely, red ceramic waste from the ceramic block industry. This research aims to evaluate the carrying capacity of soils stabilized with cement and the partial replacement by red ceramic waste. Soil characterization tests were carried out, which provided parameters for the dosage of the materials, and subsequent performance of the compaction, expansion and penetration tests. Based on the need to stabilize the soil classified as clayey, group A-7-6, and susceptible to great variation in volume, the addition of 13% by weight of Portland Cement to the mixture was evaluated and subsequent replacement of the binder in percentages of 20 and 30%. The results demonstrated a reduction in specific mass by increasing the substitution by RCR (Red Ceramic Residue), and also for the expansion presented by the compounds. The CBR test evaluated the percentage of 20% replacement as the one with the highest load capacity. For paving purposes both percentages of substitution analyzed are within the parameters that satisfy their respective uses in sub-base layers of flexible pavements.

Keywords: Soil-cement; Stabilization; Waste of red ceramic.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Camadas de pavimentos flexíveis	17
Figura 2 – Fluxograma metodológico da pesquisa	29
Figura 3 – Disposição dos resíduos cerâmicos na indústria	31
Figura 4 – Fases do ensaio de sedimentação a) repouso da amostra em defloculante, b) agitação em dispersor elétrico, c) disposição do material para sedimentação.....	33
Figura 5 – Fases do ensaio de massa específica. a) repouso da amostra em defloculante, b) leitura em picnômetro.....	34
Figura 6 – Aparelho de Casagrande	35
Figura 7 – Ensaio de compactação. a) preparação das dosagens para realização de ensaio, b) homogeneização da fase sólida, c) extração do corpo de prova, d) partição do corpo de prova para retirada de amostra.....	37
Figura 8 – Ensaio de ISC. a) pesagem do corpo de prova compactado, b) imersão para ensaio de expansão.....	39
Figura 9 – Curva granulométrica.....	41
Figura 10 – Curvas de compactação.....	44
Figura 11 – Curva de ISC para a mistura SC (0% RCV)	46
Figura 12 – Curva de ISC para as misturas com substituição de cimento.....	47
Figura 13 – Curvas de expansão.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações para camadas de pavimentos flexíveis.....	18
Tabela 2 – Classificação AASHTO.....	20
Tabela 3 – Teor de cimento por categoria de solo.....	26
Tabela 4 – Propriedades químicas e físicas do cimento CPV -ARI.....	30
Tabela 5 – Teor de cimento para dosagem PCA (adaptada).....	36
Tabela 6 – Caracterização granulométrica do solo.....	40
Tabela 7 – Caracterização química do RCV.....	42
Tabela 8 – Resultados do ensaio de compactação.....	43
Tabela 9 – Resultados do ensaio de ISC.....	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação NBR.....	21
Quadro 2 – Classificação a partir do IP	22
Quadro 3 – Energia de compactação	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABNT – *Associação Brasileira de Normas Técnicas*

ANICER – *Associação Nacional da Indústria Cerâmica*

ARI – *Alta Resistência Inicial*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CBR – *California Bearing Ratio*

CNT – *Confederação Nacional do Transporte*

CONAMA – *Conselho Nacional do Meio Ambiente*

CP – *Cimento Portland*

DNER – *Departamento Nacional de Estradas de Rodagem*

DNIT – *Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes*

IP – *Índice de Plasticidade*

ISC – *Índice de Suporte Califórnia*

LL – *Limite de liquidez*

LP – *Limite de Plasticidade*

NBR – *Norma Técnica*

RCV – *Resíduo cerâmico vermelho*

SUCS – *Sistema unificado de Classificação dos Solos*

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Determinação do Índice de Grupo	19
Equação 2 – Determinação do Índice de plasticidade	22
Equação 3 – Determinação da porcentagem de expansão	28

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo geral	15
1.1.2 Objetivos específicos	15
1.2 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA	15
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1 PAVIMENTOS	16
2.1.1 Pavimentos rígidos	16
2.1.2 Pavimentos flexíveis.....	17
2.1.3 Pavimentos semirrígidos	18
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS	19
2.2.1 Granulometria.....	21
2.2.2 Limites de Atterberg	21
2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	22
2.3.1 Estabilização mecânica.....	23
2.3.2 Estabilização química	23
2.3.3 Solo-cimento.....	23
2.4 CIMENTO PORTLAND.....	24
2.4.1 Adições	25
2.5 RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA	26
2.6 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....	27
2.7 ENSAIO DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA	28
2.7.1 Ensaio de expansão.....	28
2.7.2 Ensaio de penetração	28

3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1 MATERIAIS	29
3.1.1 Solo.....	29
3.1.2 Cimento Portland.....	30
3.1.3 Resíduo cerâmico vermelho	31
3.2 MÉTODOS.....	32
3.2.1 Granulometria.....	32
3.2.2 Determinação da massa específica	33
3.2.3 Limites de Atterberg.....	34
3.2.4 Composição química do resíduo.....	35
3.2.5 Dosagem	36
3.2.6 Compactação	36
3.2.7 Índice de Suporte Califórnia.....	38
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	40
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	40
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO CERÂMICO	42
4.3 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO	43
4.4 ENSAIOS DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC)	44
5 CONCLUSÃO.....	49
REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

Uma das grandes problemáticas que atinge o sistema de transporte rodoviário, principal responsável pela movimentação de cargas e pessoas em todo território nacional, é a garantia da qualidade de pavimentação. Em pesquisa realizada no ano de 2018, avaliando as condições de 87.563km de rodovias de extensão pública, foi observado que 34,2% encontram-se em estado ótimo (4,6%) ou bom (29,6%) enquanto um total de 65,8% se apresentam como deficientes, sendo classificadas como regulares, ruins ou péssimas (CNT, 2018). Para entender este panorama é necessário o estudo do serviço de pavimentação como um sistema de camadas responsáveis por absorver e distribuir os esforços causados pelo tráfego, cujo comportamento estrutural depende diretamente da capacidade de suporte do material empregado em cada camada, de suas respectivas espessuras além da interação com demais constituintes do sistema (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Uma vez que a resistência das camadas de pavimentação está diretamente ligada ao material que a constitui, Silva (2014) aponta uma prática comum a que trata dos solos com baixa capacidade de carga, que comumente são substituídos por materiais com maiores resistências e na grande maioria dos casos descartados. Nesta perspectiva surge um grande desafio no campo da engenharia, que trata do melhoramento do solo através de técnicas de estabilização, seja ela mecânica, química ou granulométrica, executadas por meio de processos de compactação, correção granulométrica ou através de adições de materiais, conferindo ao solo um ganho significativo de resistência às cargas, desgastes e erosão (ARCANJO, 2018).

No campo de pesquisa da estabilização de solos, a utilização de frações de cimento e cal como material ligante tem se destacado, uma vez que promovem reações químicas capazes de facilitar a cimentação dos grãos entre si, modificando propriedades físicas do composto, atribuindo melhores condições das suas propriedades mecânicas (ARCANJO, 2018).

Embora a utilização desses materiais tenha apresentado resultados satisfatórios, outra grande preocupação que deve ser levada em consideração trata dos impactos ambientais causados pela produção de Cimento Portland. É crescente a demanda de substituição desse material nos serviços de engenharia, uma vez que os índices de dióxido de carbono lançados na atmosfera, durante a produção do Cimento Portland, correspondem de 5 a 8% da emissão global (RIOS *et al.*, 2016; RIOS *et al.*, 2017).

Diferentes pesquisas destacam, ainda, que a porcentagem de cimento empregada no processo de estabilização tem direta influência da porcentagem de material arenoso incorporado ao solo, resultando em volumes cada vez maiores de Cimento Portland para solos predominantemente argilosos, onerando custos além de favorecer o processo de retração e aparecimento de fissuras mediante as propriedades físicas dos materiais supracitados (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Outra grande preocupação que tem embasado o desenvolvimento de estudos trata do aproveitamento de resíduos gerados pelos setores de produção, neste cenário estão inseridos os materiais de cerâmica vermelha, como por exemplo, os tijolos cerâmicos. Durante o processo de produção, ainda realizado de maneira artesanal por empresas de pequeno e médio porte, as medidas de controle tecnológico de produção permitem uma porcentagem de até 30% de resíduo sobre a produção, como aborda Dias (2004), quantitativo que se soma ainda a parcela gerada durante o transporte, armazenamento e utilização deste material.

Durante a queima, os blocos moldados são submetidos a temperaturas que variam entre 600°C e 800°C, que transformam o material em uma estrutura sílico-aluminosa amorfa (DALLACORT *et al.*, 2002), o que confere a propriedade de pozolana artificial por semelhança de produção, a partir do aumento da superfície ativa do material e da porosidade causada pela instabilidade internas dos argilominerais após a queima (SILVA, 2014). Fatores que colocam o material moído como um elemento cujas propriedades estão dentro das especificadas pela *American Society for Testing and Materials* 618 C (ASTM, 2019), que propicia sua utilização em misturas com cimento (DALLACORT *et al.*, 2002).

A partir da ideia conjunta de reduzir a utilização de Cimento Portland e do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha, o presente trabalho tem o objetivo de avaliar o comportamento de misturas solo + cimento + resíduo de cerâmica vermelha, visando à estabilização do composto pelo aproveitamento do potencial químico existente na fração fina de resíduo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a capacidade de suporte de carga de misturas de solo-cimento-resíduo de cerâmica vermelha, estabilizados pelo potencial de reatividade química advindos da substituição parcial do Cimento Portland por resíduo.

1.1.2 Objetivos específicos

- Verificar o teor mínimo de cimento para estabilização do solo, de modo a atender especificações técnicas de utilização na execução de camadas de pavimentação;
- Avaliar a constituição química do resíduo de cerâmica vermelha;
- Analisar a capacidade de suporte de carga e expansividade do composto base de solo-cimento quando o aglomerante é substituído parcialmente por resíduos de cerâmica vermelha nas porcentagens em massa de 20% e 30%.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. No Capítulo 1 está apresentada a introdução, contextualizando o tema proposto, justificativas, objetivos gerais e específicos.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, abordando temas sobre o pavimento e suas classificações, as principais camadas que compõe sua estrutura, estabilização de solos. Apresenta ainda um panorama acerca da produção de Cimento Portland e da geração de resíduo de cerâmica vermelha. Também abordará informações importantes sobre os ensaios laboratoriais que serão realizados na pesquisa a fim de quantificar a capacidade de carga do solo.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais utilizados e os métodos adotados na realização do trabalho.

No Capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados obtidos.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões a respeito da pesquisa e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo reúne o suporte bibliográfico no qual esta pesquisa se baseia. Inicialmente serão abordadas definições e características do sistema de pavimentação em conjunto aos instrumentos de análise geotécnica do solo com ênfase em seus potenciais de utilização e metodologias de melhoramento mecânico. É apresentado ainda um panorama da geração e potencial de utilização do resíduo de cerâmica vermelha em processos de estabilização de solos e por fim os ensaios que analisam a capacidade de suporte dos materiais analisados.

2.1 PAVIMENTOS

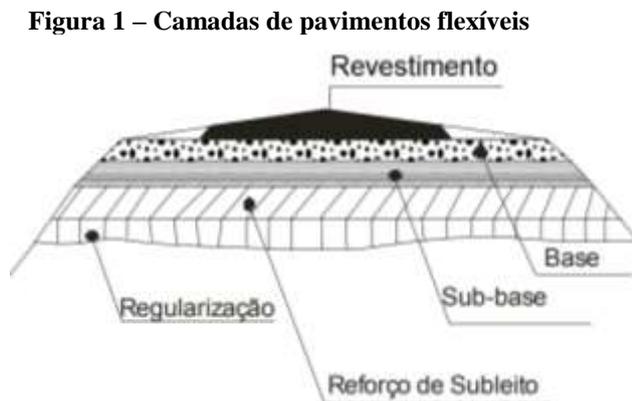
Bernucci *et al.* (2008) define pavimento como uma estrutura composta por múltiplas camadas de espessuras conhecidas, destinadas a suportar os esforços oriundos do tráfego de veículos além das ações climáticas, propiciando condições de rolamento de forma segura e econômica aos usuários. Estas camadas, por sua vez, funcionam de modo a aliviar as pressões exercidas sobre as camadas mais inferiores, que são comumente menos resistentes (CUNHA, 2014). Os pavimentos rodoviários são tradicionalmente classificados de acordo com seus materiais constituintes e técnicas de execução assim dividida em três categorias: pavimentos rígidos, semirrígidos e flexíveis.

2.1.1 Pavimentos rígidos

Segundo o DNIT (2006) são caracterizados pela alta rigidez da camada superior quando comparados às camadas mais inferiores, Sartore (2015) destaca que estes tipos de pavimentos apresentam baixa deformabilidade devido serem constituídos por placas de Cimento Portland assentadas sobre o solo, sub-base ou sobre pavimentos antigos. A distribuição das tensões sobre a camada superior dos pavimentos rígidos ocorre de modo que as tensões de tração sejam registradas na face inferior da placa enquanto as de compressão situem-se na face superior, comportamento que também se verifica nos pavimentos flexíveis (SANTOS, 2009).

2.1.2 Pavimentos flexíveis

Formado por quatro camadas principais, a saber: o subleito, a sub-base, a base e o revestimento asfáltico (BERNUCCI et al., 2008), conforme destacados na Figura 1.



Fonte: DNIT, 2006

Nas camadas mais superiores são empregados materiais betuminosos que segundo Arcanjo (2018) favorece características como impermeabilidade e flexibilidade, enquanto as camadas subjacentes são compostas por material granular estabilizado por ligantes hidráulicos. A autora salienta ainda que todas as camadas sofrem uma deformação elástica significativa diante da aplicação dos carregamentos, que por sua vez são distribuídos em parcelas similares ao longo das diferentes camadas.

Cada uma das camadas mencionadas anteriormente possui uma função específica na estrutura do pavimento, a saber:

- a) Subleito: Compreende o terreno onde o pavimento será assentado, Marques (2006) ressalta que mediante a resistência apresentada por esta camada ela pode atuar como sub-base desde que apresente ISC superior a 20%. Quando o terreno correspondente ao subleito se apresenta irregular é necessário o emprego de uma camada regularizadora chamada de reforço de subleito, cuja finalidade é de corrigir as falhas conformando transversal e longitudinalmente a superfície para posterior aplicação das demais camadas (SOUZA, 2004). Balbo (2015) destaca ainda que a utilização do reforço é uma alternativa quando existe o desejo de reduzir as espessuras das camadas de base e sub-base mediante a baixa capacidade de suporte apresentada pelo subleito.

- b) Sub-base: Camada complementar criada a partir da divisão da camada de base, quando esta última apresenta elevada espessura para transmissão dos esforços (BALBO, 2015).
- c) Base: Marques (2006) destaca esta como a principal camada responsável por distribuir os esforços da superfície de rolamento, por sua vez pode ser constituída por material granular composto por brita, solo estabilizado naturalmente ou quimicamente com a utilização de ligantes hidráulicos (BALBO, 2015).
- d) Revestimento: Camada submetida a esforços de tração e compressão devidos à flexão (BERNUCCI *et al.*, 2008) uma vez que recebe de forma direta a ação do rolamento dos veículos, nesta tradicionalmente é empregado material betuminoso a fim de assegurar segurança, durabilidade a estrutura de pavimentação (MARQUES, 2006).

A Tabela 1 apresenta os valores mínimos exigidos de CBR e expansão pelo Manual de Pavimentação DNIT (2006) para materiais com potencial de utilização nas camadas de pavimentação apresentadas.

Tabela 1 – Especificações para camadas de pavimentos flexíveis

Camada de pavimento	CBR (%)	Expansão
Subleito	Maior que 2	Menor ou igual a 2
Reforço de subleito	Maior que do subleito	Menor ou igual a 1
Sub-base	Maior que 20	Menor ou igual a 1
Base	Maior que 80	Menor ou igual a 0,5

Fonte: DNIT, 2006

2.1.3 Pavimentos semirrígidos

Neste é possível encontrar aspectos dos pavimentos rígidos e flexíveis, suas camadas superiores são compostas por materiais betuminosos enquanto as subjacentes, segundo Souza (2004), por uma base cimentada quimicamente, como por exemplo, uma camada constituída por solo-cimento.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

A diversidade de fatores que contribuem para a formação dos diferentes tipos de solo levou a necessidade da criação de um sistema de classificação capaz de agrupar aqueles cujas propriedades sejam semelhantes, esses modelos por sua vez, estabelecem ainda características geotécnicas de utilização para cada grupo de solo (CAPUTO, 1988).

Analisando o comportamento de origem do solo, sua plasticidade e propriedades geotécnicas foram elaborados dois métodos de classificação, a saber:

- a) Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS): Criado na década de 40 por Casagrande, este sistema separa os diferentes tipos de solo em três grupos principais de acordo com parâmetros acerca da granulometria, deformabilidade e plasticidade (BATALIONE, 2007):
 - Solos grossos: cujo diâmetro da maioria dos grãos é maior que 0,075mm além de mais que metade do peso dos grãos ficarem retidos na peneira #200 (CAPUTO, 1988).
 - Solos finos: cujo diâmetro da maioria dos grãos é menor que 0,075mm (CAPUTO, 1988).
 - Turfas: solos com alto teor de matéria orgânica e extremamente compressíveis (CAPUTO, 1988).
- b) Sistema de classificação *Highway Research Bord* (HRB): Também conhecido como sistema AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), agrupa os diferentes solos em grupos e subgrupos correlacionando-os de acordo com suas granulometrias e limites de Atterberg, que são utilizados no cálculo do índice de grupo (IG), parâmetro cuja finalidade é de situar o solo de acordo com sua capacidade de suporte (DNIT, 2006), conforme apresentado na Tabela 2. O IG, apresentado pela Equação 1, é estabelecido por um número inteiro que varia entre 0 e 20, sendo os solos cujo índice mais próximo de 0 apresentam ótima aplicação em camadas de pavimentação enquanto os que estão mais próximos de 20 são considerados fracos (MARTINS, 2018).

$$IG = 0,2 \cdot a + 0,005 \cdot a \cdot c + 0,01 \cdot b \cdot d$$

(Equação 1)

Os valores de a, b, c e d expressos em números inteiros representam respectivamente: a percentagem de solo passante na peneira nº 200, menos 35 (caso a percentagem seja superior a 75 adota-se $a = 40$ e caso seja inferior a 35, adota-se $a = 0$); percentagem de solo passante na peneira nº 200, menos 15 (caso a percentagem seja superior a 55 adota-se $b = 40$ e caso seja inferior a 15, adota-se $b = 0$); valor do LL, em percentagem, menos 40 (caso o LL seja superior a 60 adota-se $c = 20$ e caso seja inferior a 40, adota-se $c = 0$); e o valor do IP, em percentagem, menos 10 (caso a percentagem seja superior a 30 adota-se $d = 20$ e caso seja inferior a 10, adota-se $d = 0$) (MARTINS, 2018).

Tabela 2 – Classificação AASHTO

Classificação Geral	Solo granular 35% ou menos passando pela peneira 0,074mm (nº 200)						Solo siltoso e argiloso Mais 35% passando pela peneira 0,074mm (nº 200)					
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
Grupos	A-1-	A-1-	A-2	A-2	A-2	A-2					A-7-5	
	a	b	4	5	6	7					A-7-6	
% que passa nas peneiras												
2 mm(nº 10)	50 máx.											
0,42mm(nº 40)	30 máx.	50 máx.	51 mín.									
0,074mm (nº 200)	16 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.			36 mín.					
Características da fração que passa na peneira 0,42 mm												
Limite de Liquidez (%)	-		40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	41 mín.	
Índice de Plasticidade (%)	6 máx.	NP	10 máx.	11 mín.			10 máx.		11 mín.			
Índice de Grupo	0		4 máx.			8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.			
Constituintes Usuais	Fragmentos de pedra, pedregulhos e areia		Areia fina	Pedregulhos e areia siltosa ou argilosa				Solos siltosos		Solos argilosos		
Comportamento geral como subleito	Excelente e bom						Regular e ruim					

Fonte: DIAS, 2004

2.2.1 Granulometria

A caracterização do solo quanto a sua distribuição granulométrica é um dos parâmetros que assegura a estabilidade do mesmo na execução de camadas de pavimentos (DNER, 1996). O maior atrito interno obtido pelo contato das partículas acompanha o ganho de resistência ao cisalhamento e baixa deformabilidade, resultado do preenchimento dos vazios existentes entre os grãos maiores por partículas menores o que torna o material mais denso (YODER; WITCZAK, 1991 e SANTANA, 1983) e garante uma maior distribuição dos esforços através do contato grão a grão.

O ensaio de caracterização granulométrica é realizado de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016) através da combinação dos métodos de peneiramento e sedimentação. O objetivo do ensaio é determinar a massa de cada faixa de tamanho de partículas expressando o resultado por meio de uma curva granulométrica, onde o eixo das ordenadas apresenta as porcentagens passantes acumuladas em cada peneira, enquanto o eixo das abcissas expressa em escala logarítmica às dimensões das partículas associadas às aberturas das peneiras (LEITE, 2007).

A supracitada norma ainda classifica o solo nas escalas granulométricas apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação NBR

Classificação	Diâmetros equivalentes
Pedregulho	Entre 76 e 4,8mm
Areia	Entre 4,8 e 0,05mm
Argila	Entre 0,05 e 0,005mm

Fonte: ABNT, 2016

2.2.2 Limites de Atterberg

A indicação dos limites de consistência é necessária a fim de avaliar o comportamento dos solos mediante a variação da umidade (ARCANJO, 2018). O ensaio para determinação do limite de liquidez (LL), associado à umidade do estado líquido para plástico, segue as determinações da NBR 6459 (ABNT, 2016). Consiste na dosagem e ensaio no aparelho de

Casagrande, de uma pasta homogênea composta por solo passante da peneira nº 40 e água. O resultado é expresso por um gráfico em que o eixo das ordenadas apresenta o número de golpes necessários para a oclusão das extremidades inferiores da ranhura, enquanto o das abcissas correlaciona o teor de umidade da amostra (DNIT, 2006). A partir da inclinação da reta é possível encontrar o valor de umidade correspondente aos 25 golpes que representa o LL.

O ensaio do limite de plasticidade (LP), por sua vez, segue as determinações da NBR 7180 (ABNT, 2016). Está associado à variação do estado plástico para o semissólido e consiste no cálculo da porcentagem de umidade na qual ao se moldar um cilindro de aproximadamente 3mm de diâmetro e 10cm de comprimento o solo inicia a fissuração (CAPUTO, 1988).

Conhecidos os limites de liquidez e plasticidade torna-se possível a determinação do índice de plasticidade do solo, a partir da Equação 2 e classificação conforme apresentado no Quadro 2:

$$IP = LL - LP \quad \text{(Equação 2)}$$

Quadro 2 – Classificação a partir do IP

Classificação	Valor do Índice de plasticidade (%)
Fracamente plástico	Entre 1 e 7
Mediamente plástico	Entre 7 e 15
Altamente plástico	Maior que 15

Fonte: MARTINS, 2018

2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

As obras de pavimentação estão diretamente ligadas à qualidade do solo empregado, uma vez que as diferentes camadas atuam em conjunto durante a absorção dos esforços aos quais são submetidas. Solos cujas características não atendem as especificações para utilização são comumente substituídos, realidade que ao longo dos anos tem sido desconstruída diante das práticas que tratam da estabilização dos solos. Senço (2008) define os processos de estabilização como métodos que buscam conferir o melhoramento de características ligadas à estabilidade e resistência mediante a solicitação por cargas impostas,

conferindo assim condições ao material de resistir ao cisalhamento e deformação quando sujeito a tensões. Dentre os principais métodos destacam-se as estabilizações mecânica e química.

2.3.1 Estabilização mecânica

Parte do princípio da realização do arranjo das partículas através de métodos como o de compactação, que rearranja o solo através da eliminação de vazios ou por meio da correção granulométrica, que por sua vez consiste em adicionar ou retirar partículas do solo na busca pela alteração de suas propriedades (ARCANJO, 2018).

2.3.2 Estabilização química

Ocorre por meio da utilização de aditivos químicos estabilizadores capazes de reagir com as partículas do solo, atribuindo um melhoramento de suas propriedades mecânicas (ARCANJO, 2018). Dentre os mais utilizados, segundo Marques (2006) e Gondim (2008), estão os ligantes hidráulicos como cimento Portland e a cal hidratada, além de materiais betuminosos.

2.3.3 Solo-cimento

Este processo de estabilização que acontece através da interação química entre proporções de solo, cimento Portland e água, ocorre a partir da hidratação do ligante hidráulico resultando em um composto de menor permeabilidade e maior resistência mecânica (ARCANJO, 2018). As misturas de solo-cimento podem ser caracterizadas, segundo Marques (2006), em três categorias:

- a) Mistura de solo-cimento: que trata do produto entre solo, cimento e ligante compactado e curado, cuja finalidade é de atender critérios de durabilidade e estabilização;
- b) Solo modificado com cimento: mistura cujas porcentagens de cimento não superam 5%, onde a finalidade principal comumente está na redução do índice de plasticidade (IP);

- c) Solo-cimento plástico: mistura que apresenta uma melhor compactação e a completa hidratação do cimento. No composto entre ligante, solo e água é possível notar semelhança a uma argamassa, caracterizada principalmente por teores de cimento mais elevados.

O percentual de cimento a ser adicionado à mistura está diretamente ligado à classificação do solo no qual será empregado. Embora todos os tipos de solo possam ser estabilizados com cimento, solos com alto percentual de argila tornam-se economicamente inviáveis devido ao alto teor de ligante empregado (SARTORI, 2015) predominando a utilização para solos que possuem certa proporção de areia.

Kuhlman (1994) avaliou as misturas de solo-cimento quando empregadas em camadas de pavimentação como econômicas, pouco deformáveis quando submetidas a carregamentos além de resistentes até mesmo na presença de água. Os primeiros registros da utilização datam do ano de 1935 com a construção de uma rodovia próxima a cidade de Johnsoinville, South Carolina, a partir um projeto de cooperação que contou com a participação da *Portland Cement Association* (LAMBE, 1979).

No Brasil, o estado de São Paulo conta com valor superior a vinte mil quilômetros de rodovias que utilizam as misturas de solo cimento em base e sub-base, a saber da rodovia Castelo Branco cuja porcentagem de cimento utilizada em seu material de sub-base possui uma adição em volume de 8% de cimento Portland enquanto o material da base apresenta 10% (Senço, 1995).

2.4 CIMENTO PORTLAND

A NBR 5732 (1991) define cimento como um aglomerante hidráulico que durante o processo de produção obtido pela moagem do clínquer Portland se adiciona uma ou mais formas de sulfato de cálcio, além de matérias de natureza pozolânica como escórias e matérias carbonáticas. Constituído principalmente por calcário, sílica, alumina e óxido de ferro seu processo produtivo compreende basicamente a mistura da matéria prima e queima a temperaturas de aproximadamente 1400°C, obtendo-se o clínquer que posteriormente é resfriado e moído (CUNHA, 2014). No Brasil a utilização de cimento Portland se aproxima de 78 toneladas/ano (OLIVEIRA, 2014).

Dada a importância do cimento Portland para a construção civil, pesquisas têm sido desenvolvidas a tratar dos efeitos prejudiciais causados pelo produto ao meio ambiente. Os impactos causados pela produção do aglomerante vão desde a extração da matéria-prima à grande emissão de gás carbônico na atmosfera, durante a produção do clínquer. Estatísticas apresentadas por Toledo Filho *et al.* (2007) apontam para um montante de 1,25 bilhões de toneladas de CO₂ lançados na atmosfera, sendo o Brasil responsável por 22,7 milhões de toneladas. Neste cenário surge o desenvolvimento de pesquisas que visam reduzir o consumo de cimento a partir da substituição parcial por resíduos advindos de processos industriais.

2.4.1 Adições

Aspectos econômicos e de desenvolvimento sustentável tem ao longo do tempo incentivado o aproveitamento de resíduos e subprodutos industriais na substituição parcial ou total do cimento Portland em produtos como concretos, argamassas e na estabilização de solos. Dallacort *et al.* (2002) destaca a constante busca por adições que possuam em sua composição sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃) em estado amorfo, materiais que quando combinados com água e a cal Ca(OH)₂, oriunda da hidratação do cimento, são capazes de oferecer atividade pozolânica através da formação de compostos semelhantes aos silicatos e aluminatos de cálcio hidratados.

Dada a importância da pozolanidade do elemento a ser adicionado, outra propriedade analisada está diretamente ligada a finura do material, denominada de “efeito fíler” onde os grãos mais finos ocupam os espaços vazios existentes entre as partículas de cimento e solo, favorecendo um aumento da compacidade e resistência do composto (DALLACORT *et al.*, 2002).

A NBR 12253 (ABNT, 2012), apresenta uma metodologia de dosagem, determinada a partir da classificação do solo pelo sistema AASHTO, a fim de satisfazer condições de durabilidade e resistência. Joaquim (2017) salienta que a supracitada norma se baseia no método de dosagem da *Portland Cement Association* (PCA), sendo ambos os métodos empíricos que apresentam como critério de aceitação uma resistência a compressão simples de 2,1 Mpa aos sete dias.

Cacian (2013) destaca o comportamento conservador da ABNT em limitar o emprego de faixas de solo mais finas como siltes e argilas, que não são apresentadas na norma conforme demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Teor de cimento por categoria de solo

Classificação do solo (HBR)	Teor de cimento (% em massa)
A1-a	4
A1-b	
A2	5
A3	7
A4	

Fonte: ABNT, 2012

2.5 RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA

Dados do IBGE (2008) apontam que no Brasil existe um total de 6893 cerâmicas e olarias, o que corresponde a 4,8% da indústria da construção civil. Garcia *et al.* (2014) estima, segundo dados da Associação Nacional de Indústria Cerâmica (ANICER), que a geração de resíduo de cerâmica vermelha (RCV) para o ano de 2014 foi de 3,9 a 6,5 milhões de toneladas, excluído o montante gerado durante a utilização nos canteiros de obras.

A indústria cerâmica tem grande contribuição no que trata da geração de impactos ambientais, seja pela deterioração das áreas de extração de matéria-prima, consumo de energia e emissão de poluentes ou pela geração de resíduos sólidos. Os principais resíduos que são gerados tratam de peças cerâmicas quebradas ou que não atendem especificações, estes produtos embora sejam de responsabilidade do produtor são comumente mutuados nos pátios das olarias ou utilizados no cascalhamento de estradas (OLIVEIRA, 2014).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) publicou no ano de 2002, a Resolução nº 307/02, que define diretrizes, procedimentos e critérios de gestão para resíduos sólidos, normalizando seu descarte ecologicamente apropriado de acordo com a respectiva classificação. Os resíduos gerados na produção de blocos de cerâmica são atribuídos à classe A, juntamente com os resíduos gerados durante os trabalhos de construção, demolição, reformas e reparo em pavimentação. Devido à reciclagem obrigatória de resíduos de cerâmica (Classe A), vários estudos sobre a reutilização deste material foram realizados, dando opções ao gerador do resíduo na hora do descarte correto do material.

O processo de produção de blocos cerâmicos é composto por cinco fases, a saber: extração e preparação da matéria-prima, moldagem e conformação dos blocos, secagem,

queima e resfriamento. Após o processo de queima os resíduos cerâmicos não podem retornar ao beneficiamento da matéria-prima, processo que acontece com os blocos que não atendem aos critérios de qualidade antes de serem queimados. O tratamento térmico sofrido pelos blocos quando submetidos a temperaturas que variam entre 700°C e 900°C altera a estrutura molecular do composto. Ocorre então a desidroxilação e amorfismo dos argilominerais, presentes na massa argilosa que compõe o bloco, que potencialmente confere ao material reatividade química e natureza pozolânica quando cominuído (GARCIA *et al.*, 2014).

Dallacort *et al.* (2002) destaca que o resíduo cerâmico quando triturado, tem potencial para adição mineral em misturas com cimento Portland, uma vez que apresenta composição físico-química dentro do que especifica a *American Society for Testing and Materials 618* (ASTM, 2019). A diminuição das partículas do produto tem como consequência o aumento da área específica dos grãos, ou seja, uma maior superfície de contato o que facilita a ocorrência das reações químicas (AMORIM, 2000).

2.6 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

A compactação tem como finalidade a redução do número de vazios do solo, aumentando sua massa específica, resistência e estabilidade (DNER, 1996). O ensaio de compactação para misturas de solo-cimento segue o que determina a NBR 12023 (ABNT, 2012), esta por sua vez apresenta duas metodologias para a determinação do teor de umidade ótimo das misturas, associadas à granulometria do material. A partir da determinação de, no mínimo, cinco pontos de diferentes umidades, são moldados corpos de prova cilíndricos, mediante aplicação da energia de compactação apresentada no Quadro 3. Conhecida a massa compactada e o volume do molde utilizado, faz-se necessário a tabulação dos dados e determinação da curva de compactação referente à relação entre a massa específica seca e a umidade a ela associada. A configuração da referida curva apresenta correlacionada à máxima massa específica registrada o teor de umidade ótima da mistura analisada.

Quadro 3 – Energia de compactação

Cilindro	Soquete	Número de camadas	Número de golpes por camada
Pequeno	Pequeno	3	26

Fonte: ABNT, 2012

2.7 ENSAIO DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) que segue as determinações da NBR 9895 (ABNT, 2016) é bastante utilizado na avaliação do comportamento de materiais com potencial de utilização em pavimentos rodoviários. No experimento, também conhecido como ensaio de CBR (*California Bearing Ratio*), os ensaios de expansão e penetração constituem duas fases principais que devem ser realizadas após a moldagem dos corpos de prova.

O valor final do ensaio é expresso em porcentagem, utilizada em orientação do DNIT (2006) como fator determinante das espessuras de pavimentos flexíveis necessárias em função do tráfego.

2.7.1 Ensaio de expansão

Nesta etapa os corpos de prova são submersos em água e efetuadas leituras, com o auxílio de um deflectômetro, a cada 24 horas por um período mínimo de quatro dias. Os dados são tabulados, conforme tabela e a porcentagem de expansão é calculada conforme se apresenta na Equação 3.

$$Expansão(\%) = \frac{\textit{leitura final do deflectômetro} - \textit{leitura inicial}}{\textit{altura inicial do corpo de prova}} \cdot 100 \quad (\text{Equação 3})$$

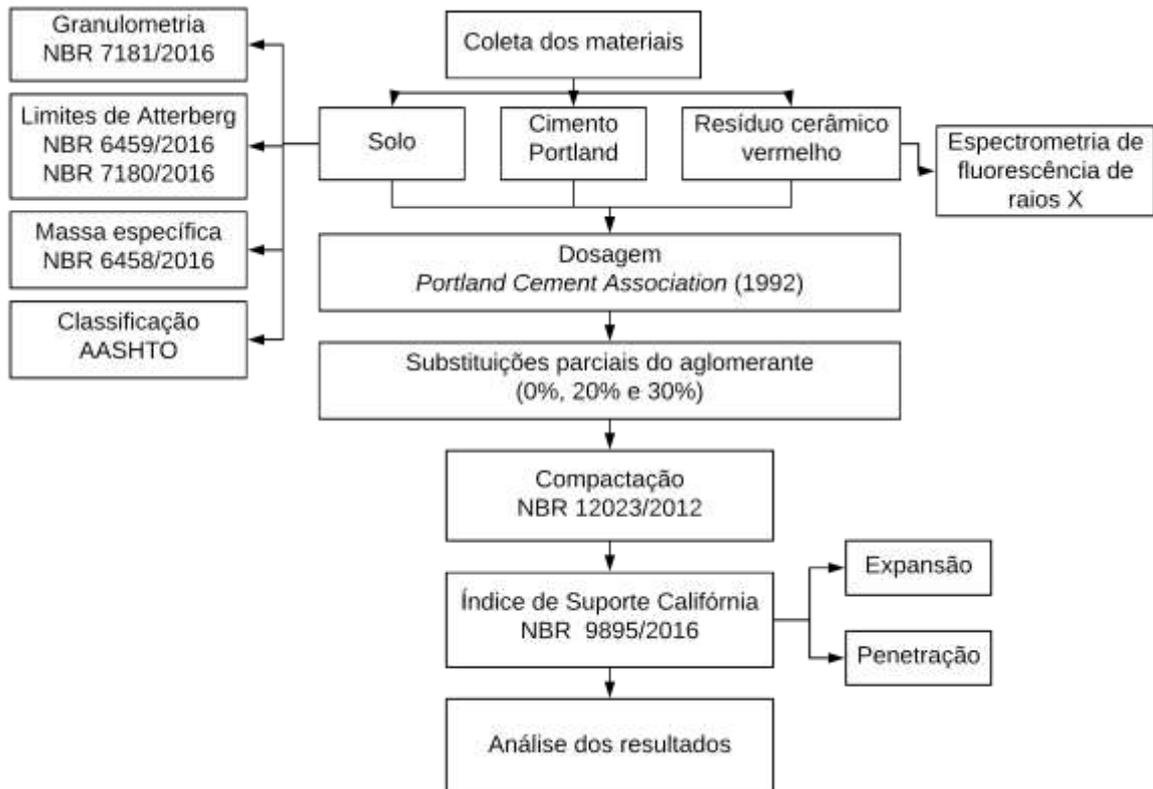
2.7.2 Ensaio de penetração

Esta fase do ensaio consiste na aplicação de uma carga, por meio de um pistão, ao corpo de prova saturado a fim de verificar a relação entre a pressão necessária para promover penetrações de 2,54mm e 5,08mm e a pressão necessária para promover a mesma penetração em um material de referência (DNIT, 2006) cujos dados são apresentados na supracitada NBR.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais e metodologias dos ensaios realizados. A Figura 2 mostra o fluxograma com todas as etapas metodológicas para o desenvolvimento desta pesquisa.

Figura 2 – Fluxograma metodológico da pesquisa



Fonte: Autor, 2020

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Solo

A amostra de solo utilizada na realização dos ensaios foi coletada na cidade de São João do Rio do Peixe, cidade localizada no alto sertão do estado da Paraíba. Na região, o solo apresenta característica argilosa sendo aproveitado principalmente pelo setor da indústria cerâmica na produção de blocos em olarias situadas no município.

A amostra, de aproximadamente três metros cúbicos que apresentava um alto índice de torrões, foi transportada à cidade de Cajazeiras-PB em um caminhão basculante e disposto ao ar livre no pátio localizado nas imediações do laboratório de Geotecnia do IFPB-*campus* Cajazeiras, no qual foi desenvolvida grande parte da presente pesquisa.

O solo *in natura* foi destorroado, quarteado e armazenado em baldes dentro do laboratório para realização dos ensaios.

3.1.2 Cimento Portland

Foi utilizado na realização dos ensaios o cimento tipo CPV-ARI, que por sua vez não foi submetido a nenhum tipo de ensaio de caracterização. Na Tabela 4 são apresentadas as características físicas e químicas, segundo dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 4 – Propriedades químicas e físicas do cimento CPV -ARI

Propriedades químicas	
Perda ao fogo (%)	1,15
SiO ₂ (%)	18,96
Al ₂ O ₃ (%)	3,92
Fe ₂ O ₃ (%)	2,95
CaO (%)	61,06
MgO (%)	3,08
SO (%)	3,19
Na ₂ O (%)	0,15
K ₂ O (%)	1,03
Resíduo insolúvel (%)	0,67
CaO livre (%)	2,96
Propriedades físicas	
Resíduo na peneira ABNT n° 200 (%)	0,1
Resíduo na peneira ABNT n° 325 (%)	2,2
Massa específica (g/cm ³)	3,14
Área específica – Blaine (m ² /kg)	402
Início de pega (min.)	184
Fim de pega (min.)	261
Resistencia a compressão (MPa) – 1 dia	26,5
Resistencia a compressão (MPa) – 3 dias	40,5
Resistencia a compressão (MPa) – 7 dias	43,1
Resistencia a compressão (MPa) – 28 dias	54,1
Expansividade a quente	0

Fonte: Fabricante, 2019

3.1.3 Resíduo cerâmico vermelho

O resíduo cerâmico utilizado na substituição parcial do cimento Portland na presente pesquisa foi obtido na Cerâmica Irmãos Rolim, localizada na PB-393 na cidade de São João do Rio do Peixe, Paraíba. A empresa fornece para toda região do alto sertão paraibano, o que resulta em uma produção semanal de aproximadamente 220 mil blocos, sendo o mais produzido o de dimensões 19x19x9cm, estando em fase de testes à fabricação de telhas cerâmicas. A coleta foi realizada no pátio da supracitada olaria, onde habitualmente fica disposto o volume de resíduo gerado na produção, transporte e armazenamento do material, conforme Figura 3. Informações fornecidas pelo setor de produção contabilizam que as perdas na produção são de aproximadamente 550kg/semana.

Figura 3 – Disposição dos resíduos cerâmicos na indústria



Fonte: Autor, 2020

O RCV passou por um processo de beneficiamento com a finalidade de reduzir a granulometria do material até adquirir a finura adequada. Com o auxílio de um triturador foi realizada a moagem previa do material, que em seguida seguiu para o trituração manual com o auxílio de um soquete. O processo de beneficiamento foi encerrado com o peneiramento do RCV, descartando o material retido na peneira ABNT n° 200 (abertura de 0,0075mm).

A finura do material utilizado na realização desta pesquisa tomou como base bibliografias que associam o aumento da área específica do material à atividade pozolânica apresentada pelo mesmo, a saber, do estudo realizado por Medeiros *et. al.* (2016) e Garcia *et. al.* (2014).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Granulometria

A análise granulométrica conjunta do solo a ser utilizado para a mistura solo-cimento foi realizada conforme NBR 7181 (ABNT, 2016). As amostras, preparadas de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016), passaram pelas peneiras n° 10 (abertura de 2mm) e n° 200 (abertura de 0,075mm) sendo registradas suas respectivas porcentagens passantes, enquanto a massa retida foi lavada para retirada dos finos e seguiu para estufa a uma temperatura média de 105°C para secagem. A peneira n° 10 não apresentou porcentagem retida.

A amostra seca da peneira n° 200 seguiu o processo de peneiramento no agitador mecânico por um intervalo de 15 minutos onde foram utilizadas as peneiras ABNT n° 16, 30, 40, 50 e 100, suas respectivas porcentagens passantes foram registradas para posterior construção da curva de distribuição granulométrica.

O ensaio de sedimentação foi realizado com uma amostra de 70g de solo passante na peneira n° 10 mantido em repouso por 24 horas em hexametáfosfato de sódio (Figura 4a). Foi utilizado um dispersor elétrico para agitação da mistura por um intervalo de 15 minutos (Figura 4b), posteriormente a transferindo para uma proveta graduada na qual foi adicionado água destilada até que se atingisse a marca de 1000ml (Figura 4c). O balanceamento da amostra foi realizado em cinco ciclos, seguido das leituras realizadas com auxílio de um densímetro e um termômetro nos instantes de 30 segundos, 1, 2, 4, 8, 15, 30 minutos e 1, 2, 4, 8 e 24 horas.

Figura 4 – Fases do ensaio de sedimentação a) repouso da amostra em defloculante, b) agitação em dispersor elétrico, c) disposição do material para sedimentação.



a)

b)

c)

Fonte: Autor, 2020

3.2.2 Determinação da massa específica

O ensaio de determinação da massa específica dos grãos seguiu as determinações da NBR 6458 (ABNT, 2016), em ressalva a utilização de apenas uma amostra de solo passante na peneira de abertura 4,8mm mantida em defloculante por um período de 24 horas (Figura 5a). A amostra colocada em um picnômetro foi submetida a uma bomba a vácuo por 30 minutos para retirada total do ar, posteriormente colocada em repouso e realizadas as leituras de peso e temperatura para determinação da massa específica, conforme Figura 5b.

Figura 5 – Fases do ensaio de massa específica. a) repouso da amostra em defloculante, b) leitura em picnômetro.



a)

b)

Fonte: Autor, 2020

3.2.3 Limites de Atterberg

Os ensaios de limite de liquidez e plasticidade foram realizados com uma amostra de solo passante na peneira n° 40, preparadas conforme as determinações da NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente.

Para determinação do limite de liquidez foi utilizado o aparelho de Casagrande, onde uma amostra úmida e homogênea de solo foi submetida a valores de aproximadamente 25 golpes até que se constatasse o fechamento da ranhura realizada com o auxílio de um cinzel, conforme Figura 6.

Figura 6 – Aparelho de Casagrande



Fonte: Autor, 2020

Após cada repetição do ensaio uma amostra de solo era retirada do local de encontro das bordas da ranhura e levada à estufa para secagem e posterior determinação da umidade em um total de cinco repetições.

Para o ensaio do limite de plasticidade uma amostra úmida e homogênea de solo foi utilizada na moldagem de um cilindro de aproximadamente 10cm de comprimento e 3mm de diâmetro. Após a moldagem, com a palma das mãos, se buscou reduzir a umidade do cilindro até que se iniciasse o processo de fissuração procedido da fragmentação da amostra posteriormente destinada à estufa para determinação da umidade. Este ensaio foi executado em um total de cinco repetições, conforme recomendação da NBR 7180 (ABNT, 2016).

O índice de plasticidade foi então determinado através da Equação 2.

3.2.4 Composição química do resíduo

Para avaliar a composição química da amostra de resíduo cerâmico vermelho foi utilizado o método de Espectrometria de fluorescência de raios X.

3.2.5 Dosagem

O método de dosagem utilizado na presente pesquisa se baseia no Manual de laboratório de solo-cimento da *Portland Cement Association* (1992) apresentado na Tabela 5. É possível observar que as porcentagens apresentadas no manual os solos compreendidos pela NBR 12253 (ABNT, 2012) apresentam uma variação pequena nos teores de cimento a serem incorporados à mistura, o que de acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (2004) não produz uma variação significativa diante da análise dos resultados.

Tabela 5 – Teor de cimento para dosagem PCA (adaptada)

Classificação do solo (HBR)	Teor de cimento (% em massa)
A1-a	5
A1-b	6
A2	7
A3	9
A4	10
A5	10
A6	12
A7	13

Fonte: Portland Cement Association (1992)

3.2.6 Compactação

O ensaio de compactação foi realizado com amostra de solo passante na peneira ABNT n° 4, seguindo as determinações da NBR 12023 (ABNT, 2012) que ressalta dois métodos para a realização do experimento de acordo com as características granulométricas do solo, onde foi adotado o método B, para solos com até 30% de partículas com diâmetro superior a 19mm.

As amostras foram preparadas de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016), cuja umidade higroscópica foi determinada com o auxílio de uma balança determinadora de umidade. O ensaio foi realizado para cinco diferentes teores de umidade, sem reuso de material, utilizando

o cilindro pequeno em três camadas compactadas com 26 golpes cada, com o auxílio de um soquete pequeno. Ao fim de cada ensaio o corpo de prova era pesado, retirado do cilindro com o auxílio de um extrator hidráulico. O corpo de prova era então partido e uma amostra era imediatamente retirada em toda a altura de uma das metades, posteriormente pesadas e colocadas na estufa para determinação da umidade. A Figura 7 apresenta alguns dos procedimentos mencionados anteriormente.

Figura 7 – Ensaio de compactação. a) preparação das dosagens para realização de ensaio, b) homogeneização da fase sólida, c) extração do corpo de prova, d) partição do corpo de prova para retirada de amostra.



a)

b)



c)

d)

Fonte: Autor, 2020

3.2.7 Índice de Suporte Califórnia

O ensaio seguiu as orientações da NBR 9895 (ABNT, 2016), com ressalva da moldagem dos corpos de prova apenas nas condições de umidade ótima, esta por sua vez obtida pelo ensaio de compactação anteriormente mencionado. Da amostra utilizada, passante na peneira n° 40, foram moldados um corpo de prova para cada mistura de acordo com a metodologia adotada no ensaio de compactação, descrito no item 3.2.6., utilizando o cilindro grande, compactando a amostra em cinco camadas com 26 golpes cada e com o auxílio de um soquete grande. Para a porcentagem de água adicionada afim de que a umidade de compactação se aproximasse a umidade ótima foi considerada a umidade higroscópica do solo, além de adotar o cimento e RCV utilizados como materiais totalmente secos.

Durante a moldagem de cada corpo de prova, três amostras foram coletadas no instante anterior a compactação da terceira camada, estas por sua vez foram pesadas e levadas à estufa como forma de controlar a umidade na qual o ensaio foi desenvolvido. Concluída a fase de moldagem os corpos de prova foram pesados, conforme Figura 8a e posteriormente imersos em água para realização do ensaio de expansão.

Com o auxílio de um relógio comparador, como apresentado na Figura 8b, foram realizadas leituras a cada 24h de imersão durante um período de quatro dias. Posteriormente os corpos de provas foram emersos e dispostos de forma que a água superficial pudesse escoar para que se pudesse proceder com o ensaio de penetração. Este último, por sua vez, foi realizado com o auxílio de uma prensa, em velocidade de penetração constante, registrando as cargas aplicadas a cada intervalo conforme a supracitada NBR orienta.

Figura 8 – Ensaio de ISC. a) pesagem do corpo de prova compactado, b) imersão para ensaio de expansão.



a)



b)

Fonte: Autor, 2020

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentadas as análises e discussões acerca dos resultados obtidos em todas as etapas desta pesquisa, de forma sintetizada e direta, haja visto que cada item já foi abordado de forma mais detalhada na descrição metodológica.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Os ensaios de análise granulométrica, cujos resultados são apresentados na Tabela 6, permitiram caracterizar o solo de acordo com as porcentagens de materiais passantes no conjunto de peneiras normatizadas pela ABNT, e de maneira conjunta a análise dos finos pelo método de sedimentação.

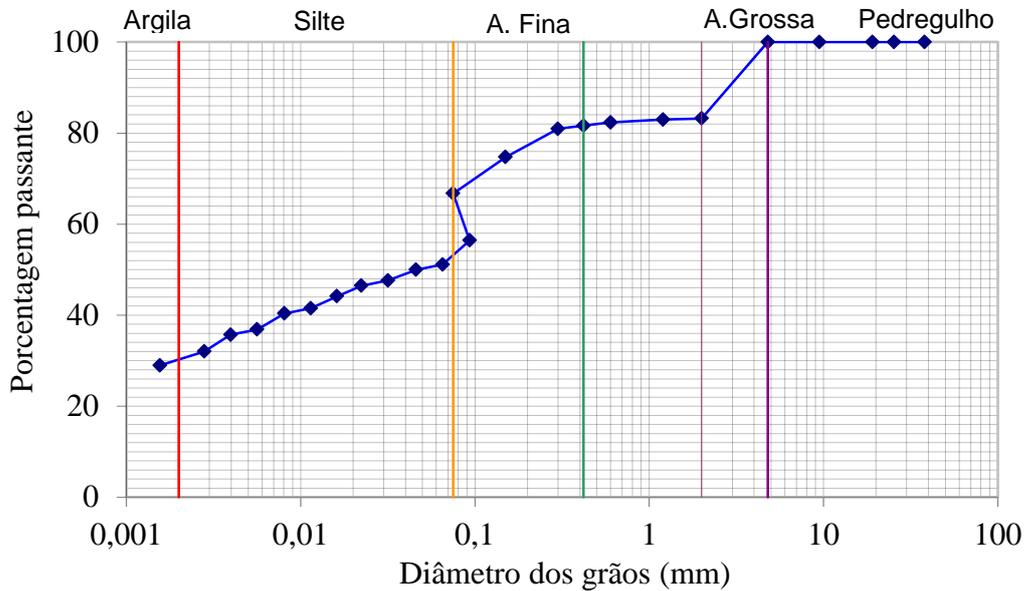
Tabela 6 – Caracterização granulométrica do solo.

Composição	Diâmetro das partículas
Massa específica dos sólidos (g/cm ³)	2,64
Limite de liquidez (%)	57
Limite de plasticidade (%)	16
Índice de plasticidade (%)	41
Pedregulho (%)	0
Areia grossa (%)	16,8
Areia média (%)	1,6
Areia fina (%)	14,9
Silte (%)	34,7
Argila (%)	32
Classificação AASHTO	A-7-6
Classificação SUCS	CH

Fonte: Autor (2020)

Os limites de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade foram de 57, 16 e 41%, respectivamente. A caracterização granulométrica mostrou que se trata de um solo argiloso de alta plasticidade, cujo percentual de argila e silte correspondem a uma porcentagem de 66,7%. A Figura 9 apresenta a curva granulométrica do solo analisado.

Figura 9 – Curva granulométrica.



Fonte: Autor, 2020

A descontinuidade apresentada na curva granulométrica da Figura 9 ocorre devido à sobreposição dos ensaios de peneiramento e sedimentação, Manso (1999) atribui esta irregularidade a porcentagem argilomineral presente na fração granulométrica que nem sempre são desagregadas pela ação do defloculante.

O ensaio de determinação da massa específica do solo apresentou um resultado de $2,64 \text{ g/cm}^3$, valor dentro das especificações do Manual de pavimentação DNIT (2006) para materiais com potencial de utilização em pavimentação rodoviária, que varia entre 2,6 e $2,8 \text{ g/cm}^3$. Já no que trata dos valores máximos fixados para o limite de liquidez e índice de plasticidade pelo supracitado manual, que são de 25 e 6% respectivamente, o solo analisado não de adequa por apresentar percentuais superiores, justificados pelo alto teor de finos presentes no material. Independente desta análise, vale salientar que o potencial de utilização do material está ligado a capacidade de realização do processo de estabilização.

A Tabela 6 apresenta ainda a classificação do solo de acordo com o sistema AASHTO e SUCS, cujos resultados obtidos estão conforme especificações do manual DNIT (2006). As informações serviram como base teórica para determinação da porcentagem de cimento a ser adicionada à amostra, a fim de garantir propriedades de utilização rodoviária conforme Manual de laboratório de solo-cimento da *Portland Cement Association* (1992). Os resultados

apresentados corroboram a análise apresentada por Gomes (2019), para um solo cuja classificação do tipo A-7-6.

De acordo com a Tabela 5 é possível determinar uma adição percentual de 13% em massa de Cimento Portland ao solo analisado. O alto teor de aglomerante a ser adicionado é justificado por bibliografias como Freire (1976) e Associação Brasileira de Cimento Portland (2004) devido à porcentagem de argila presente e como inviáveis para fins de estabilização com cimento. A ABNT se mantém conservadora quanto à utilização para fins de estabilização de solos argilosos, por sua vez não contemplados na NBR 12253 (ABNT, 2012).

Para fins de redução do consumo de cimento nas misturas foram analisadas as porcentagens de 20% e 30% de substituição em massa do aglomerante. A caracterização das misturas foi realizada a partir dos ensaios de compactação e ISC apresentados posteriormente.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO CERÂMICO

A composição química do resíduo de cerâmica vermelha foi obtida através da análise de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), cujos resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Caracterização química do RCV

Óxidos	Teor (%)
SiO ₂	57,084
Fe ₂ O ₃	21,549
Al ₂ O ₃	8,401
K ₂ O	5,860
CaO	3,838
TiO ₂	2,308
MnO	0,266
ZrO ₂	0,187

Fonte: Autor, 2020

Analisando a Tabela 7 é possível observar que os óxidos SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ somam 87,03%, valor superior ao percentual mínimo de 70% estipulado para pozolanas naturais e artificiais apresentado pela NBR 12653 (ABNT, 2014). Entretanto, o teor de K₂O foi de 5,86%, acima do teor máximo de 1,5%, não atendendo as especificações químicas mínimas

para caracterizar a fração de resíduo de cerâmica vermelha como material pozolânico. Os resultados obtidos a partir do ensaio de espectrometria, a saber, do elevado teor de K_2O se apresentaram compatíveis à análise apresentada por Fagundes (2019).

4.3 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Na Tabela 8 são apresentados os resultados referentes aos ensaios de compactação realizados da mistura base, cujo percentual de cimento adicionado é de 13% e das misturas com substituição percentual do aglomerante em porcentagens de 20 e 30%. A tabela apresenta respectivamente a denominação das misturas, massas específicas secas máximas e umidades ótimas para cada mistura analisada.

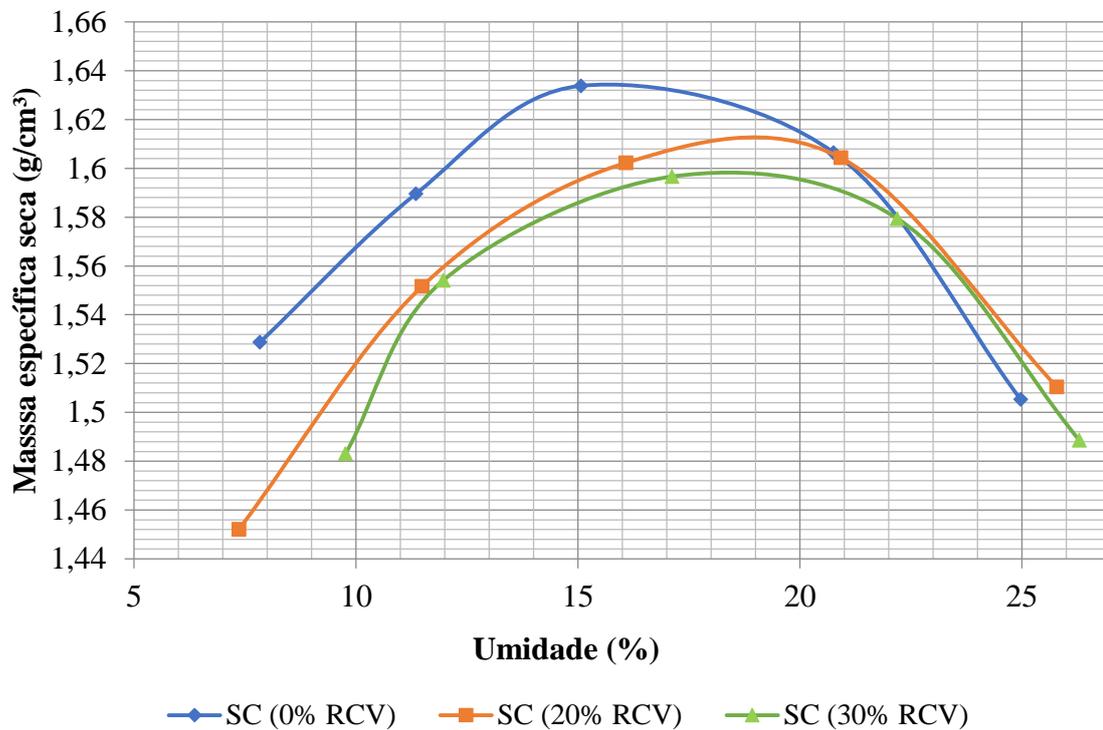
Tabela 8 – Resultados do ensaio de compactação

Mistura	$\rho_{m\acute{a}x}$ (g/cm ³)	$W_{\acute{o}tima}$ (%)
SC (0% RCV)	1,637	16,2
SC (20% RCV)	1,613	17,8
SC (30% RCV)	1,608	18,1

Fonte: Autor, 2020

As curvas de compactação das amostras analisadas são apresentadas na Figura 10. Uma vez que a curva de compactação apresenta tendência polinomial de grau dois, vale ressaltar que os coeficientes de determinação (R^2) foram de respectivamente 0,987, 0,990 e 0,978 indicando uma ótima assertividade do ensaio diante da função de ajuste.

Figura 10 – Curvas de compactação



Fonte: Autor, 2020

Na Figura 10 nota-se um deslocamento das curvas para a direita referentes às amostras acrescidas de resíduo cerâmico. Costa *et. al.* (2018), verifica este comportamento em sua pesquisa devido ao aumento na quantidade de finos do material e consequente aumento na absorção de água. No que trata da diminuição da massa específica seca observada com esse deslocamento das curvas, este pode ser atribuído a maior necessidade de água para envolver completamente as superfícies de contato das partículas mais finas.

4.4 ENSAIOS DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC)

Conhecidas as massas específicas secas máximas e umidades ótimas para cada amostra foram realizados os ensaios de CBR. Os resultados são apresentados na Tabela 9 acompanhados das respectivas condições de moldagens dos corpos de prova.

Tabela 9 – Resultados do ensaio de ISC

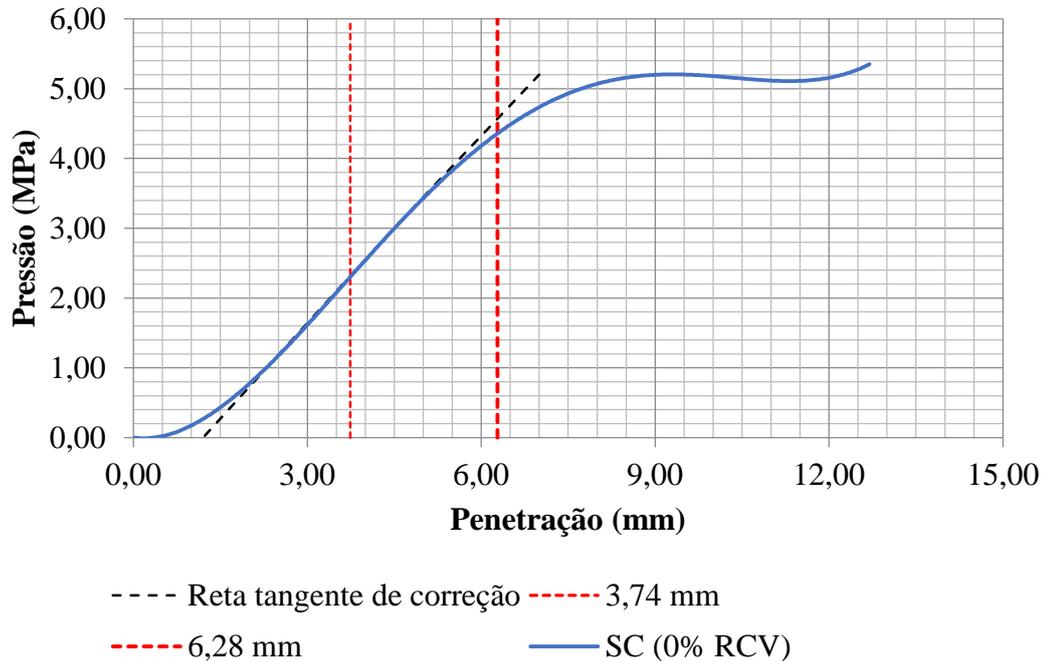
Mistura	W_{mold} (%)	ρ_{mold} (g/cm ³)	CBR (%)	Expansão
SC (0% RCV)	16,5	1,64	33,19	0,36
SC (20% RCV)	17,2	1,60	37,16	0,35
SC (30% RCV)	17,7	1,58	35,06	0,28

Fonte: Autor, 2020

Os valores de umidade de moldagem e massa específica seca de moldagem apresentados na Tabela 9, foram obtidos a partir da média aritmética entre três as amostras recolhidas durante a compactação dos corpos de prova. Durante a análise, o desvio padrão entre os respectivos dados analisados não superaram 10% garantindo a representatividade dos valores médios. Verifica-se que o comportamento das misturas compactadas foi similar aos obtidos nos ensaios de compactação anteriormente mencionados, destaca-se que a diferença entre os parâmetros ótimos quando comparados aos de moldagem está na dificuldade de controle da umidade do solo que está sendo compactado e energia de compactação. Dallacort *et al.* (2002) destaca que as supracitadas diferenças se tornam significativas quando superiores a 2%, valor superior ao observado nesta pesquisa.

Ao analisar a Tabela 9 nota-se que a composição de substituição de 20% de Cimento Portland resultou em um CBR de 37,16%, um incremento de 8,93% na capacidade de suporte de carga em comparação a dosagem base sem adição percentual de resíduo. A Figura 11 apresenta a curva obtida com a realização do ensaio de ISC para a mistura base de solo-cimento sem adição de RCV.

Figura 11 – Curva de ISC para a mistura SC (0% RCV)

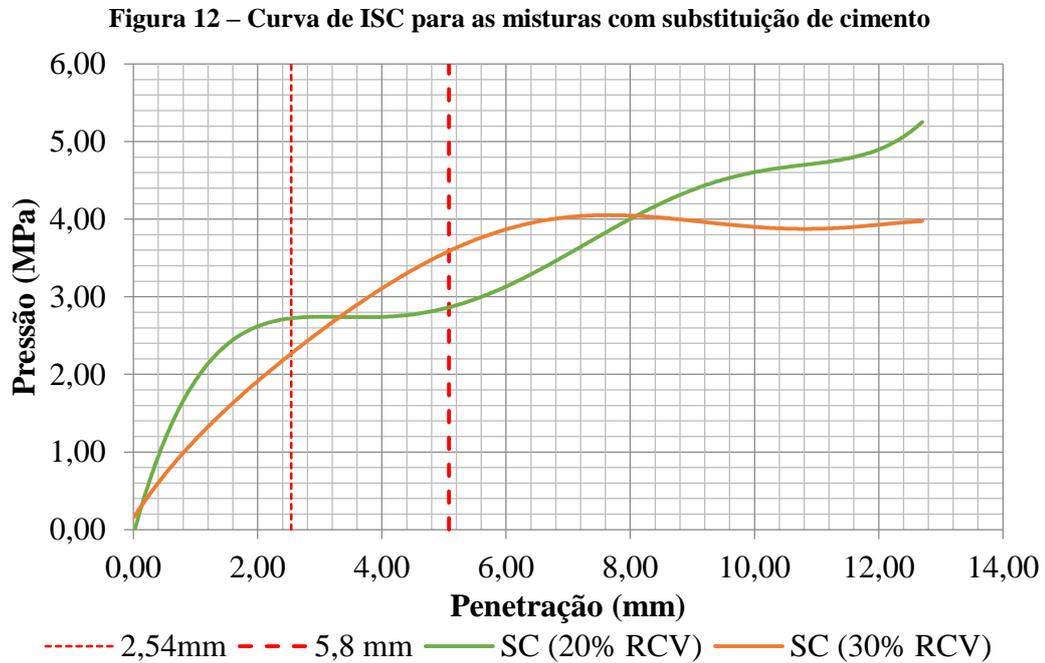


Fonte: Autor, 2020

Para a curva da Figura 11 devido à inflexão apresentada, foi necessária a utilização de um fator de correção, que segundo a NBR 9895 (ABNT, 2016) é determinado pelo ponto em que uma reta tangente ao ponto de inflexão toca o eixo das abscissas. Bibliografias abordam que este comportamento do gráfico se apresenta devido à variação da velocidade aplicada durante o ensaio, fator facilmente registrado na execução de experimentos em equipamentos manuais. A correção propiciou o deslocamento das penetrações padrão em 1,2 mm justificando a capacidade de 33,19% apresentada na Tabela 9.

Silva e Carvalho (2017) afirmam que, geralmente, os maiores valores de CBR se apresentam nos materiais de maior massa específica seca máxima. Entretanto foi observado que o maior valor registrado de CBR resultou da mistura cuja massa específica mencionada apresenta-se em posição intermediária. Este comportamento é analisado por SOUZA *et al.* (2019) como uma consequência a adição de finos a mistura, que reduz a massa específica do composto. Por sua vez, DALLACORT *et al.* (2002), cujos resultados são similares aos verificados nesta pesquisa no que trata do teor ótimo de aglomerante substituído por RCV, ainda atribui à atividade cimentante do material ligante e à presença do RCV, com um efeito de micro-fíler, a formação de um esqueleto sólido composto entre os grãos de solo e finos.

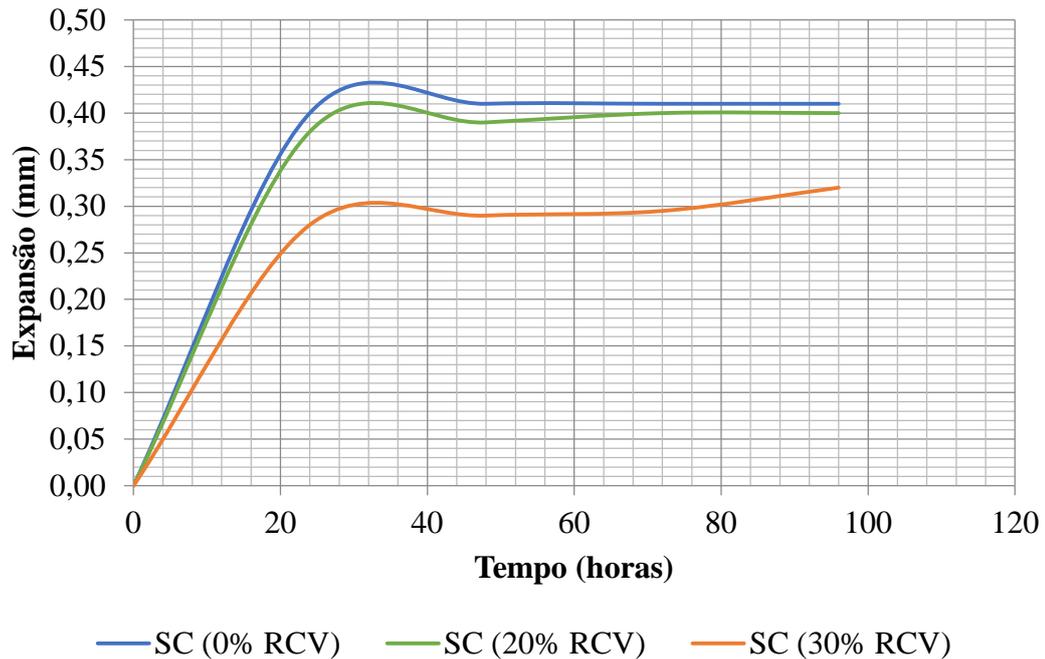
Na Figura 12 são apresentadas as curvas de ISC para as porcentagens de substituição de Cimento Portland.



Fonte: Autor, 2020

A Figura 12 evidencia a discreta perda da capacidade de suporte quando se substitui em 30% o teor de aglomerante da mistura.

Figura 13 – Curvas de expansão



Fonte: Autor, 2020

Analisando a Figura 13 é possível observar uma queda no percentual de expansão diante do aumento do teor de RCV adicionado.

Na Tabela 9, verifica-se que o maior valor de expansão obtido foi de 0,36% para a mistura de solo cimento sem substituição mostrando que os valores obtidos classificam as misturas como pouco expansivas. É possível então perceber um melhoramento do solo natural anteriormente caracterizado como sujeito a grandes variações de volume diante de seus elevados limite de liquidez e índice de plasticidade. As informações apresentadas para o ensaio de expansão são semelhantes aos dados encontrados por Joaquim (2017) para um solo argiloso estabilizado com cimento para fins de pavimentação.

5 CONCLUSÃO

A caracterização da amostra de solo utilizada apresentou uma porcentagem superior a 60% de material passante na peneira n° 200 (abertura 0,0075mm) o que caracteriza uma alta porcentagem de finos, em maior quantidade silte, seguido por argila e areia. O solo foi classificado de acordo com o sistema AASHTO como argiloso, sujeito a altas variações de volume devido aos elevados limite de liquidez e índice de plasticidade, fatores que inviabilizam sua aplicação em camadas de pavimentação conforme especificações DNIT (2006).

A partir da caracterização do solo natural foi possível realizar a dosagem das misturas, que conforme Manual de laboratório de solo-cimento da *Portland Cement Association* (1992) devem ser estabilizadas com uma porcentagem de 13% de Cimento Portland em massa, que por sua vez foi ainda substituído parcialmente por resíduo cerâmico vermelho nas porcentagens de 20 e 30%. O ensaio de caracterização realizado com o resíduo cerâmico apresentou um somatório de 87,03% de sua composição por SiO_2 , FeO_3 e Al_2O_3 , porém devido o teor de K_2O , da ordem de 5,86% o material não pode ser caracterizado como pozolânico, conforme NBR 12653 (ABNT, 2014).

Observou-se que as adições de resíduo ocasionam um decréscimo da massa específica seca máxima e um conseqüente aumento da umidade ótima das amostras, justificadas mediante o aumento da porcentagem de finos da mistura.

A partir da análise de penetração e expansão através do ensaio de ISC, tem-se o resultado de máximo suporte de carga para a mistura solo-cimento com substituição do aglomerante em porcentagem de 20% apresentando 37,16% e 0,35% de CBR e expansão, respectivamente.

Não obstante o resultado insatisfatório obtido para a mistura de solo-cimento com percentual de substituição de 30% foi possível observar um ganho na capacidade de suporte quando comparado à mistura base, o que comprova o efeito positivo da substituição do aglomerante por RCV, por sua vez atuando como micro-fíler preenchendo os vazios da mistura e conferindo um aumento de resistência ao composto. Os presentes resultados permitem concluir que o teor de 20% de substituição de cimento Portland está ligado a maior capacidade de carga analisada. Entretanto, ao se tratar da potencialidade de substituição do Cimento Portland por resíduo cerâmico vermelho, foi possível observar que embora oferecendo uma capacidade de carga discretamente inferior a máxima observada nesta

pesquisa, o teor de substituição de 30% de cimento Portland por resíduo cerâmico vermelho apresenta-se dentro dos parâmetros para utilização em camadas de sub-base de pavimentos flexíveis conformes especificações do Manual de Pavimentação DNIT (2006).

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM 618C**: Fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as mineral admixture in Portland cement concrete. Philadelphia, 2019.
- AMORIM, L. V. et al. Reciclagem de rejeitos de cerâmica vermelha e da construção civil para obtenção de aglomerantes alternativos. **Cerâmica Industrial**, v. 5, n. 4, p. 35-46, 2000.
- ARCANJO, D. M. O. **Estudo da aplicação de aglomerantes álcali-ativados na estabilização de solos para pavimentações**. 2018. 53 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Dosagem das misturas de solo-cimento: Normas de dosagem e métodos de ensaio**. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11804**: Materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12023**: Solo-cimento - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253**: Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: Solo - Índice de suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração. **Oficina de Textos**. São Paulo, 2015.

BATALIONE, G. **Estabilização de solos tropicais com a utilização de rejeitos finos de pedra de uma rocha granítica**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia. Brasília, 2007.

BERNUCCI, L. B; MOTTA, L. M. G; CERATI, J. A. P; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. **Petrobras: ABEDA**. Rio de Janeiro, 2006.501 p.

BERNUCCI, L. B; MOTTA, L. M. G; CERATI, J. A. P; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica. Rio de Janeiro, 2008.

CANCIAN, M. A. **Influência do teor de umidade, porosidade e do tempo de aplicação na mistura solo-cimento para pavimento rodoviário de um solo da bacia do Paraná**. 2013. 201p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento)- Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2013.

CAPUTO, H. P. Mecânica dos Solos e suas Aplicações. **Livros Técnicos e Científicos**. ed 6. Rio de Janeiro, 1988.

CMT; SEST; SENAT. Pesquisa CNT de rodovias 2018: relatório gerencial. Brasília, 2018. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/edicoes>. Acesso em: 03 out. 2019.

COSTA, E. V. L.; SILVA, E. C. G.; RÊGO, M.C. Q. **Influência da fração vermelha do resíduo de construção civil com cal na estabilização de um solo da formação Guabirotuba para pavimentação**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2018.

CUNHA, V. M. **Avaliação experimental da mistura solo-cimento para aplicação em camadas de base de pavimentação.** 2015. Trabalho de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia e Ciências Aplicadas, Brasília, 2014.

DALLACORT, R. et al. Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 511-518, 2002.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de Pavimentação.** Rio de Janeiro. 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação.** 3ª ed. Rio de Janeiro. 2006.

DIAS, J. F. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo.** 2004. 251 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

FAGUNDES, L. P. **Utilização de resíduo de cerâmica proveniente de olarias para estabilização de solo laterítico.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2019.

FREIRE, W. J. **Tratamento prévio do solo com aditivos químicos e seu efeito sobre a qualidade do solo-cimento.** 1976. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1976.

GOMES, T. H. **Análise da resistência a compressão simples de um solo argiloso artificialmente cimentado.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Campina Grande, 2019.

GARCIA, E. et al. Resíduo de cerâmica vermelha (RCV): uma alternativa como material pozolânico. **Cerâmica Industrial**, v. 19, n. 4, p. 31-38, 2014.

GARCIA, E., CABRAL JUNIOR, M., QUARCIONI, V. A., et al. Resíduo de cerâmica vermelha (RCV): uma alternativa como material pozolânico. **Revista Cerâmica Industrial**, v. 19, n. 4, pp. 31 – 38, Julho/Agosto 2014.

GONDIM, L. M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do Agropólo do baixo jaguaribe/estado do Ceará.** 2008. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Ceará, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Seção C, Divisão 23, Grupo 234, Classe 2342-7**, Fabricação de produtos cerâmicos não-refratários para uso estrutural na construção. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <https://concla.ibge.gov.br/busca-online-cnae.html?view=classe&tipo=cnae&versao=10&classe=23427>. Acesso em: 15 dez. 2019.

JOAQUIM, A. G. I et al. **Estudo de dois solos tropicais melhorados com cimento ou cal para emprego em camadas superiores de estradas não pavimentadas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil na área de transportes) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

KUHLMAN, R. H. Cracking in soil cement – cause, effect, control. **Concrete Internacional**. V.16, n. 8. 1994

LAMBE, T. W. Soil mechanics: SI version. **John Wiley & Sons**, Estados Unidos da América, 553 p, 1979.

LEITE, F. da C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MANSO, E. A. **Análise granulométrica dos solos de Brasília pelo granulômetro a laser**. 1999. Tese de Doutorado (Departamento de Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília, 1999.

MARQUES, G. L. de O. **Notas de Aula da Disciplina Pavimentação**. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2006.

MARQUES, G. L. O. **Notas de Aula da Disciplina – Pavimentação. Curso de Engenharia, Departamento de Transportes e Geotecnia**. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2006. 203 p. Disponível em: <http://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2009/03/Notas-de-Aula-Prof.-Geraldo1.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2019.

MARTINS, M. P. B. **Estabilização de solos para fins de pavimentação**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Fundação Educacional de Ituverava, Ituverava, 2018.

MEDEIROS, M. H. F. de et al. Resíduo de cerâmica vermelha e fíler calcário em compósito de cimento Portland: efeito no ataque por sulfatos e na reação álcali-sílica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 21, n. 2, p. 282-300, 2016.

OLIVEIRA, P. H. M. **Influência da adição de resíduo cerâmico nas propriedades mecânicas do concreto**. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Formiga, Formiga, 2014.

PINTO, C. S. Curso básico de mecânica dos solos. **Oficina de Textos**, São Paulo, 2006.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Soil-cement laboratory handbook. **Portland Cement Assoc.**, 1992

RIOS, S.; CRISTELO, N.; DA FONSECA, A.V.; FERREIRA, C. Stiffness behavior of soil stabilized with alkali-activated fly ash from small to large strains. **International Journal of Geomechanics**, n. 04016087, 2017.

RIOS, S.; CRISTELO, N.; DA FONSECA, A.V.; FERREIRA, C. Structural performance of alkali activated soil ash versus soil cement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, n. 04015125, 2016.

SANTANA, H. Pontos básicos e elementos de estabilização granulométrica. **18ª Reunião Anual de Pavimentação**, Porto Alegre, p417-462, 1983.

SANTOS, M. J. L. **Dimensionamento de camadas de reforço de pavimentos rodoviários flexíveis**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveir, Portugal, 2009.

SARTORI, G. **Estudo de estabilização de solos para fins de Pavimentação na região de Campo Mourão**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Paraná, 2015.

SENÇO, W. Manual de Técnicas de Pavimentação. **Pini**. 2ª ed. São Paulo, 2008.

SENÇO, W. O solo-cimento no Estado de São Paulo. **Reunião anual de pavimentação**, Cuiabá, p502-516,1995.

SILVA, P. B. **Estabilização de misturas de resíduos sólidos de demolição e da indústria cerâmica para uso em camadas de pavimentos de vias**. 2014. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SILVA, J. P. S.; CARVALHO, S. B. Uso de resíduos de cerâmica vermelha para o melhoramento de camadas de pavimentos de baixo tráfego em Palmas-TO. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 5, n. 1, p. 41-52, 2017.

SILVA, M. F. **Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo

SOUZA, M. J. **Patologia em Pavimentos Flexíveis**. 2004. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2004.

SOUZA, W. M. et al. Resíduos de cerâmica vermelha como um material ambientalmente sustentável para uso na pavimentação. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 7, n. 2, p. 202-213, 2019

TERZAGHI, K.; PECK, R.B.; MESRI, G. Soil Mechanics in engineering practice. **John Wiley & Sons**, Estados Unidos da América, 549p, 1996.

TOLEDO FILHO, R. D. et al. Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 9, p. 1357–1365, 2007.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. Principles of pavement design. **John Wiley & Sons**. New York, 1991.