



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS CAMPINA GRANDE - PB

SONALY MENDES ARRUDA

AVALIAÇÃO DA GRANULOMETRIA DO RESÍDUO CERÂMICO PARA
UTILIZAÇÃO EM CAMADAS DE SUB-BASE DE PAVIMENTO DE BAIXO VOLUME
DE TRÁFEGO

CAMPINA GRANDE – PB

2018

SONALY MENDES ARRUDA

AVALIAÇÃO DA GRANULOMETRIA DO RESÍDUO CERÂMICO PARA
UTILIZAÇÃO EM CAMADAS DE SUB-BASE DE PAVIMENTO DE BAIXO
VOLUME DE TRÁFEGO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Campina Grande – UFCG, para
encerramento do componente
curricular e conclusão da graduação em
Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a Dra. Izabelle Marie Trindade Bezerra

Co-orientadora: Eng^a. Thamires Dantas Guerra

CAMPINA GRANDE – PB

2018

SONALY MENDES ARRUDA

AVALIAÇÃO DA GRANULOMETRIA DO RESÍDUO CERÂMICO PARA
UTILIZAÇÃO EM CAMADAS DE SUB-BASE DE PAVIMENTO DE BAIXO VOLUME
DE TRÁFEGO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Campina Grande – UFCG, para
encerramento do componente
curricular e conclusão da graduação em
Engenharia Civil.

Aprovado em: ____ de _____ de 2018

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Izabelle Marie Trindade Bezerra - Universidade Federal de Campina Grande
Orientadora

Eng. Thamires Dantas Guerra - Universidade Federal de Campina Grande
Co-orientadora

Prof. Dr. Walter Santa Cruz - Universidade Federal de Campina Grande
Examinador Interno

Eng. Eduardo Antônio Guimarães Tenório - Universidade Federal de Campina Grande
Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

Gratidão, primeiramente, ao Senhor, por quão grandioso é na minha vida.

Gratidão aos meus pais, Carlos e Janete, por nunca me deixarem fraquejar. Os meus exemplos de retidão, força de vontade, dedicação, amor incondicional e alento. Agradeço pelo apoio, pelo incentivo e por todo amor dedicado a mim, mesmo quando não sou merecedora de tanto. Eu os amo muito além de mim.

Gratidão aos meus irmãos, Matheus e Amanda, por serem meus anjos, meus melhores amigos, meus parceiros. Obrigada por estarem ao meu lado e travarem todas as minhas batalhas junto a mim, como se fossem suas. Eu os amo demais.

A Neto, por ser mais que meu primo: um irmão, companheiro, incentivador, amigo e por estar comigo nos bons e maus momentos, nesses vinte e três anos que compartilhamos. Aos demais familiares, que sabem a importância de cada palavra proferida, de cada gesto de amor dado a mim, meu muito obrigada.

À minha orientadora, Isabelle, minha gratidão por me acolher não somente como orientanda, durante toda a graduação. Todas as oportunidades oferecidas, os projetos realizados, as palavras de orientação, cuidado e carinho me conduziram a este momento único e tão importante da minha vida.

À minha co-orientadora, Thamires, pelo carinho, paciência e amizade. Agradeço também por estar presente a cada nova fase e descoberta desta pesquisa, estudando e contribuindo continuamente até a sua concretização.

A Hélio, por dispor-se a trabalhar arduamente neste trabalho. A Carina, Jadilson e Eduardo, por todas as dúvidas sanadas e pelo conhecimento a mim transmitido.

Gratidão à Marcela e Mateus Celestino, pela irmandade e pela disposição para ajudar, ainda que não fosse de suas alçadas. Gratidão ao Grupo do Bingo, pela amizade estabelecida, nos momentos de felicidade, tristeza, de estudos, de festa e de projetos, e aos demais amigos, por tudo.

Obrigada por terem me conduzido até aqui, por lutarem sempre ao meu lado, por todo amor e compreensão, e por fazerem de mim o que sou. Este não é o fim, é apenas o começo.

“Se o machado está cego
e sua lâmina não foi afiada,
é preciso golpear com mais força;
agir com sabedoria assegura o sucesso.”
(Eclesiastes 10:10)

RESUMO

O descarte inadequado de resíduos vem se tornando a cada dia um ponto de preocupação, por terem grande contribuição na poluição ambiental e, em virtude disso, pesquisadores vêm buscando alternativas para seus aproveitamentos. Na indústria da cerâmica vermelha é verificada grande quantidade na produção de rejeito e por isso, já foi e continua sendo foco de muitas pesquisas relacionadas ao setor da construção civil, como, por exemplo, na produção de argamassas, no processo produtivo de blocos, assim como em camadas de suporte de pavimentos. Esta pesquisa avaliou a utilização do resíduo da cerâmica vermelha proveniente de falha de processamento e quebras na armazenagem. Para isso, foram estudadas três misturas solo-resíduo que tiveram como variação a granulometria do resíduo com um percentual de substituição de 50%, na mistura com o solo para uso em sub-base de pavimento de baixo volume de tráfego. Realizou-se ensaios de compactação na energia Proctor Intermediária e CBR, e observou-se que a mistura com resíduo na faixa granulométrica retida entre as malhas das peneiras nº80 e nº200 gerou 62,39% de aumento do valor de CBR da amostra de referência (solo), resultando em 18,35%, embora não tenha alcançado o valor mínimo preconizado pela norma, de 20%;

Palavras-chave: *Cerâmica vermelha, Tráfego, CBR, sub-base.*

ABSTRACT

The inadequate waste disposal is becoming a point of concern every day, as they have a great contribution in environmental pollution and, in virtue of this, researchers have been looking for alternatives to their uses. In the red ceramics industry there is a great amount of waste produced and, therefore, it has been and continues to be the focus of many researches related to the civil construction sector, such as in the production of mortars, in the block production process, as well as in layers of pavement support. This research evaluated the use of red ceramic residue due to failure of processing and storage breaks. For that, three soil-residue mixtures were studied, which will have a granulometry of the residue with a 50% substitution percentage, in the mixture with the soil for use in low-traffic-volume pavement sub-grade. Compaction tests were carried out in the Proctor Intermediate energy and CBR, and it was observed that the mixture with residue in the size range retained between the sieves of the No. 80 and No. 200 sieves generated 62.39% increase in the CBR value of the reference sample (soil), resulting in 18.35%, although it did not reach the minimum value recommended by the standard of 20%;

Keywords: *Red ceramic, Traffic, CBR, sub-grade.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura dos Pavimentos rígido e flexível	15
Figura 2 - Disposição das tensões verticais no solo de fundação de pavimentos flexível e.....	15
Figura 3 - Classificação dos revestimentos rodoviários	16
Figura 4 – Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas.	18
Figura 5 – Fluxograma do processo produtivo da indústria cerâmica.....	20
Figura 6 - Fluxograma metodológico	24
Figura 7 - Britador de mandíbulas Renard BMA 21	25
Figura 8 - Britagem do material cerâmico	25
Figura 9 - Resíduo cerâmico após a britagem	26
Figura 10 - Etapa de peneiramento do resíduo	26
Figura 11 - Coleta do solo	28
Figura 12 - Sedimentação com uso de defloculante	29
Figura 13 - Cilindros de corpos de prova	30
Figura 14 - Corpos de prova imersos em água	31
Figura 15 - Prensa de penetração de CBR.....	31
Figura 16- Análise granulométrica do solo	34
Figura 17 - Análise granulométrica das misturas avaliadas	37
Figura 18 - Curvas de compactação	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Misturas solo-resíduo avaliadas.....	23
Tabela 2 - Classificação do solo.....	33
Tabela 3 - Classificação secundária do solo.....	35
Tabela 4 - Composição química do solo.....	35
Tabela 5 - Composição química do resíduo.....	35
Tabela 6 - Massa específica real do resíduo cerâmico.....	36
Tabela 7 - Classificação secundária das misturas avaliadas.....	37
Tabela 8 - Limites de Atteberg das misturas.....	38
Tabela 9 - Resumo dos ensaios de compactação e massa específica real.....	39
Tabela 10 - Cálculo do índice de grupo.....	41
Tabela 11 - CBR.....	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. OBJETIVO GERAL.....	13
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1. PAVIMENTO RODOVIÁRIO	14
2.1.1. Camadas de suporte.....	14
2.1.2. Revestimento.....	16
2.1.3. Bases e sub-bases	17
2.2. USO DA CERÂMICA VERMELHA EM CAMADAS DE SUPORTE DE PAVIMENTOS	20
3. MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1. RESÍDUO CERÂMICO.....	24
3.1.1. Beneficiamento do resíduo.....	24
3.1.2. Caracterização do resíduo cerâmico.....	26
3.2. SOLO.....	27
3.2.1. Ensaio de caracterização.....	28
3.2. MISTURA DE SOLO E RESÍDUO CERÂMICO	32
4. RESULTADOS	33
4.1. Caracterização do Solo	33
4.2. Caracterização do Resíduo	35
4.2.1. Análise química.....	35
4.3. Avaliação das misturas	36
4.3.1. Análise Granulométrica	36
4.3.2. Limites de Atterberg.....	38
4.3.3. Compactação	39
4.3.4. Índice de Grupo.....	40
4.3.5. CBR.....	41
5. CONCLUSÃO	44
6. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	45
7. REFERÊNCIAS.....	46

1. INTRODUÇÃO

Dentre as atividades decorrentes do desenvolvimento urbano moderno, a construção civil se apresenta como um dos principais instrumentos, ou até como fator de maior relevância a ser associado a produção e descarte de resíduos. No Brasil, devido ao considerável aquecimento deste setor, tornaram-se notórias as deficiências referentes à gestão de resíduos sólidos da magnitude dos provenientes da atividade da construção civil.

Grandes obras de edificação, barragens e rodovias, movimentam os setores industriais na busca por matéria prima de qualidade e em abundância. A exigência crescente desses materiais eleva os volumes de produção pois, devido ao baixo valor unitário, este processo só se torna viável quando realizado em grande escala, o que acelera o esgotamento das jazidas, a começar pelas mais próximas aos centros urbanos.

A geração dos resíduos acontece de maneira sistêmica, acompanhando a cadeia produtiva do setor da construção civil: desde os processos extrativos, beneficiamento, processos industriais, até o uso e descarte do material. Desta forma, evidencia-se as designações atribuídas pela resolução do CONAMA de número 307 (2002), a qual confere aos geradores, transportadores e gestores municipais as competências de minimizar os impactos ambientais provenientes das etapas da construção civil.

Segundo da Silva (2014), quanto mais distantes dos centros consumidores as jazidas de extração vão ficando, maiores serão os valores unitários desses produtos, pois os custos com transporte tendem a aumentar, onerando ainda mais os valores das obras e agredindo cada vez mais a harmonia do meio ambiente.

Torna-se mais importante, a cada dia, o desenvolvimento de tecnologias capazes de reinserir os resíduos industriais em novos processos. A urgência da melhoria no tratamento dos recursos naturais destaca a seriedade da pesquisa na tentativa de mitigar os impactos gerados pelos resíduos ao meio ambiente.

A NBR 10004 (ABNT, 2004) “classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente”, da seguinte forma:

- Resíduos Classe I - Perigosos (inflamáveis, reativos, corrosivos, tóxicos ou patogênicos.);
- Resíduos Classe II - Não-perigosos
 - Classe IIA - Não-inertes (biodegradáveis, combustíveis, solúveis em água);

- Classe IIB - Inertes (resíduos que, quando expostos à água, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água).

Resíduos Classe IIB possuem grande aplicação no mercado. Como exemplos de materiais desta classe podem ser citados, sucatas de materiais ferrosos, resíduos de borracha, ou quaisquer outros materiais não perigosos, tais como entulhos e resíduos da produção de materiais cerâmicos.

De acordo com a FIEMG (2013), um dos setores industriais que apresenta elevados volumes de resíduo é o da indústria da cerâmica. Desde as grandes produtoras até as pequenas olarias, a grande perda de material, ligada às deficiências do método produtivo – que compreende desde a extração da argila até a cura e queima dos materiais cerâmicos- e à fragilidade intrínseca do produto final, representa um problema ambiental e econômico bastante expressivo.

A indústria cerâmica opera 4,8% de todas as indústrias da construção civil, com uma movimentação anual de R\$18 bilhões, segundo a Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER, 2015), com 6903 empresas no Brasil produzindo mais de 5 bilhões de peças por ano - tijolos e telhas.

Segundo o SEBRAE (2008), em 2005 foram produzidas 63,6 bilhões de peças cerâmicas: um crescimento de mais de 113% em relação a 2004. Individualmente, a produção de blocos e tijolos cresceu 90,5% neste mesmo período, e a de telhas, 239%.

O volume de resíduos produzido por este setor tem sido descartado e acumulado inadequadamente, gerando problema de saúde pública: a produção de resíduos vermelhos rejeitados pelas cerâmicas brasileiras apresenta em média 14% do valor total de toda produção. Essa porcentagem corresponde em média a 3 milhões de blocos por ano (7500 toneladas de resíduos), sendo estes provenientes das perdas no processo de produção cerâmico (SEBRAE, 2008).

A Associação Brasileira de Cerâmica - ABCERAM, discrimina a situação geral do Brasil quanto ao consumo e produção de materiais do tipo cerâmico, destacando que mesmo havendo uma concentração direta de grandes produtores e consumidores nas regiões Sudeste e Sul do país, o desenvolvimento na demanda por materiais do tipo cerâmicos na região Nordeste junto ao setor da construção civil tem se destacado.

Diante da necessidade da racionalização do uso dos recursos e do apelo ambiental e social do reaproveitamento de resíduos na construção civil, em evidência aos resíduos da

produção de materiais cerâmicos, o estudo do emprego desses materiais em sub-base de pavimentos se mostra atual e necessário.

Vieira (2005) estudou o aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos, e concluiu que o aumento do teor de substituição do resíduo cerâmico no concreto tende a aumentar a porosidade total e o índice de vazios, além de reduzir a consistência de argamassas, sugerindo que o resíduo estudado atua não apenas como *filler*, mas também como pozolana.

Dias (2004) direcionou sua pesquisa à avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo, e mostrou que o uso de resíduo em camadas de suporte de pavimentos de baixo custo é possível e viável.

Em consonância com a proposta de analisar a viabilidade técnica do uso de resíduos cerâmicos em obras de pavimentação, este estudo buscará caracterizar e encontrar a condição ótima de adição de resíduo cerâmico em camada de sub-base de pavimento flexível de baixo volume de tráfego.

1.1. OBJETIVO GERAL

Este projeto tem como objetivo analisar faixas granulométricas do resíduo cerâmico, proveniente da quebra e falha de blocos e telhas, para uso em camada de sub-base em vias com baixo volume de tráfego.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliação de faixas granulométricas do resíduo cerâmico para uso em camada de sub-base;
- Caracterização física e química do resíduo cerâmico e do solo utilizado;
- Avaliação da relação entre os teores de umidade ótima e CBR's das misturas avaliadas;
- Avaliação das características físicas e mecânicas da mistura solo-resíduo obtida para cada percentual de substituição avaliado.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. PAVIMENTO RODOVIÁRIO

A definição de Pavimento, segundo Bernucci (2008), “é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.”

Os pavimentos classificam-se em dois tipos, em função do revestimento: rígidos, ou pavimentos de cimento Portland, e flexíveis, denominação aglutinante para pavimentos betuminosos e por calçamento (DNIT, 2006). Esse revestimento é constituído de uma mistura de agregados e ligantes que, além de impermeabilizar a superfície – oferecendo condições de segurança e conforto aos usuários –, transmite os esforços do tráfego às camadas subjacentes.

Pavimentos asfálticos betuminosos são amplamente utilizados, principalmente os de baixo e médio volumes de tráfego, por apresentarem menor custo de implantação e elevada aplicabilidade. Por sua vez, os revestimentos asfálticos de concreto de cimento Portland são mais comumente empregados em rodovias de maior incidência de rodagem de eixos pesados, para resistir a qualquer quantidade de repetições do eixo-padrão com uma fadiga mínima.

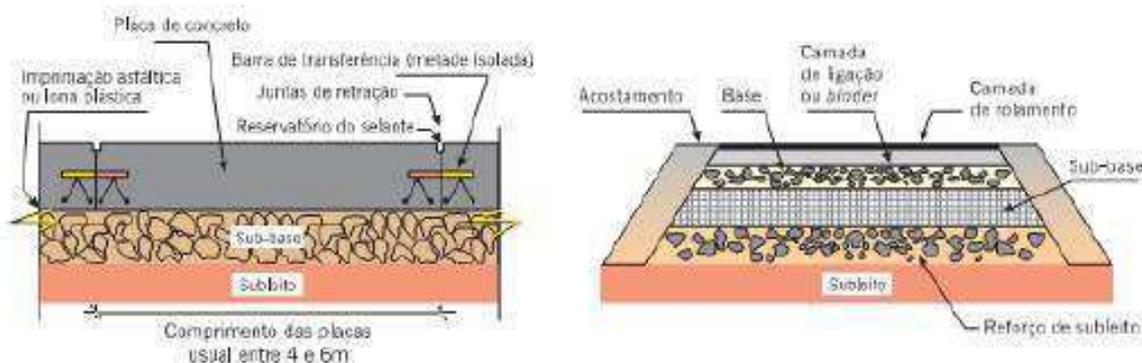
2.1.1. Camadas de suporte

O corpo de uma seção transversal de rodovia é definido de maneira tal, que as tensões exercidas pelos veículos no pavimento se dissipem até que o leito natural seja capaz de absorvê-las. Para isso, cada camada componente possui uma especificação técnica, a depender do sistema estrutural adotado, e variante com as condições naturais do ambiente, formando um sistema coeso e capacitivo (BERNUCCI, 2008).

Os estudos das camadas de suporte são essenciais para garantir a segurança e durabilidade do pavimento. Em termos de pavimento asfáltico, a seção transversal é composta de quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço de subleito. O pavimento rígido, por sua vez, é composto de um revestimento de concreto de cimento

Portland, sobre uma sub-base granular e o sub-leito natural (DNIT, 2006). A Figura 1 apresenta a estrutura dos pavimentos rígido e flexível.

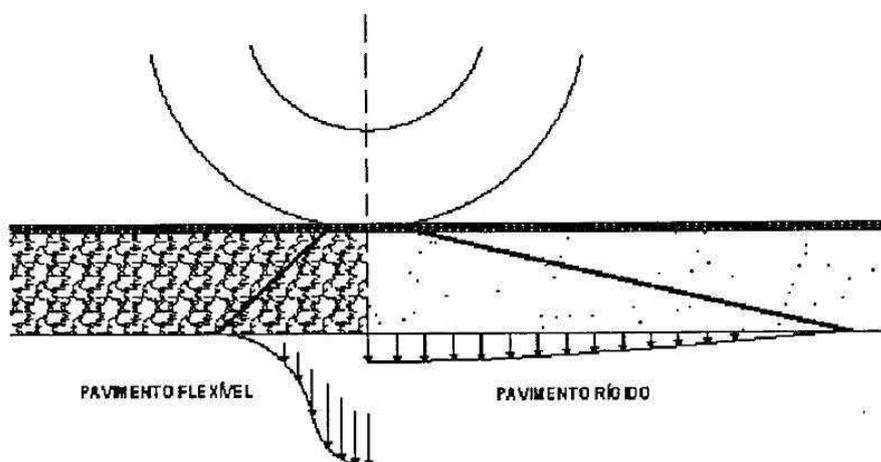
Figura 1 - Estrutura dos Pavimentos rígido e flexível



(Fonte: Bernucci, 2008)

Limitar as tensões e deformações na estrutura do pavimento (Figura 2), por meio da combinação de materiais e espessuras das camadas constituintes, é o objetivo da mecânica dos pavimentos (Medina, 1997 apud Bernucci, 2008).

Figura 2 - Disposição das tensões verticais no solo de fundação de pavimentos flexível e rígido.



(Fonte: Pinto, 2006)

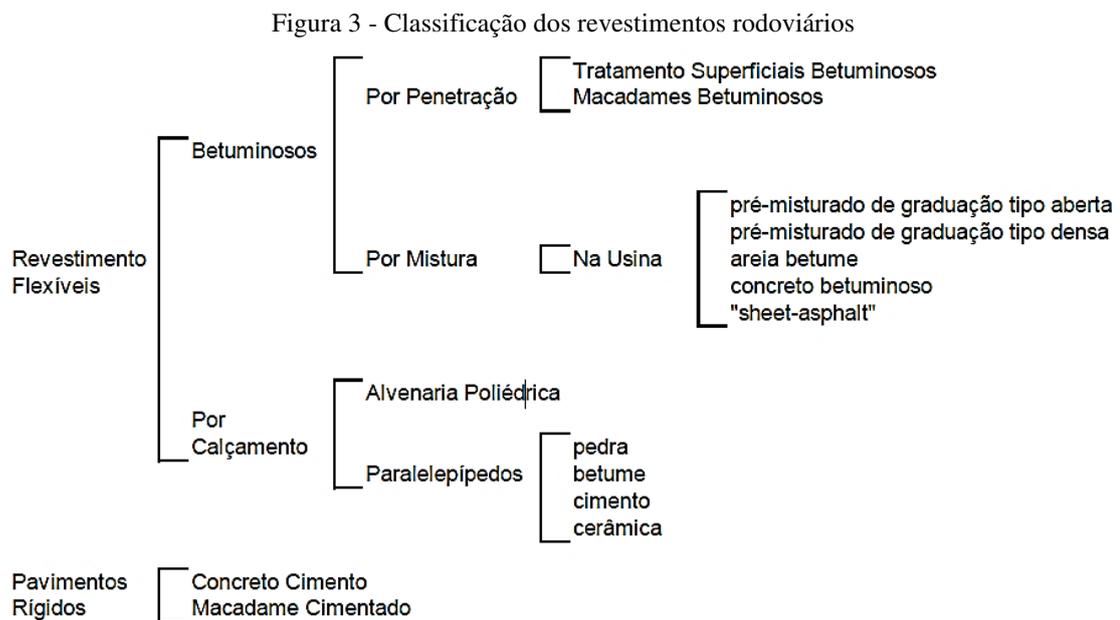
As cargas a que se submete o pavimento são aplicadas de forma cíclica ou repetitiva, ambas no âmbito transitório e, portanto, devem resistir à periodicidade de aplicação por um tempo de vida satisfatório (BALBO, 2007).

O procedimento preliminar do dimensionamento de uma estrutura de pavimento é a seleção dos materiais. A tecnologia tradicional de seleção baseia-se no tipo de revestimento, na distribuição granulométrica do agregado, na sua disponibilidade regional, na resistência do material de base e sub-base e na forma e durabilidade dos grãos deste material.

2.1.2. Revestimento

Esta camada, também conhecida como pista de rolamento, é submetida à tração e compressão, em função da flexão e transmite, para as camadas subjacentes, principalmente a compressão (BALBO, 2007). Desta forma, a caracterização do material aqui empregado é o principal mecanismo de definição do atendimento às especificações técnicas e da previsão do comportamento *in situ*, visto que a coesão e a rigidez das camadas de suporte não são atendidas com o uso de qualquer material.

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) agrupa os revestimentos de acordo com a Figura 3.



(Fonte: DNIT, 2006)

2.1.2.1 Revestimentos Flexíveis

a) Betuminosos

Denominam-se assim, revestimentos constituídos de ligante betuminoso, obtido através da destilação fracionada do petróleo, associado a agregados de natureza diversa. No Brasil, utiliza-se a designação CAP (Cimento asfáltico de Petróleo) para nomear este produto, semi-sólido a baixas temperaturas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas (Bernucci, 2008).

b) Por Calçamento

Ainda amplamente utilizados em vias urbanas, estacionamentos e rampas mais íngremes, revestimentos com paralelos ou alvenarias poliédricas, vêm sendo subutilizados em rodovias devido ao uso mais intensificado de pavimentos de asfalto e concreto, por questões econômicas e de agilidade construtiva (DNIT, 2006).

2.1.2.2 *Revestimentos Rígidos*

Constituído de uma camada de CCP (concreto de cimento Portland), em mistura rica de cimento, areia, agregado graúdo e água, construído sobre uma camada de sub-base adensada (DNIT, 2004).

2.1.3. *Bases e sub-bases*

Abaixo do revestimento localizam-se as camadas de solo que recebem as cargas de compressão resultantes do tráfego sobre o pavimento (Figura 1). A essas camadas, cabe a função de absorver e dissipar essas cargas, até que a fundação (leito natural), esteja apta a resistir (BERNUCCI, 2008).

O DNIT (2006) agrupa a classificação das bases e sub-bases similarmente ao pavimento como um todo: rígidas, semi-rígidas e flexíveis. Bases e sub-bases rígidas são executadas primordialmente de concreto de cimento Portland (CCP). Esses tipos de base e sub-base possuem elevada resistência à tração e dividem-se em dois principais: concreto plástico – adensado manual o mecanicamente – e concreto magro – semelhante ao utilizado em fundações-.

A classificação das bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas proposta pelo Manual de Pavimentação do DNIT (2006) está apresentada na Figura 4 a seguir:

Figura 4 – Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas.



(Fonte: DNIT, 2006)

2.1.3.1 Bases e sub-bases estabilizadas com aditivos

O princípio da estabilização é a busca da melhoria da capacidade resistiva e do desempenho da camada de suporte, neste caso, com o uso de aditivos. São exemplos de estabilização por aditivos, segundo o DNIT (2006):

- a) Solo-cimento: mistura de cimento Portland num teor de 6% a 10%, com solo e água, que resulta num material cimentado com acentuada rigidez à flexão;
- b) Solo melhorado com cimento: adição de 2% a 4% de cimento numa mistura com solo e água, com estabilização pela modificação da plasticidade e sensibilidade do solo à água;
- c) Solo-cal: mistura de solo, cal (entre 5% e 6%) e água, com estabilização por modificação do solo, carbonatação ou pozolanização;
- d) Solo melhorado com cal: mistura semelhante ao solo-cal, com características flexíveis;
- e) Solo-betume: mistura flexível de solo, água e betume;
- f) Bases betuminosas diversas: camadas-tipo revestimento betuminoso, com o mesmo comportamento.

2.1.3.2 Bases e sub-bases granulares

Bases e sub-bases granulares que necessitem de estabilização granulométrica, a fim de satisfazer os requisitos técnicos especificados pelo DNIT, devem ter seus materiais analisados em separado e posteriormente, seu comportamento em conjunto.

A norma do DNIT 141/2010 define estabilização granulométrica como um processo de melhoria da capacidade resistente de materiais “in natura” ou mistura de materiais, mediante emprego de energia de compactação adequada, de forma a se obter um produto final com propriedades adequadas de estabilidade e durabilidade.

Essa estabilização pode ser feita através da adição de rochas britadas, de misturas solo-brita ou ainda, de resíduos, os quais necessitam de uma maior atenção quanto à resistência final e percentual de adição na mistura.

Bases e sub-bases granulares ainda podem ser construídas com macadames hidráulicos e secos. Este processo consiste na aplicação de uma camada de brita de graduação aberta, de tipo macadame que, após compressão, tem os vazios preenchidos por materiais finos através de varredura e compressão, e posterior irrigação, no caso hidráulico (DNIT, 2006).

O DNIT também determina, como condição específica para sub-base de pavimento granulometricamente estabilizada, que o material seja solo, mistura de solos, mistura de solos e materiais britados ou, atualmente, mistura de solos e resíduos, enquadrados dentro da faixa granulométrica consoante ao volume de tráfego definido pelo método USACE, idem para o Índice de Suporte Califórnia ($ISC \geq 20\%$).

A adição de materiais estabilizadores granulométricos tem sido bastante evidenciada nos últimos anos. Klinsky *et al.* (2009) analisaram o reaproveitamento da areia de fundição como material de base e sub-base de pavimentos flexíveis e concluíram que “misturas compostas de 60% de areia de fundição e 40% de solos argilosos da região de Sertãozinho-SP, ou mesmo aquelas com 70% de areia e 30% de solo poderiam ser utilizadas como material para construção de bases e sub-bases de pavimentos de baixo volume de tráfego, uma vez que elas atendem às exigências estabelecidas na especificação ET-DE-P00-015A do DER-SP (2005), Sub-Base ou Base de Solo Arenoso Fino de Comportamento Laterítico – SAFL”.

Rohde (2002), também sugeriu uma adição ao solo de base e sub-base de pavimento, na pesquisa “Escória de Aciaria Elétrica em Camadas de Pavimentos - Estudo Laboratorial”, e mostrou que a escória pode ser utilizada na composição de base ou sub-base de pavimento,

tanto estabilizada granulometricamente quanto modificada por aditivos. Além disso, os resultados do Índice de Suporte Califórnia apontaram uma capacidade de suporte duas vezes maior que a do material padrão (brita graduada).

2.2. USO DA CERÂMICA VERMELHA EM CAMADAS DE SUPORTE DE PAVIMENTOS

Caracterizada por sua cor intensa, a cerâmica vermelha brasileira é composta basicamente de uma massa monocomponente de argila, extrudada a temperaturas que variam entre 800°C e 1000°C (SEBRAE, 2008).

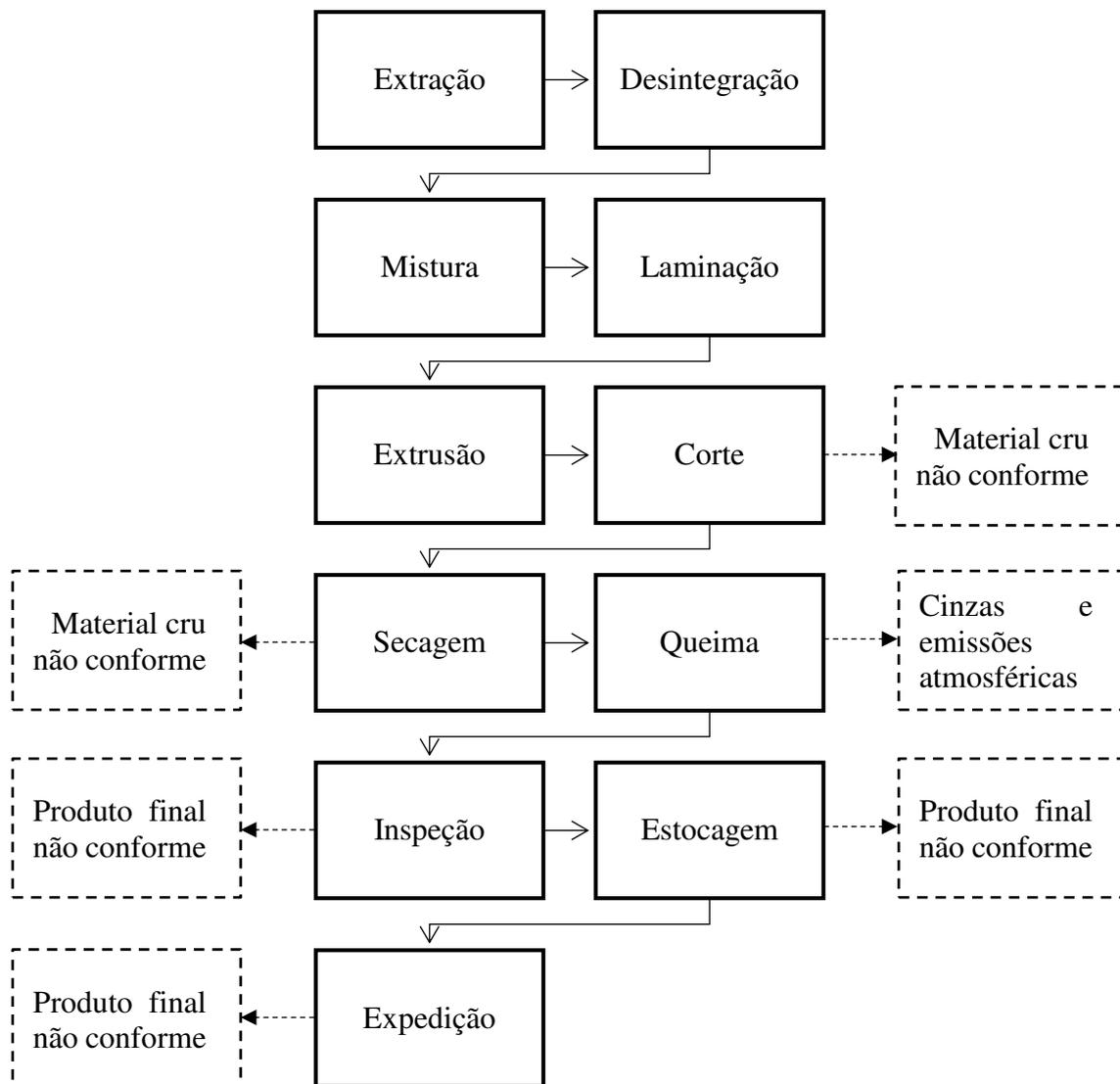
Seu processo produtivo enfrenta grandes desafios para o aprimoramento. A Figura 5 exibe a cadeia produtiva, com destaque para as saídas do sistema, que representam perdas e geração de resíduos. O produto final, tijolo ou telha cerâmica, é rígido e frágil, desta forma, a geração de resíduos não se limita à indústria, mas continua a acontecer em todas as fases de uso do material cerâmico.

A ABNT, por meio das normas NBR 15720-1 (2017), NBR 15720-2 (2017) e NBR 15310 (2009), veta a comercialização de produtos cerâmicos (blocos ou telhas) não conformes ou quebrados. Dessa forma, os resíduos da indústria cerâmica podem ser moídos e reutilizados de diversas formas, tais como vias de acesso, fabricação de agregado graúdo, conformação de quadras de saibro ou até mesmo na indústria cimentícia.

Sob a ótica ambiental, o resíduo cerâmico é considerado limpo devido à sua concentração no local de geração e, conseqüentemente, baixa exposição à contaminação. Representam, portanto, um bom material de reuso e possibilitam uma vastidão de empregos, desde que acondicionados e beneficiados adequadamente.

Diversos são os estudos acerca do emprego destes materiais: Castro *et al.*(2017) caracterizaram cimentos compostos com resíduo da indústria da cerâmica vermelha, através da adição mineral deste material (obtido através de fragmentação fina), para comparar a pozolanicidade desta adição ao cimento CPV ARI, à dos cimentos CPII-Z e CPIV. Este estudo verificou que os cimentos produzidos apresentaram desempenho mecânico superior aos comerciais, com valores de resistência até 50% maiores que os cimentos de referência utilizados.

Figura 5 – Fluxograma do processo produtivo da indústria cerâmica



(Fonte: Adaptado do Guia técnico ambiental da indústria da cerâmica vermelha - FIEMG, 2012)

Na área da pavimentação, os estudos realizados por Dias (2004) demonstram a complexidade do uso do resíduo cerâmico. O desconhecimento da granulometria final do resíduo após a compactação dificultou o diagnóstico com base apenas na metodologia tradicional de análise de requisitos dos materiais para emprego em camadas de suporte, tornando-se necessário tratar da quebra dos grãos como um aspecto relacionado à porosidade do material, determinada pela distribuição granulométrica e pelo formato dos grãos.

Dias (2004) ainda mostrou a inviabilidade do uso do resíduo cerâmico em seu estado primário. Diante disso, Redivo (2011) buscou melhorar este aspecto, utilizando a

fragmentação do material através dos rolos liso e pé-de-carneiro – buscando verossimilidade com os procedimentos usuais de campo.

Os diagnósticos apresentados por Redivo (2011), na análise da utilização de resíduos de cerâmica vermelha em misturas com solo para construção de camadas de pavimento com baixo volume de tráfego, são elucidadores da possibilidade deste emprego. Verificou-se que a mistura solo-agregado resultante poderia ser utilizada em camadas de sub-base de pavimentos com baixo volume de tráfego, com um importante potencial de economia superior a 20% no custo final da estrutura. Porém, os compósitos analisados não apresentaram resultados satisfatórios quando submetidos às cargas usuais da camada de base. Os valores correspondentes as deformações apresentaram valor elevado e, neste caso, tem-se a sugestão da avaliação de outros teores de adição, granulometrias e materiais (solo e agregado).

Portanto, existem fatores condicionantes à estabilização granulométrica com resíduos cerâmicos que só podem ser explanados à medida em que forem estudados. Guerra (2016) estudou a viabilidade do uso de resíduos cerâmicos na camada de sub-base de uma rodovia e constatou que, para teores de adição de 0%, 25%, 50% e 75% não houveram valores de CBR adequados à aplicação para base de pavimento, pois nenhuma das amostras obteve mais que 60%. Os valores obtidos foram de 20,62%, 27,87%, 45,01% e 34,37%, respectivamente, o que indica um teor de adição ótima de 50% de resíduo no compósito.

Guerra (2016) ainda destaca que a granulometria esteve diretamente relacionada com o comportamento mecânico das misturas. O material fino interferiu na absorção de água, o que influenciou a determinação da umidade ótima e, conseqüentemente, no valor do CBR obtido. Semelhante a esse estudo, esta pesquisa analisou a granulometria adequada para uma adição de 50% de resíduo à fração de solo de sub-base de pavimento de baixo volume de tráfego.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O conhecimento das características dos materiais constituintes da mistura é essencial para a correta avaliação do seu comportamento mecânico. Foram caracterizados, separadamente, o solo em seu estado puro, o resíduo cerâmico em seu estado puro e, posteriormente, as misturas propostas por este trabalho.

As misturas solo-resíduo foram definidas pela granulometria do resíduo adicionado, num percentual de substituição de 50%, denominadas a saber:

- G1: correspondente ao resíduo cerâmico retido entre as malhas das peneiras nº40 (0,42 mm) e nº80 (0,18 mm)
- G2: correspondente ao resíduo cerâmico retido entre as malhas das peneiras nº80 (0,18 mm) e nº200 (0,074 mm)
- G3: correspondente ao resíduo cerâmico passante na malha na peneira nº200 (0,074 mm).

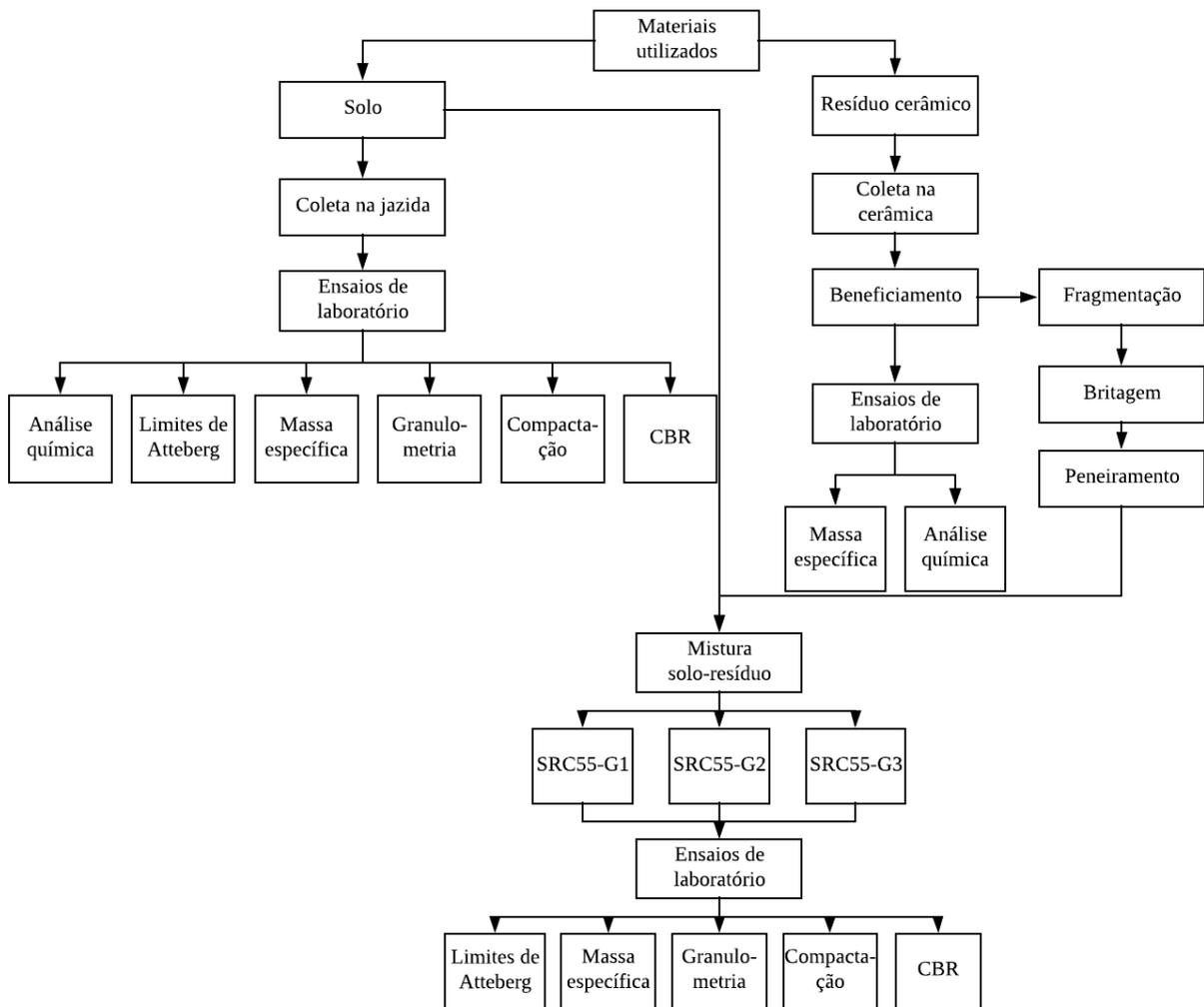
Ficaram então, as misturas, nomeadas de acordo com a Tabela 1:

Tabela 1 – Misturas solo-resíduo avaliadas

MATERIAL	PERCENTUAL	GRANULOMETRIA		
Solo	50%	S	S	S
Resíduo cerâmico	50%	G1	G2	G3
Solo + Resíduo cerâmico	SRC55	SG1	SG2	SG3
MISTURAS SOLO-RESÍDUO				
SRC55-G1	SRC55-G2	SRC55-G3		

O fluxograma da Figura 6 agrupa a organização do desenvolvimento desta pesquisa, demonstrando o desenvolvimento lógico, desde a coleta dos materiais até os ensaios de laboratório empregados.

Figura 6 - Fluxograma metodológico



Fonte: Autor

3.1. RESÍDUO CERÂMICO

Os resíduos utilizados neste trabalho são constituídos de cacos de blocos cerâmicos, provenientes das saídas, por inconformidade do processo produtivo, coletados na Cerâmica Quipauá, localizada no município de Santa Luzia - PB.

3.1.1. Beneficiamento do resíduo

A etapa de beneficiamento do resíduo constituiu-se de um processo de fragmentação manual para obtenção de menores dimensões e posterior britagem, no britador de mandíbulas Renard BMA 21, mostrado nas Figuras 7 e 8. O uso de britadores de impacto que, segundo Dias (2004), apresentam maior poder de redução, torna-se um procedimento padrão, em virtude da busca de um menor custo operacional do reuso de material de descarte.

Figura 7 - Britador de mandíbulas Renard BMA 21



Fonte: Autor

Figura 8 - Britagem do material cerâmico



Fonte: Autor

Devido à limitação de abertura das mandíbulas do equipamento, percebeu-se a necessidade de passar o mesmo material algumas vezes repetidamente. Após este processo, obteve-se um grande volume de resíduo cerâmico (Figura 9), em diversas granulometrias, com grande predominância de finos aderidos e pulverizados.

Figura 9 - Resíduo cerâmico após a britagem



Fonte: Autor

O material britado foi submetido, então, a uma etapa de peneiramento, utilizando o peneirador vibratório (Figura 10), a fim de separar as faixas granulométricas que foram utilizadas nas misturas.

Figura 10 - Etapa de peneiramento do resíduo



Fonte: Autor

3.1.2. Caracterização do resíduo cerâmico

Após a separação do resíduo, por faixa granulométrica definida, recolheu-se amostras para a realização da caracterização química e física. Para tanto, foram realizados os ensaios:

a) Análise química

A composição química foi determinada utilizando espectrometria de fluorescência de raios X (EDX), com detector EDS (Shimadzu, EDX-720). Esta técnica baseia-se no princípio de que a absorção de raios X pelo material provoca a ionização interna dos átomos, gerando uma radiação característica conhecida como “fluorescência”. Foram obtidos os óxidos presentes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Ti_2O , entre outros).

b) Massa específica dos grãos (densidade real)

Dadas as granulometrias empregadas neste estudo, a relação massa/volume varia conforme a finura do material. Para conhecimento da massa específica de cada faixa granulométrica especificada, realizou-se o ensaio de densidade real, de acordo com a norma DNER-ME 093/94.

3.2. SOLO

O solo adotado na pesquisa, provém de uma jazida localizada no bairro Universitário, em Campina Grande-PB, nas proximidades da Universidade Federal de Campina Grande e, após coletado (Figura 11), acondicionado em sacos, foi transportado e depositado no Laboratório de Engenharia de Pavimentos e Geotécnica na instituição, para a realização dos ensaios.

Figura 11 - Coleta do solo



Fonte: Autor

3.2.1. *Ensaio de caracterização*

Para a realização dos ensaios de caracterização física, o solo analisado foi preparado conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016).

a) *Análise granulométrica*

A análise granulométrica, de acordo com Pinto (2006), trata do reconhecimento do tamanho dos grãos de um solo. No âmbito da Mecânica de Solos, esta análise consiste em duas fases: peneiramento (NBR 7181, ABNT 2016) e sedimentação (NBR 7181, ABNT 2016). A definição granulométrica pelo método do peneiramento visa caracterizar a dimensão dos grãos do material, percentualmente, tomando como base as aberturas das peneiras padronizadas utilizadas no ensaio. Em compensação ao método de análise granulométrica por peneiramento, ao uso e trabalho analítico de solos finos, faz-se necessária a aplicação de um método de sedimentação contínua em meio líquido (CAPUTO, 1988).

A Figura 12 contempla a etapa de sedimentação realizada nesta pesquisa, com o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio.

Figura 12 - Sedimentação com uso de defloculante



Fonte: Autor

b) Limite de consistência

Em distinção aos solos ditos grossos, os solos finos possuem ensaios de caracterização baseados na sua consistência. Para tanto, utiliza-se dos *limites de Atterberg*, em especial os Limites de Liquidez e de Plasticidade, os quais apresentam panoramas a respeito do comportamento plástico-líquido do solo sob diferentes tipos de umidade. Nessa pesquisa foram determinados o limite de Liquidez seguindo as prescrições da NBR 6459 (ABNT, 2016) e o limite de plasticidade de acordo com NBR 7180 (ABNT, 2016).

c) Massa específica (densidade real)

A massa específica, relação entre a massa dos sólidos do solo e o seu volume, necessária para caracterização dos grãos, foi realizada segundo a norma DNER-ME 093/94.

d) Compactação

Os ensaios de Compactação foram realizados seguindo as prescrições da norma DNIT 164/2013 – ME. Definiu-se, com base na solicitação de resistência da camada de sub-base, que a energia utilizada seria Proctor Intermediária, com 26 golpes em 5 camadas, no cilindro grande, com soquete de 4,5kg, altura de queda 45,72cm e reuso do material.

Foram moldados corpos de prova, variando-se o teor de umidade de compactação, e assim, foram determinadas a umidade ótima e a massa específica aparente máxima seca, por meio da curva de compactação.

e) Índice de Suporte Califórnia – ISC (California Bearing Ratio – CBR)

Os ensaios de CBR foram realizados de acordo com os procedimentos recomendados pela norma DNIT 172/2016 – ME. Para isso, foram moldados três corpos de prova para cada teor de adição de resíduo avaliado, moldados na umidade ótima obtida no ensaio de compactação, como pode-se observar na Figura 13.

Figura 13 - Cilindros de corpos de prova



Fonte: Autor

O rompimento do corpo de prova aconteceu, de acordo com o procedimento estabelecido pelo DNIT, quatro dias após a compactação e imersão em água (Figura 14), com o solo ainda saturado, como pode-se observar na Figura 15.

Figura 14 - Corpos de prova imersos em água



Fonte: Autor

Figura 15 - Prensa de penetração de CBR



Fonte: Autor

3.2 MISTURA DE SOLO E RESÍDUO CERÂMICO

Assim como na avaliação do solo, como amostra de referência, as misturas solo-resíduo foram submetidos a ensaios de Limites de Atteberg, Granulometria, Massa específica real, Compactação e Índice de Suporte Califórnia, utilizando as mesmas normas previamente citadas.

4. RESULTADOS

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solo (SUCS), o solo utilizado na pesquisa pode ser enquadrado no tipo SM: uma areia siltosa não-plástica e inativa, com base na carta de plasticidade de Casagrande (PINTO, 2006). De acordo com o sistema Rodoviário (TRB - Transportation Research Board), o solo pode ser classificado como A-2-4: um solo predominantemente arenoso, com características secundárias baseadas na porcentagem de finos. A Tabela 2 exibe um resumo da classificação do solo, com base nos ensaios de caracterização utilizados:

Limite de Liquidez	21,07%
Limite de Plasticidade	0%
Índice de Plasticidade	NP
Massa específica dos grãos	2,66 g/cm ³
RESUMO DA GRANULOMETRIA	
Pedregulho (>4,8mm)	11,30%
Areia Grossa (4,8mm - 2,0mm)	5,84%
Areia Média (2,0mm - 0,425mm)	21,88%
Areia Fina (0,425mm - 0,075mm)	37,21%
Silte (0,075mm - 0,005mm)	17,92%
Argila (<0,005mm)	5,85%
CLASSIFICAÇÃO DO SOLO	
TRB	SM
SUCS	A-2-4

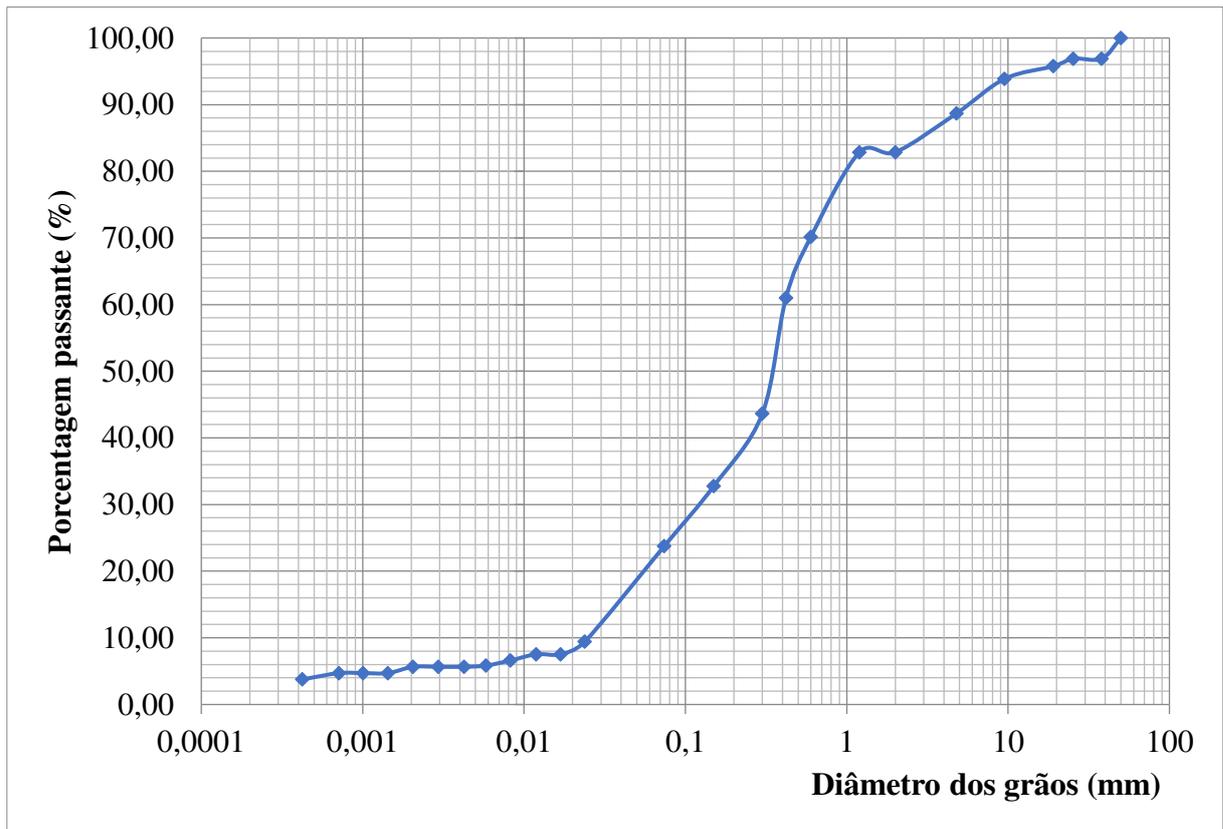
Ainda de acordo com a Classificação Unificada, a solos granulares, tais como areias, importa conhecer sua característica secundária. Para isso, deve-se verificar, na sua composição granulométrica, a predominância de grãos de um certo diâmetro e a existência de descontinuidades eventuais na curva granulométrica (PINTO, 2006).

Os solos, então, podem ser classificados como “bem-graduados” ou “mal-graduados” e “uniformes” ou “não-uniformes”, de acordo com o coeficiente de curvatura (CC) e coeficiente de não-uniformidade (CNU), respectivamente. Considera-se um material bem-graduado aquele em que o CC varia entre 1 e 3, e a areia é uniforme, quando o CNU está abaixo de 2.

O cálculo destes coeficientes depende dos diâmetros equivalentes a 60%, 30% e 10% do material passante, obtidos diretamente da curva granulométrica (Figura 16) aplicados às equações:

$$CC = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad \text{e} \quad CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Figura 16- Análise granulométrica do solo



A Tabela 3 resume os diâmetros equivalentes, os coeficientes de curvatura e não-uniformidade, e classifica o solo arenoso utilizado nesta pesquisa:

Tabela 3 - Classificação secundária do solo

D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	CC	CNU
0,024 mm	0,13 mm	0,42 mm	1,65	17,21
Classificação:		Areia não-uniforme, bem graduada.		

De acordo com análise química do solo, apresentada na Tabela 4, pode-se observar a predominância de Óxidos de Silício (SiO₂) e Alumínio (Al₂O₃), nos teores de 62,03% e 19,44%, respectivamente.

Tabela 4 - Composição química do solo

SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	DM
62,03%	19,44%	5,99%	5,66%	2,08%	1,73%	1,48%	0,99%	0,60%

4.2. CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

4.2.1. Análise química

Na Tabela 5 encontram-se os resultados da composição química do resíduo cerâmico. Pode-se constatar a prevalência de Óxido de Silício (SiO₂) e Óxido de Alumínio (Al₂O₃), nos teores de 49,44% e 28,02%, respectivamente. De acordo com Bezerra (2014), o teor de Óxido de Ferro III presente, correspondente a 11,55%, confere a coloração vermelha ao material após a queima, característica do material cerâmico.

Tabela 5 - Composição química do resíduo

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	DM
49,44%	28,02%	11,55%	3,81%	3,25%	1,93%	1,13%	0,87%

A avaliação química individual, do solo e resíduo utilizados, aponta uma significativa semelhança nos teores dos óxidos. Este resultado indica a não-reatividade dos materiais entre si, e configura um aspecto positivo na proposta destas misturas, visto que não haverá alteração dos componentes químicos após a união e umedecimento.

4.2.2. Massa específica real

Segundo Dias (2004), as massas específicas dos materiais agregados de rochas naturais são bem conhecidas. No entanto, agregados reciclados não estão catalogados e, portanto, sua determinação se faz necessária. Particularmente, a massa específica do material residual da cerâmica vermelha, pode variar de acordo com a composição das misturas de argilas e do processo de fabricação do produto.

A Tabela 6 apresenta as massas específicas reais dos resíduos, por granulometria adotada:

Tabela 6 - Massa específica real do resíduo cerâmico

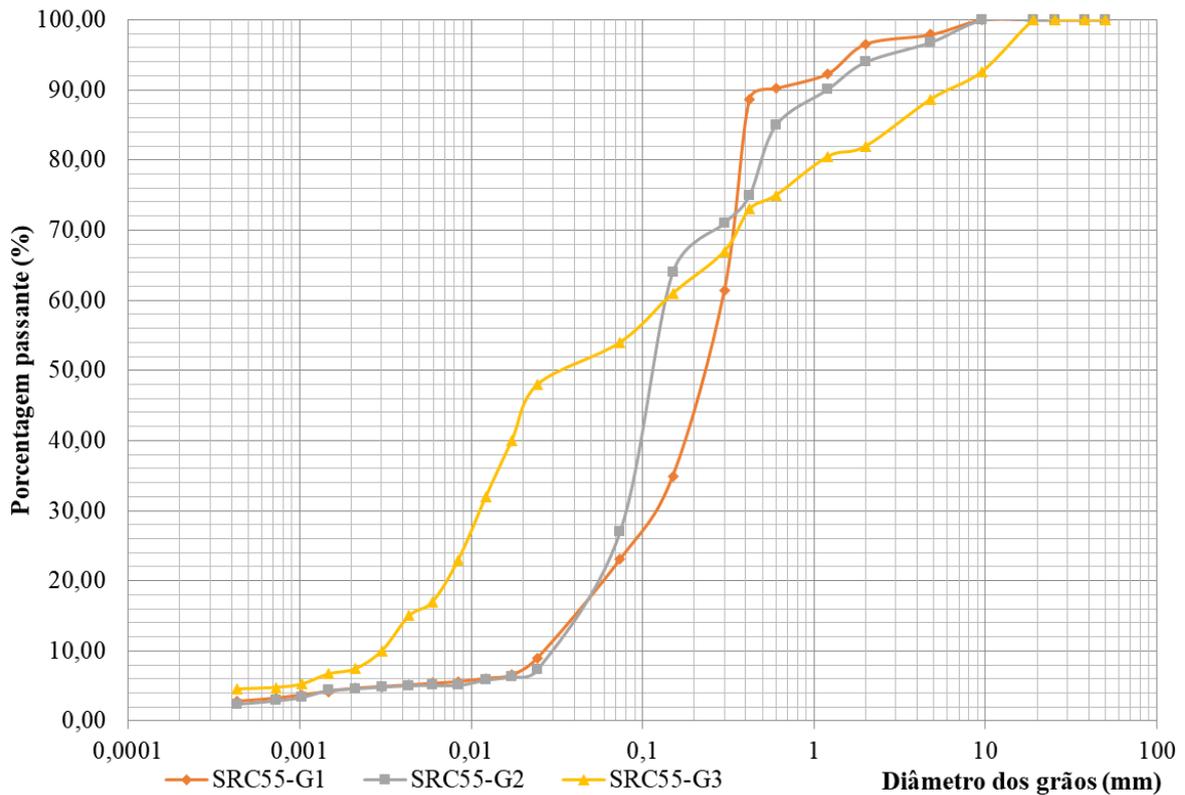
RESÍDUO	MASSA ESPECÍFICA REAL (g/cm ³)
G1	2,75
G2	2,66
G3	2,69

4.3. AVALIAÇÃO DAS MISTURAS

4.3.1. Análise Granulométrica

A distribuição granulométrica das misturas, apresentada na Figura 17, permite a visualização da configuração das dimensões das partículas comparativamente. Observa-se certa semelhança de aspecto das curvas referentes às misturas SRC55-G1 e SRC55-G2, características pela adição de teores de resíduo cerâmico em granulometria mais grossa.

Figura 17 - Análise granulométrica das misturas avaliadas



Embora o compósito não deva ser tratado como solo, propriamente dito, a análise granulométrica requer o complemento da avaliação das características secundárias, assim como realizado no *item 4.1*. A Tabela 7, apresenta, então, os diâmetros correspondentes às frações 60%, 30% e 10% passantes, para cada tipo de mistura, e os respectivos coeficientes de curvatura e não-uniformidade.

Tabela 7 - Classificação secundária das misturas avaliadas

Mistura	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	CC	CNU
SRC55-G1	0,026 mm	0,13 mm	0,30 mm	2,17	11,5
	Classificação:		Bem graduado, não uniforme.		
SRC55-G2	0,03 mm	0,07 mm	0,15 mm	1,09	5
	Classificação:		Bem graduado, não uniforme.		
SRC55-G3	0,003 mm	0,012 mm	0,15 mm	0,32	50
	Classificação:		Mal graduado, não uniforme.		

A boa graduação do material, por si só, não é parâmetro de resistência. No entanto, de acordo com Pinto (2006), a existência de grãos com diversos diâmetros confere ao solo melhor comportamento sob o ponto de vista da engenharia, visto que as partículas de menores dimensões ocupam os vazios entre as partículas maiores, criando um entrosamento tal que resulta em menor compressibilidade e maior resistência.

4.3.2. Limites de Atteberg

Assim como descrito por Dias (2004) para o agregado reciclado de telhas (ART), o resíduo cerâmico não é um solo e, portanto, não há sentido aparente na determinação do índice de plasticidade. No entanto, a aplicação para fins rodoviários contempla a avaliação da qualidade dos finos, passantes na peneira de 0,42 mm, relativa ao comportamento na presença de água.

A análise deste comportamento frente à umidade é feita, indiretamente, pelo emprego dos Limites de Atteberg, que definem o quão líquido e/ou plástico o solo pode ficar na presença de água. A Tabela 8 exibe os limites de liquidez e plasticidade, das misturas solo-resíduo em estudo.

Tabela 8 - Limites de Atteberg das misturas

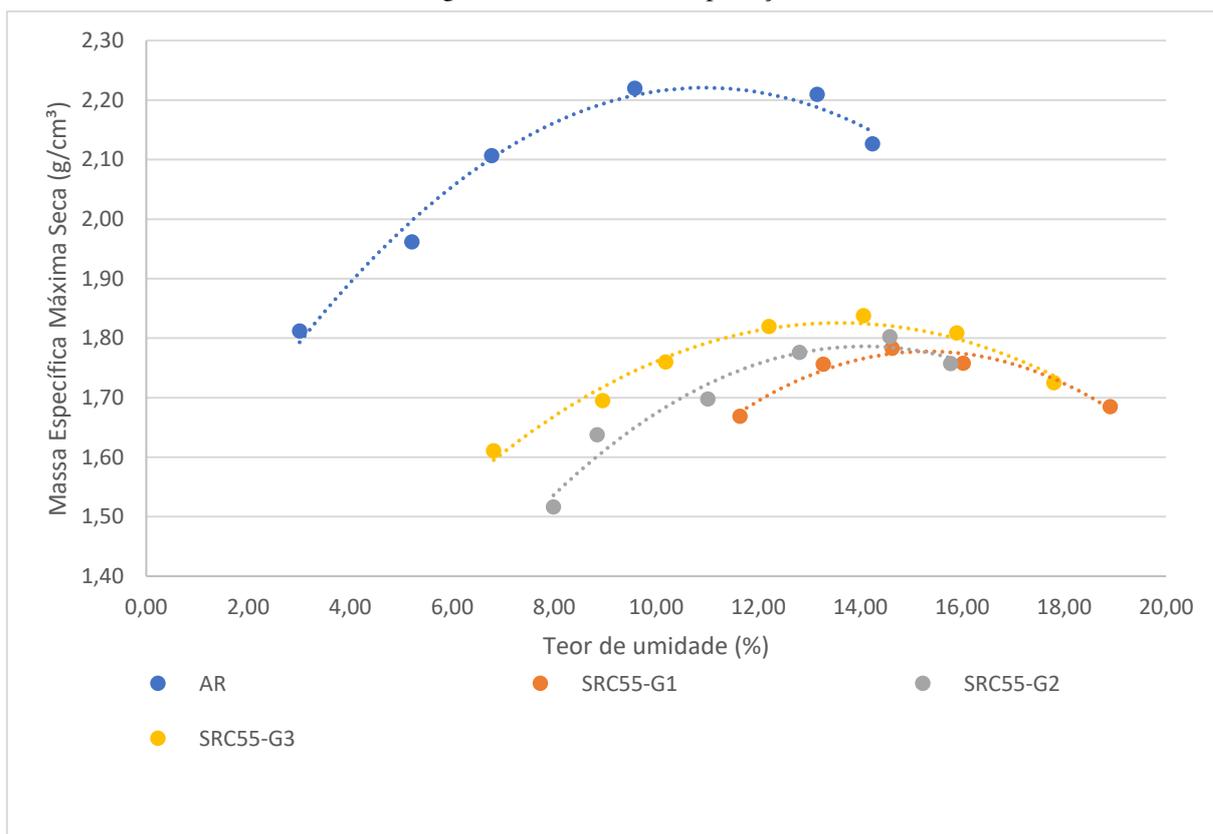
AMOSTRA	LIMITE DE LIQUIDEZ	LIMITE DE PLASTICIDADE
SRC55-G1	28,56%	NP
SRC55-G2	25,98%	NP
SRC55-G3	32,00%	NP

Como esperava-se, o resíduo cerâmico não conferiu plasticidade à mistura, visto ser um material calcinado e quimicamente inerte, em relação ao solo. Porém, devido à natureza argilosa do material cerâmico, não se pode afirmar que toda e qualquer amostra com adição do resíduo cerâmico se comporte da mesma forma, visto que a saída no material no processo produtivo pode acontecer antes da queima da matéria prima.

4.3.3. Compactação

As curvas de compactação da amostra de referência (AR) e das misturas avaliadas encontram-se na Figura 18. A Tabela 9 exibe as massas específicas reais das misturas avaliadas (densidade real), além das umidades ótimas e massas específicas máximas secas, obtidas no ensaio de compactação e plotadas com coeficientes de determinação variantes entre 95,20% e 99,98%.

Figura 18 - Curvas de compactação



Pode-se observar, na Figura 18, que o comportamento do solo sob compactação é veementemente alterado após a adição do resíduo. No entanto, comparando-se as misturas entre si, percebe-se uma semelhança no aspecto das curvas de compactação obtidas.

Tabela 9 – Valores obtidos dos ensaios de compactação e massa específica real

AMOSTRA	MASSA ESPECÍFICA REAL	UMIDADE ÓTIMA	MASSA ESPECÍFICA MÁXIMA SECA APARENTE
---------	-----------------------	---------------	---------------------------------------

AR	2,66 g/cm ³	10,91%	2,21 g/cm ³
SRC55-G1	2,79 g/cm ³	15,39%	1,78 g/cm ³
SRC55-G2	2,72 g/cm ³	14,14%	1,79 g/cm ³
SRC55-G3	2,68 g/cm ³	13,82%	1,86 g/cm ³

Nota-se, a partir da análise dos dados apresentados na Tabela 9, que os teores de umidade ótima das misturas são superiores ao teor da amostra de referência. Ainda, é possível observar que, quanto mais fina a granulometria do resíduo, menor é a umidade ótima e maior é a massa específica máxima seca aparente da mistura.

Este comportamento é antagônico em relação ao esperado, quando da adição de partículas finas na mistura: o caminho óbvio seguiria para um aumento de umidade ótima, quanto mais fino fosse o material adicionado. No entanto, por tratar-se do emprego de um resíduo, proveniente de um processo de transformação de um material natural, não se pode esperar a mesma conduta.

A medida de desvio-padrão dentre os teores de umidade ótima das misturas solo-resíduo é de 0,68. Estatisticamente, este desvio indica a proximidade dos i-ésimos valores em relação ao valor médio e, portanto, quanto menor for, maior é a proximidade. Dessa forma, não há representatividade desta redução de umidade ótima em relação à fração de finos adicionada na mistura. O mesmo se aplica ao desvio-padrão entre os valores de massa específica máxima seca aparente das misturas, 0,03.

4.3.4. Índice de Grupo

Em termos de classificação de materiais para uso em pavimentação, o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006) define a obrigatoriedade, para sub-base, de emprego de solos ou compósitos de solos com Índice de Grupo igual a 0.

Trata-se de um valor numérico que representa a relação entre a plasticidade e a graduação das partículas do solo, e deve ser calculado pela fórmula:

$$IG = 0,2 a + 0,005 ac + 0,01 bd$$

Onde:

a = percentual de material que passa na peneira nº200, menos 35, com $0 \leq a \leq 40$.

b = percentual de material que passa na peneira nº200, menos 15, com $0 \leq b \leq 40$.

c = valor do limite de liquidez, menos 40, com $0 \leq c \leq 20$.

d = valor do índice de plasticidade, menos 10, $0 \leq d \leq 20$.

Na Tabela 10, encontram-se os valores de a , b , c e d , para cada mistura e para a amostra de referência, além dos respectivos índices de grupo.

Tabela 10 - Cálculo do índice de grupo

Mistura	a	b	C	d	IG
AR	0	8,70	0	0	0
SRC55-G1	0	8,07	0	0	0
SRC55-G2	0	12,17	0	0	0
SRC55-G3	14,35	39,35	0	0	2,87

Os resultados demonstram que apenas a mistura SRC55-G3 não se enquadraria na normativa especificada pelo DNIT.

4.3.5. CBR

Foram ensaiados três corpos de prova para cada teor de adição de resíduo cerâmico analisado, e adotados como resultados confiáveis apenas aqueles em que o grau de compactação se manteve entre 95% e 105%. Os valores de CBR médio obtidos, podem ser observados na Tabela 11, que também contempla a taxa de variação dos valores relativos às misturas, em relação ao valor de CBR do solo em seu estado puro.

Tabela 11 - CBR

AMOSTRA	CBR	VARIAÇÃO EM RELAÇÃO À AR
AR	11,30%	-
SRC55-G1	14,60%	+29,20%

SRC55-G2	18,35%	+62,39%
SRC55-G3	17,65%	+56,19%

Os resultados exibidos na Tabela 11 demonstram um crescimento significativo dos valores de CBR, em relação aos da amostra de referência, embora não se tenha chegado no valor mínimo exigido pela norma: Índice de Suporte Califórnia de 20% para camada de sub-base de pavimento.

O desvio-padrão entre os valores de CBR, incluindo a amostra de referência, foi de 2,79%, para um valor médio de 15,47%, enquanto o desvio observado entre os valores de CBR das misturas solo-resíduo avaliadas foi de 1,62%, para um valor médio de 16,87%.

Observa-se que, dentre as misturas, a que apresentou o maior valor de CBR foi a SRC55-G2, com resíduo cerâmico na granulometria passante na peneira ABNT nº80 e retido na peneira ABNT nº200, com 62,39% de acréscimo em relação ao valor da amostra de referência (AR). Este aumento demonstra a qualidade e aplicabilidade do resíduo cerâmico e, juntamente ao valor de CBR obtido na amostra SRC55-G3, com o resíduo na granulometria passante na peneira ABNT nº200, infere-se que quanto mais fino o resíduo adicionado, melhores as condições de suporte da mistura.

O estudo de Cabalar et al. (2016) demonstrou que o uso de resíduo cerâmico, retido entre as peneiras 3/4" (19mm) e nº200 (0,074mm) como material de substituição em camada de sub-base de pavimento de argila de baixa expansividade, em teores de 5%, 10%, 15%, 20% e 30%, possibilitou um aumento do valor de CBR de 8% (da amostra de referência) para 14% (amostra com 30% de resíduo).

Dias (2004), na aplicação de resíduo cerâmico em camadas de pavimentos, concluiu que existe uma boa correlação entre o percentual de finos na mistura e a sua resistência, e que compactação obtida através da introdução da fração fina no solo pode garantir uma maior resistência mecânica, embora este estudo ainda seja extenso, complexo e ainda necessite maior aprofundamento.

Ainda de acordo com Cabalar et al. (2016), o atrito e o intertravamento entre grãos de solo e cerâmica, a rigidez dos grãos cerâmicos, a condição de redução da plasticidade (neste

caso, a manutenção da não-plasticidade) e a graduação de grãos de resíduo cerâmico, são fatores importantes no aumento da resistência mecânica das misturas solo-resíduo cerâmico.

As interações entre grãos, no caso da aplicação destas misturas em camadas de suporte de pavimentos, dependem ainda do percentual de quebra após a compactação. Por ser um material frágil, estima-se que quanto maior seja a granulometria do resíduo aplicado, maior o teor de quebra deste grão. Assim, a resistência do compósito não apresentaria um comportamento linear durante a vida útil do pavimento.

Espera-se que, à medida em que o tráfego aconteça, os grãos de resíduo se fragmentem, até um diâmetro final teoricamente indestrutível por compressão. Neste ponto haveria então, o maior valor de resistência real da mistura.

5. CONCLUSÃO

O processo de beneficiamento do resíduo cerâmico enfrenta certas particularidades passíveis de pontuação. No tocante à britagem, o material apresentou uma quebra facilitada, o que representa uma reduzida dificuldade de adaptação para aplicação em campo. A separação granulométrica, no entanto, tornou-se um processo lento e minucioso, que requer maior controle de execução e ainda, não se pode garantir que tenha ocorrido total dissociação entre as frações avaliadas.

As frações G1 e G2, com material compreendido entre as malhas das peneiras nº40 e nº 80, e nº80 e nº200, respectivamente, apresentaram grãos bem definidos. O resíduo G3, passante na peneira nº200, contudo, adquiriu textura semelhante ao mineral-minério talco.

Esta textura pulverulenta do resíduo G3 conferiu uma grande dificuldade na harmonização da mistura com o solo, tanto nos ensaios de caracterização física quanto nos ensaios mecânicos. Na compactação, por exemplo, o ato de homogeneizar a mistura para distribuir o teor de umidade era depreciado pela tendência de aglomeração do material quando úmido.

Os teores de umidade ótima variaram significativamente em relação à amostra de referência. No entanto, a variação entre os teores relativos às misturas é estatisticamente insignificante, vide o desvio padrão menor que 1.

Dentre as misturas avaliadas, a que apresentou o melhor desempenho mecânico foi a SRC55-G2, com adição num teor de 50% de resíduo cerâmico na faixa granulométrica compreendida entre a malha das peneiras nº80 e nº200.

Pontua-se, ainda, que o resultado de CBR obtido com a adição do resíduo na granulometria passante na peneira nº200 não se distanciou do melhor resultado. Sendo assim, infere-se que a separação granulométrica, para obtenção das frações mais finas, encareceria o processo e não o tornaria mais eficiente.

6. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Sugere-se:

- Utilizar solos de origens distintas, para avaliar as diversas possibilidades de interação solo-resíduo;
- Avaliar o percentual de quebra dos grãos de resíduo durante a vida útil do pavimento.

7. REFERÊNCIAS

ABCERAM – Associação Brasileira de Cerâmica. Cerâmica no Brasil. Considerações Gerais. Disponível em: <<https://abceram.org.br/consideracoes-gerais/>>. Acesso em 05/06/2018.

ABNT - Associação Brasileira de Normas técnica — NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016;

ABNT - Associação Brasileira de Normas técnica — 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.

ABNT - Associação Brasileira de Normas técnica — NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016;

ABNT - Associação Brasileira de Normas técnica — NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - Associação Brasileira de Normas técnica — NBR 7181 – Solo: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - Associação Brasileira de Normas técnica — NBR 1004: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro. 2004.

Associação Brasileira de Normas técnica — NBR 15270-1: Componentes cerâmicos – Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

Associação Brasileira de Normas técnica — NBR 15270-2: Componentes cerâmicos – Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT - Associação Brasileira de Normas técnica — NBR 15310: Componentes cerâmicos – Telhas – Terminologia, requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2009.

ANICER - Associação Nacional da Indústria de Cerâmica. Relatório Anual, 2015. Disponível em: <http://anicer.com.br/wp-content/uploads/2016/11/relatorio_2015.pdf>. Acesso em 05/06/2018.

BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. Oficina de Textos. São Paulo, 2007.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.. "Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros." 1ª Ed. Vol1. Rio de Janeiro, 2008.

BEZERRA, I. M. T. Desenvolvimento de corpos cerâmicos utilizando ativação alcalina no resíduo da cerâmica vermelha. Tese para obtenção do título de doutorado pela Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2014.

BUSTAMANTE, G. M.; BRESSIANI, J. C.. A indústria cerâmica brasileira. São Paulo: [s.n.], 2000. Disponível em: <http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v05n03/v5n3_5.pdf>. Acesso em: 16 maio 2018.

CAPUTO, H. P.. Mecânica dos Solos e suas Aplicações. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. v. 1, 1988.

CARVALHO, J. B. Q. de.. Fundamentos da Mecânica dos Solos. Campina Grande: Gráfica Marcone, 1997.

CASTRO, A. L.; SANTOS, R. F. C.; GONÇALVES, K. M.; QUARCIONI V. A. Caracterização de cimentos misturados com resíduos da indústria de argila vermelha. Cerâmica, São Paulo, v. 63, n. 365, p. 65-76, março de 2017.

CONAMA- Conselho Nacional do Meio Ambiente - Resolução nº307. Ministério do Meio Ambiente, 2002.

DIAS, João Fernando. Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

DNIT, Manual de Pavimentação. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 3ª Edição. Editado pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). Ministério dos Transportes, Brasil, 2006.

_____. DNER 093/1994 – ME: Solos – Determinação da densidade real. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Rio de Janeiro, 1994.

_____. DNIT 141/2010 – ES: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro. 2010.

_____. DNIT 172/2016 – ME: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro. 2016.

_____. DNIT 164/2013 – ME: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro. 2013.

FIEMG – Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais. FEAM – Fundação Estadual de Meio Ambiente. Guia Técnico Ambiental da Indústria da Cerâmica Vermelha. Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/producao_sustentavel/GUIAS_TECNICOS_AMBIENT AIS/guia_ceramica.pdf>. Acesso em: 18/05/2018.

GUERRA, T. D. Avaliação da viabilidade técnica do uso de resíduos na camada de sub-base de uma rodovia. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB, 2017.

NETO, M. L. Q., MEDEIROS, M. K. S., FLORÊNCIO, F. D. C., JÚNIOR, P. L. S.. Geração de resíduo sólido proveniente da fabricação de cerâmica vermelha: caso de indústria cerâmica na região de Assú/RN. VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Campina Grande-PB, 2016.

da SILVA, R. C.. Estudo de viabilidade econômica para o uso de resíduos de construção e demolição em camadas de base e sub-base de pavimentos. Dissertação de Mestrado. Universidade federal do Rio de Janeiro, 2014.

KLINSKY, L. M. G., Fabbri, G. T. P.. Reaproveitamento da areia de fundição como material de base e sub-base de pavimentos flexíveis. Revista de Transportes, vol. 17, n. 2, 2009.

REDIVO, I. M. Utilização de resíduo de cerâmica vermelha em misturas com solo para construção de camadas de pavimentos com baixo volume de tráfego. 2011. 160f. 2011. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ROHDE, Luciana. "Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos: estudo laboratorial. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas – Cerâmica Vermelha – Estudos de Mercado SEBRAE/ESPM, 2008. Disponível em: <<http://www.sebraemercados.com.br/wp-content/uploads/2015/09/ESTUDO-CERAMICA-VERMELHA.pdf>>. Acesso em 18/05/2018.

PINTO, J. I. B. R.. Caracterização superficial de pavimentos rodoviários. 2003. Universidade do Porto, Porto, 2006.

SOUZA, Murillo Lopes de. Método de projeto de pavimentos flexíveis. Publicado pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), v. 667, n. 3, 1981.

VIEIRA, A. de A. P.. Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos.