INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANÁLISE DA MISTURA DE CHAMOTE CERÂMICO COM SOLO LATERÍTICO PARA A UTILIZAÇÃO NAS CAMADAS DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

NATÁSSIA DA SILVA SALES

Orientador: Prof. Dr. Ayrton de Sá Brandim

TERESINA

2018

NATÁSSIA DA SILVA SALES

ANÁLISE DA MISTURA DE CHAMOTE CERÂMICO COM SOLO LATERÍTICO PARA A UTILIZAÇÃO NAS CAMADAS DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processamento e Caracterização de Materiais.
Especialidade: Materiais Cerâmicos.

Orientador: Prof. Dr. Ayrton de Sá Brandim

TERESINA

2018

Sales, Natássia da Silva
S163a ANÁLISE DA MISTURA DE CHAMOTE CERÂMICO COM SOLO LATERÍTICO PARA A UTILIZAÇÃO NAS CAMADAS DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS / Natássia da Silva Sales - 2018.
75 p. : il. color.

Trabalho de conclusão de curso (Mestrado) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, Mestrado em Engenharia de Materiais, 2018.

Orientador : Prof Dr. Ayrton de Sá Brandim.

1. Resíduos Cerâmicos. 2. Solo Laterítico. 3. Pavimento Rodoviário. I.Título.

CDD 620.1

NATÁSSIA DA SILVA SALES

ANÁLISE DA MISTURA DE CHAMOTE CERÂMICO COM SOLO LATERÍTICO PARA A UTILIZAÇÃO NAS CAMADAS DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Aprovada em: 03/12/2018.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Ayrton de Sá Brandim (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

_____

Prof. Dr. Érico Rodrigues Gomes
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

_____

Prof.ª Dra. Artemária Coelho de Andrade
Universidade Estadual do Piauí (UESPI)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais
Matias e Isabel, eternos incentivadores do
meu crescimento profissional.
Ao meu esposo Felipe, pelo amor,
paciência e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para a concretização deste trabalho, em especial ao Prof. Dr. Ayrton de Sá Brandim, por me orientar com tanta presteza, generosidade e paciência, exemplo de grande educador.

A todos os professores que fizeram parte da minha vida acadêmica, em especial a Prof.ª Dra. Artemária Coelho de Andrade, pelo encorajamento em muitos momentos da minha vida e ao Prof. Dr. Érico Rodrigues Gomes pelos conhecimentos compartilhados.

Ao Instituto Federal do Piauí, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e a todos que fazem parte dessa equipe que tanto engrandecem meu Piauí com pesquisas de enorme relevância.

À Cerâmica Santa Vitória, por ter aberto suas portas e fornecido os materiais para o estudo, especialmente ao Dr. Edgar Carneiro, grande incentivador desta pesquisa. Agradeço também a Mineradora Alvorada e ao Sr. Fernando por gentilmente terem cedido o britador para adequação do resíduo cerâmico. A empresa Copa Engenharia pela disponibilização do seu laboratório de pavimentação, no qual foram realizados todos os ensaios necessários para a pesquisa.

Aos meus irmãos Alexandre e Rafael, pelo apoio e carinho. Aos meus sobrinhos Gabriel, Matias Neto, Augusto e Catarina que a cada dia me enriquecem de alegria e motivação para buscar ser sempre uma vencedora.

Agradeço a Deus por ter me dado à oportunidade de estar no mundo, por sempre iluminar meus passos e me cercar de pessoas especiais.

“Fazer, todos os dias, as mesmas coisas e esperar resultados diferentes é a maior prova de insanidade”.

Albert Einstein

RESUMO

No Brasil são produzidos por mês cerca de 5,3 bilhões de peças cerâmicas principalmente para a construção civil, dos quais destacam-se as produções de telhas, blocos de vedação e blocos estruturais, contudo, na faixa, de 159 milhões a 265 milhões de peças são descartadas mensalmente pelas indústrias cerâmicas por serem defeituosas. Esses resíduos são chamados de chamotes que são, um subproduto proveniente de rejeitos de material cerâmico após a queima. Buscando uma destinação correta para esses resíduos, foram realizados ensaios em laboratório, submetendo os materiais primeiramente a um processo de britagem, para posterior caracterização física e determinação das propriedades, visando a utilização em camadas de pavimento rodoviário, segundo os critérios mínimos exigidos pelo Manual de Pavimentação do DNIT (2006) para aplicação em camadas de base e sub-base. Para realização do estudo foi coletado solo laterítico na zona rural da cidade de Teresina, resíduos cerâmicos em indústria cerâmica localizada na cidade de União – PI e transportados até uma mineradora localizada também em Teresina – PI, onde foram triturados e encaminhados ao laboratório para serem misturados ao solo manualmente e realizados os ensaios de Granulometria, Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade, Equivalente de Areia, Compactação e Índice de Suporte Califórnia. Os resultados mostraram que as misturas que receberam 20% e 30% de chamote cerâmico se mostraram potencialmente adequadas para o uso em camadas de base, enquanto que para as camadas de sub-base os teores de 20%, 30% e 40% estão aptos a serem utilizados, mostrando-se uma alternativa totalmente viável. Sendo assim, é possível proporcionar uma destinação para os resíduos que se acumulam nos pátios das indústrias cerâmicas e reduzir a exploração de jazidas utilizadas para execução dessas camadas do pavimento rodoviário.

Palavras-chave: Resíduos Cerâmicos. Solo Laterítico. Pavimento Rodoviário.

ABSTRACT

In Brazil, about 5.3 billion ceramic pieces are produced per month, mainly for the construction industry, of which the production of tiles, blocks and structural blocks stands out, however, in the range of 159 million to 265 million parts are discarded monthly by the ceramic industries because they are defective. These residues are called shingles, which are a byproduct of waste from ceramic material after burning. In the search for a correct destination for these residues, laboratory tests were performed, subjecting the materials first to a crushing process, for later physical characterization and determination of the properties, for the use in layers of road pavement, according to the minimum criteria required by the Manual of Paving of DNIT (2006) for application in base and sub-base layers. In order to carry out the study, the ceramic residues in the city of. Were collected lateritic soil in the rural area of the city of Teresina, and were transported to a mining company located in Teresina - PI, where they were ground and sent to the laboratory to be mixed to the soil manually and performed the Granulometry, Liquidity Limit, Plasticity Limit, Sand Equivalent, Compression and California Support Index tests. The results showed that mixtures that received 20% and 30% of ceramic tiles were potentially suitable for use in base layers, whereas for sub-base layers the contents of 20%, 30% and 40% are suitable to be used, proving to be a totally viable alternative. Thus, it is possible to provide a destination for the residues that accumulate in the courtyards of the ceramic industries and to reduce the exploitation of deposits used for the execution of these layers of the road pavement.

Keywords: Ceramic Residues. Lateritic Soil. Road Pavement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Via revestida com pedras ligando Óstia a Roma..... 17
Figura 2 - Estrutura do pavimento rígido..... 20
Figura 3 - Estrutura do pavimento flexível..... 21
Figura 4 - Camadas que compõem o pavimento..... 22
Figura 5 - Classificação das bases e sub-bases..... 24
Figura 6 - Resíduos depositados em pátio de indústria cerâmica..... 26
Figura 7 - Resíduos depositados no pátio de indústria cerâmica..... 32
Figura 8 - Britagem do chamote cerâmico..... 33
Figura 9 - Chamote cerâmico britado..... 33
Figura 10 - Fluxograma do trabalho..... 42
Figura 11 - Jazida do solo laterítico..... 43
Figura 12 - Solo laterítico..... 44
Figura 13 - Resíduos cerâmico entre duas amostras do solo laterítico..... 44
Figura 14 - Britador Faço 40x60 utilizado no processo..... 45
Figura 15 - Peneiramento do solo laterítico..... 48
Figura 16 - Ensaio do Limite de Liquidez..... 50
Figura 17 - Ensaio do Limite de Plasticidade..... 50
Figura 18 - Ensaio do Equivalente de Areia..... 51
Figura 19 - Ensaio de Compactação..... 54
Figura 20 - Ensaio do Índice de Suporte Califórnia..... 56
Figura 21 - Trecho das obras de duplicação da BR-343..... 69
Figura 22 - Seção transversal da pista direita..... 69
Figura 23 - Croqui da localização de jazida..... 70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estado geral das rodovias..... 19
Quadro 2 - Classificação dos revestimento..... 25
Quadro 3 - Classificação dos solos TRB..... 30
Quadro 4 - Materiais analisados no estudo..... 45
Quadro 5 - Normas utilizadas para a realização dos ensaios..... 46
Quadro 6 - Faixas granulométricas do DNIT..... 58
Quadro 7 - Resultados do ensaio do Equivalente de Areia..... 62
Quadro 8 - Resultados do ensaio de Compactação..... 64
Quadro 9 - Resultados do ISC e da Expansão..... 66
Quadro 10 - Resumo da análise de aceitabilidade dos materiais..... 68

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Representação convencional das curvas granulométricas..... 29
Gráfico 2 - Granulometria dos materiais ensaiados para a camada de base..... 59
Gráfico 3 - Granulometria dos materiais ensaiados para a camada de sub-base 60
Gráfico 4 - Solo laterítico puro..... 63

LISTA DE ABREVIATURAS

ANICER	Associação Nacional da Indústria de Cerâmica
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
HRB	Highway Research Board
USACE	United States Army Corps of Engineers
PCA	California Division of Highways e Portland Cement Association
FRN	Fundo Rodoviário Nacional
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
TRB	Transportation Research Board
NBR	Norma Brasileira
ISC	Índice de Suporte Califórnia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO..... 14
1.1 OBJETIVOS..... 16
1.1.1 Geral..... 16
1.1.2 Específicos..... 16
2 REFERENCIAL TEÓRICO..... 17
2.1 HISTÓRICO DA PAVIMENTAÇÃO..... 17
2.2 PAVIMENTO..... 19
2.2.1 Classificação..... 20
2.2.1.1 Rígido..... 20
2.2.1.2 Flexível..... 21
2.2.2 Estrutura do pavimento flexível..... 21
2.2.2.1 Subleito..... 22
2.2.2.2 Regularização..... 22
2.2.2.3 Reforço do subleito..... 23
2.2.2.4 Sub-base..... 23
2.2.2.5 Base..... 23
2.2.2.6 Revestimento..... 24
2.3 CHAMOTES CERÂMICOS..... 25
2.4 AGREGADOS..... 26
2.4.1 Classificação..... 27
2.4.1.1 Quando a natureza..... 27
2.4.1.2 Quando ao tamanho..... 28
2.4.1.3 Quanto a distribuição dos grãos..... 28
2.4.1.4 Classificação dos solos para fins rodoviários..... 29
2.5 URBANIZAÇÃO X IMPACTO AMBIENTAL..... 30
2.6 RECICLAGEM DO CHAMOTE..... 32
2.7 UTILIZAÇÃO DO CHAMOTE CERÂMICO NA PAVIMENTAÇÃO..... 34
2.8 VIABILIDADE DO USO DO CHAMOTE CERÂMICO NA PAVIMENTAÇÃO 37
2.8.1 Granulometria por peneiramento..... 38
2.8.2 Limite de Liquidez..... 38
2.8.3 Limite de Plasticidade..... 38

2.8.4 Equivalente de Areia 39
2.8.5 Compactação 39
2.8.6 Índice de Suporte Califórnia 40
2.8.7 Distância Média de Transporte 40
3 METODOLOGIA 42
3.1 TIPO DE ESTUDO 42
3.2 AMOSTRA 43
3.3 COLETA DE DADOS 46
3.3.1 Análise granulométrica 46
3.3.2 Limite de Liquidez 48
3.3.3 Limite de Plasticidade 49
3.3.4 Equivalente de Areia 50
3.3.5 Ensaio de Compactação 52
3.3.6 Ensaio do Índice de Suporte Califórnia 54
3.3.7 Cálculo do Índice de Plasticidade e Índice de Grupo 56
3.4 ANÁLISE DE DADOS 57
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 59
4.1 GRANULOMETRIA, LIMITE DE LIQUIDEZ E DE PLASTICIDADE 59
4.2 ENSAIO DO EQUIVALENTE DE AREIA 61
4.3 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO 63
4.4 ENSAIO DO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA 65
4.5 ÍNDICE DE PLASTICIDADE E ÍNDICE DE GRUPO 67
4.6 DISCUSSÃO DA ANÁLISE DOS DADOS 67
5 CONCLUSÃO 71
REFERÊNCIAS 73

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da construção civil nos últimos anos elevou a demanda por materiais cerâmicos incrementando a indústria do setor. No Brasil são produzidos por mês cerca de 5,3 bilhões de peças entre telhas, blocos de vedação e estruturais oriundas de 9071 empresas ceramistas. Estima-se que as perdas em produtos acabados se situam na faixa de 3% a 5%, o que representa de 159 milhões a 265 milhões de peças descartadas mensalmente (GARCIA et. al., 2015).

As indústrias cerâmicas geram resíduos oriundos de sua atividade, principalmente chamotes - resíduos queimados oriundos do próprio processo de fabricação, um subproduto proveniente de rejeitos de material cerâmico após a queima (DIAS et. al., 2016).

A destinação desses resíduos vem se mostrando um problema para as indústrias cerâmicas visto que a lei nº 12.305/2010, que regulamenta o assunto, não permite o descarte inadequado dos resíduos cerâmicos e os impactos negativos causados pelos rejeitos desses materiais são devastadores, causando prejuízos enormes para cidades, pois a deposição irregular poderá obstruir os seus sistemas de drenagem, impedindo a percolação da água, causando enchentes e oferecendo condições favoráveis a proliferação de transmissores de doenças, levando riscos à saúde da população e gastos desnecessários ao poder público (CARDOSO; GALATTO; GUADAGNIN, 2014).

Diante desse cenário, pode-se atuar agregando duas necessidades: a destinação dos resíduos cerâmicos queimados e uma menor exploração de jazidas para destinação rodoviária, pois os resíduos oriundos das indústrias cerâmicas, após processo de britagem, poderiam substituir parte dos agregados retirados das jazidas.

Visto que em um cenário de desenvolvimento econômico a construção de rodovias torna-se essencial para, entre outros motivos, o escoamento da produção das indústrias e também de pessoas, contudo, para a pavimentação de rodovias é necessária a construção de diversas camadas, as quais, por sua vez, necessitam de agregados para sua execução. Os agregados são oriundos de jazidas que devem ser exploradas para fornecer material suficiente para toda a extensão das vias o que está na contramão do apelo ambiental atual de exploração mínima do meio ambiente.

Buscando contribuir para a redução dos custos e a diminuição dos problemas com resíduos, foi instituída a Resolução n.º 313, de 29 de outubro 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que estabelece as diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos sólidos das indústrias, proibindo a deposição em local inadequado de resíduos de refratários e materiais cerâmicos, obrigando as grandes empresas a reutilizar, reciclar ou dar uma destinação correta aos seus resíduos (MIRANDA, 2009).

Visando unir forças a essa resolução, através da Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010, foi aprovada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a qual define a forma como o país deve dispor os seus resíduos, incentivando a reciclagem e a sustentabilidade, baseando-se no princípio de que a responsabilidade não é apenas da empresa geradora do entulho, mas sim de toda a nação, pois os impactos gerados por esses resíduos afetam as questões físicas e econômicas das cidades, gerando prejuízos não só para a empresa, mas para uma grande parte da sociedade, ou seja, o problema ambiental é compartilhado para todos (BRASILEIRO, 2013).

Com isso, a problematização dessa pesquisa é verificar corpos de prova utilizando diferentes proporções da mistura solo-chamote, a fim de se obter o seu desempenho e suas propriedades físicas e mecânicas, e, após analisar os resultados, verificar qual a proporção mais adequada para ser utilizada, dentre as porcentagens estudadas.

Tendo em vista que o chamote cerâmico é um material com valor inferior aos agregados convencionais, que através da utilização desse resíduo, estaríamos prolongando a vida desses materiais, evitando o desperdício e contribuindo para a diminuição da escassez dos recursos naturais, já que precisaríamos de um volume menor de solo laterítico, e levando em conta que o comportamento e as características dos resíduos cerâmicos, possivelmente, são tão boas quanto as dos agregados convencionais, é possível estudar a aplicação de chamote em camadas do pavimento, sem comprometer a estrutura.

A partir desse cenário, esta pesquisa visa obter resultados sobre o desempenho e as principais características estruturais de corpos de prova contendo a mistura de solo laterítico e chamote cerâmico, oferecendo uma alternativa para que as grandes empresas cerâmicas possam dar um destino final aos seus resíduos, diminuindo o desperdício de materiais e contribuindo para o melhoramento

da economia da empresa que irá aderir a esse programa, além de minimizar os impactos que esses resíduos iriam causar ao meio ambiente.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Verificar a viabilidade técnica da utilização de chamote britado como agregado para base e sub-base de pavimentos asfálticos conforme as normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

1.1.2 Específicos

- Gerar um material que atenda as normas do DNIT para que possa ser utilizado na pavimentação rodoviária.
- Estudar a possibilidade de melhoramento das características das camadas de base e sub-base com a adição dos resíduos cerâmicos queimados.
- Avaliar a proporção mais adequada de chamote britado a ser adicionado ao solo para sua utilização com segurança na pavimentação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 HISTÓRICO DA PAVIMENTAÇÃO

A história da pavimentação nos remete à própria história da humanidade, percorrendo o povoamento dos continentes, conquistas territoriais, intercâmbio comercial, cultural e religioso, urbanização e desenvolvimento. Como os pavimentos, a história também é construída em camadas e, freqüentemente, as estradas formam um caminho para examinar o passado, daí serem uma das primeiras buscas dos arqueólogos nas explorações de civilizações antigas (BERNUCCI et. al., 2008).

A necessidade de pavimentar as vias surgiu com as trilhas de terra formadas pelo transporte de cargas e pessoas no meio das vegetações. A primeira evolução ocorreu com a colocação de pedras afeiçoadas sobre o leito natural, e posteriormente passou-se a regularizar a superfície das pedras para alcançar um melhor entrosamento entre as peças e permitir a passagem dos veículos, que exigiam um maior conforto de rolamento e revestimentos resistentes, algumas dessas primeiras pavimentações ainda resistem até os dias atuais como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Via revestida com pedras ligando Óstia a Roma.

Fonte: Bernucci et. al., 2008.

De acordo com Balbo (2007) o homem visando obter melhor acesso às áreas cultiváveis e às fontes de matéria prima, além do desejo de expandir sua área, território de influência e comércio, criou o que chamamos de estradas, cuja lembrança mais remota provém da China.

Com o surgimento dos automóveis, em meados de 1880, tornou-se ainda mais urgente a aplicação de métodos de pavimentação com materiais mais apropriados para o ritmo de desenvolvimento propiciado pela revolução industrial e a pavimentação passou a ser mais exigida, pois tinha-se tornado antieconômico e nada prático adequar grandes quantidades de pedra.

Ainda segundo Balbo (2007) as primeiras normas para a execução de estradas surgiram, entre 1825 e 1895 com a consolidação de diferentes teorias, como a geodésica e geometria prática, elasticidade, resistência dos materiais. Houve também o surgimento dos principais órgãos na área da pavimentação mundial, sediados nos Estados Unidos: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Highway Research Board (HRB), United States Army Corps of Engineers (USACE), California Division of Highways e Portland Cement Association (PCA). Com a estruturação desses órgãos se desenvolveram pesquisas com a construção de pistas experimentais, ensaios e classificações ligadas aos materiais utilizados nos pavimentos.

No Brasil a construção rodoviária sofreu um grande incremento nas décadas de 1940 e 1950, como relata Bernucci et. al. (2008) devido à concepção do Fundo Rodoviário Nacional (FRN) em 1946, graças ao imposto sobre combustíveis líquidos. Importante também o início das operações da Petrobras em 1953. Segundo o citado autor, o ano de 1950 foi destaque como o ponto inicial da construção de pavimentos em escala industrial e da organização de grandes construtoras na área de pavimentação.

De acordo com o anuário estatístico de transportes do Ministério dos Transportes (2016), aproximadamente 60% do transporte de cargas realizado no Brasil é por meio rodoviário. As ferrovias respondem por 21%, o modal aquaviário por 14%, o transporte por dutos por 5% e o modal aéreo por menos de 1%. O transporte rodoviário encontra-se deficiente, mostrando que os investimentos nas rodovias deveriam ser prioritários, não apenas por ser o modal mais utilizado, mas por exigir menor investimento quando comparado aos demais modais. Destaque-se ainda que pelas rodovias circulam 96% de todos os passageiros.

De acordo com a pesquisa da Confederação Nacional dos Transportes (CNT) publicada em 2018, a malha rodoviária federal já pavimentada no ano de 2017, conforme o Quadro 1, encontra-se em condições insatisfatórias aos usuários tanto quanto ao desempenho, quanto à segurança e à economia, onde 62% das estradas estão regulares, ruins ou péssimas, totalizando uma extensão de 65.332,00 km. Ainda segundo a CNT (2018) 77,7% das rodovias federais ainda não receberam pavimentação, o que corresponde a 860.276,42 km.

Quadro 1 - Estado geral das rodovias no Brasil.

Extensão Total (km)					
Ótimo	Bom	Regular	Ruim	Péssimo	TOTAL
9.442	31.040	35.590	21.217	8.525	105.814
9%	29%	34%	20%	8%	100%

Fonte: CNT, 2018.

Fazendo um cálculo considerando uma rodovia federal, com suas características mais simples de acordo com o DNIT (2006), a largura da plataforma de pavimentação de 7.90 m e espessura mínima de base e sub-base, isoladamente de 0.15 m, seriam necessários para essas camadas, no caso da execução de vias não pavimentadas no mínimo 2.038.855,12 m³ de material oriundo de jazida.

No caso da aplicação da mistura descrita neste estudo na sua proporção mínima que substituiria 20% do solo, seriam poupados de exploração cerca de 407.771,023 m³ de material de jazida, representando uma mitigação considerável dos impactos ambientais causados pelas obras rodoviárias.

2.2 PAVIMENTO

O pavimento é a estrutura constituída sobre a terraplanagem e destinada a resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los nas camadas inferiores, tornando mais durável a superfície de rolamento e oferecendo melhores condições de conforto e segurança para os usuários da via. Também tem a função de proteger o solo de fundação do pavimento da água da chuva, permitindo a manutenção das suas características ao longo do tempo (SENÇO, 2011).

Por injunções de ordem técnico-econômicas o pavimento é uma estrutura de camadas de materiais de diferentes resistências e deformabilidades que são

colocadas em contato, resultando num conjunto de elevado grau de complexidade, e a camadas dimensionados a partir do cálculo de tensões e deformações atuantes na superfície resultantes das cargas impostas pelo tráfego (DNIT, 2006).

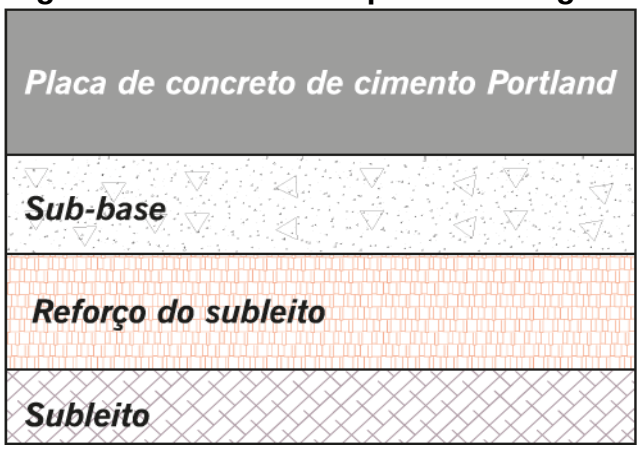
As estruturas de pavimentação são classificadas em dois grupos, os rígidos que são os pavimentos cujo os revestimentos são placas de concreto de cimento, os flexíveis cujo revestimento é constituído de asfalto betuminoso, e os articulados que são os pavimentos de blocos de concreto pré-fabricados (SENÇO, 2011).

2.2.1 Classificação

2.2.1.1 Rígido

Normalmente o pavimento rígido é correlacionado ao concreto de cimento Portland, formada por uma camada de material granular ou de material consolidado com cimento que serve de apoio para a camada de concreto, que pode ou não ser armada. Estas camadas serão postas em cima do subleito ou se preciso sobre o reforço do subleito (BERNUCCI et al., 2010). A estrutura tradicionalmente utilizada é detalhada pela Figura 2.

Figura 2 – Estrutura do pavimento rígido.



Fonte: Bernucci et al. (2010).

Este tipo de pavimento possui pouca deformação, quando são expostos a essas forças acaba rompendo pela tração na flexão. Podendo ser subdividido em concreto de cimento, macadame de cimento e paralelepípedos rejuntados com cimento (SENÇO, 2007).

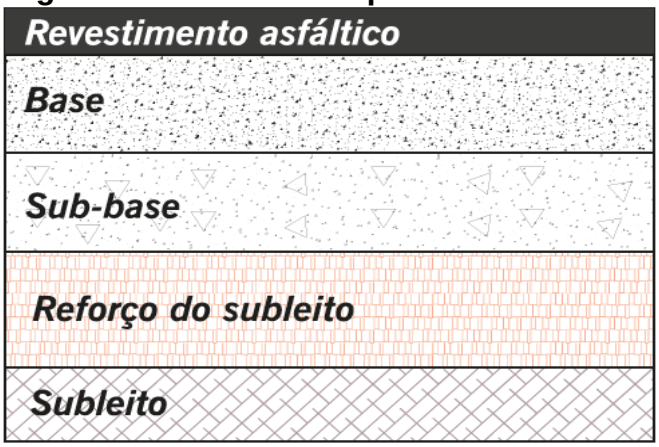
2.2.1.2 Flexível

Esta pavimentação possui duas divisões: betuminosos e calçamentos. Eles suportam deformações até um determinado ponto, após isso virá a ruptura. São calculados para resistir a esforços de compressão e tração na flexão (SENÇO,2007).

Por sua vez, o pavimento flexível é relacionado aos pavimentos asfálticos, sendo composto pelas camadas de subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento asfáltico, sem possuir agentes cimentantes. Conforme a característica do subleito, da altura das camadas e da sua resistência a esforços, algumas camadas podem ser descartadas do projeto (BERNUCCI et al., 2010).

A Figura 3 detalha a estrutura tradicionalmente utilizada na pavimentação flexível, sendo a mais adotada no Brasil.

Figura 3 – Estrutura do pavimento flexível.



Fonte: Bernuccl et al. (2010).

2.2.2 Estrutura do pavimento flexível

As estruturas dos pavimentos são projetadas para suportar as inúmeras demandas de cargas, no tempo de vida útil do projeto, sem que haja estragos estruturais fora do admissível e do esperado (BERNUCCI et al., 2010). A Figura 4 ilustra a composição tradicionalmente utilizada nos pavimentos brasileiros.

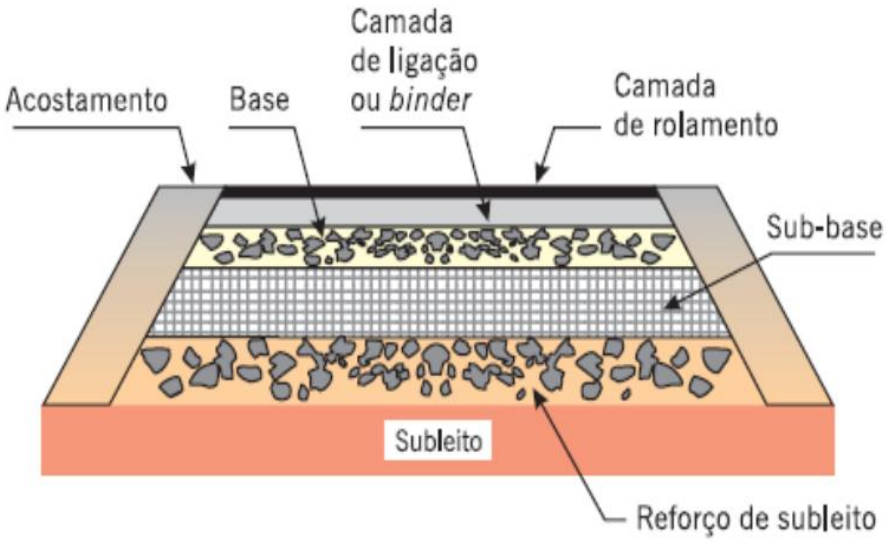
Uma das maneiras mais completas que o pavimento dispõe é formada pelas camadas de revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito. Para considerar um pavimento é indispensável à execução de duas camadas: a camada de subleito e a de revestimento (BALBO, 2007).

Para uma estrutura bem dimensionada é necessário analisar as

características dos materiais utilizados na construção do pavimento, sua resistência a ruptura, permeabilidade e deformabilidade, em associação a recorrência das cargas e ao clima (BERNUCCI et al., 2010).

No dimensionamento, com o subleito de boa qualidade terá consequentemente um pavimento com menor espessura e assim poderá dispensar as camadas de reforço ou sub-base (SENÇO, 2007).

Figura 4 – Camadas que compõem o pavimento flexível.



Fonte: Bernucci et. al., 2008.

2.2.2.1 Subleito

Será composto por material natural e compactado, sendo fundação e parte complementar da estrutura, absorvendo os esforços verticais causados na superfície (BALBO,2007).

2.2.2.2 Regularização

Conhecida como preparo do subleito, possui uma estrutura de altura variável, implantada sobre a camada de subleito e designada a acomoda-lo, transversal e longitudinalmente, como o projeto (SENÇO, 2007).

2.2.2.3 Reforço do subleito

É uma camada optativa, pelo fato das próximas camadas suprirem as necessidades de um subleito de menor resistência aos esforços verticais. Na sua execução obtém-se material mais resistente ao solo de fundação, logo receberá maiores pressões provenientes das cargas aplicadas no pavimento (BALBO, 2007).

Segundo Senço (2007), a camada de reforço do subleito possui uma espessura continua, que resiste e distribui os esforços verticais, sendo um componente exclusivamente do pavimento e com aplicação de complemento da sub-base, construída quando necessária sobre a regularização, detendo de tecnologias inferiores à sub-base e superiores a camada de regularização.

2.2.2.4 Sub-base

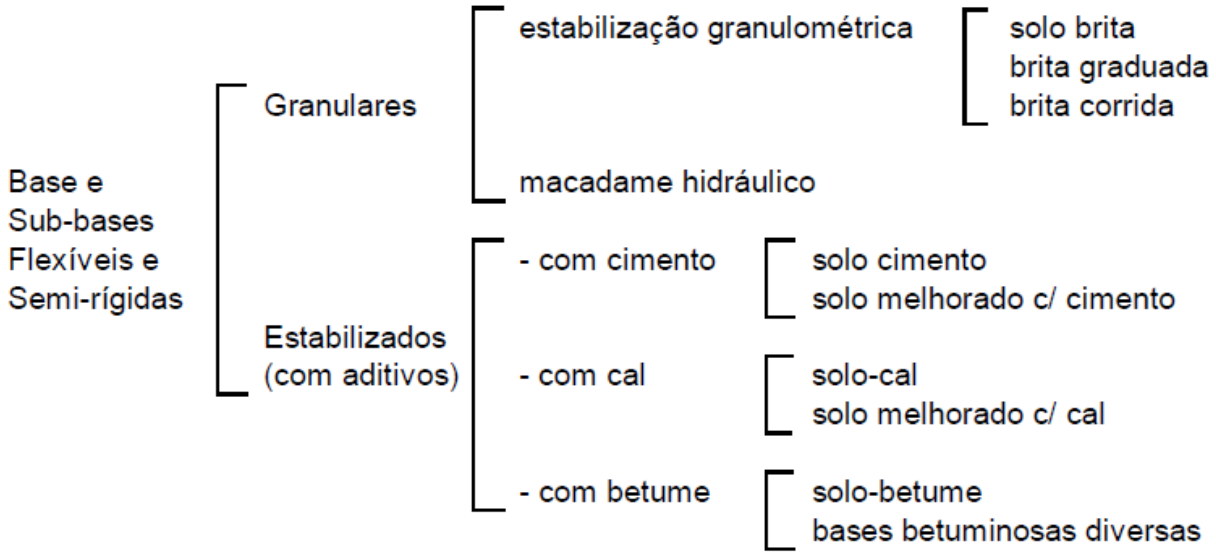
Camada construída por questões econômicas e por caráter construtivos. Quando a base possui uma espessura muito alta, opta-se pela divisão, surgindo em projeto à sub-base (BALBO, 2007).

A camada é construída quando não for conveniente a construção da base sobre a regularização ou reforço do subleito. Usufruindo das características da tecnologia terá um material de melhor qualidade que o reforço do subleito (SENÇO, 2007).

2.2.2.5 Base

Camada com material superior a sub-base, atribuída a função de contrapor os esforços verticais causados pelo tráfego e distribuir os mesmos (SENÇO, 2007). A Figura 5 ilustra a classificação utilizada pelo DNIT para as camadas e base e sub-bases utilizados nos pavimentos rodoviários de acordo com os materiais utilizados.

Figura 5 – Classificação das bases e sub-bases.



Fonte: Manual de Pavimentação (2006).

2.2.2.6 Revestimento

Camada que recebe as cargas exercidas na capa de rolamento e as ações climáticas, sendo impermeável, resistente aos esforços praticados pelo tráfego que são diversificados de acordo com o peso e a velocidade. Tem a função melhorar a superfície da área de rolamento em relação ao conforto e segurança e contrapor ao degaste, ampliando assim a vida útil da estrutura (BERNUCCI et al., 2010; SENÇO, 2007).

A dimensão da camada de revestimento é adotada através de critérios do projetista ou em função do tráfego esperado, assim tendo medidas usuais para vias de simples e para autoestradas, para a primeira de 3 a 5 cm e a segunda de 7.5 a 10 cm (SENÇO,2007).

Para Balbo (2007), o revestimento necessitará adquirir as cargas estáticas ou dinâmicas, sem ocasionar deformações elásticas ou perdas de compactação, entre demais funções. Alguns materiais fornecem essas condições, tais como: tratamentos superficiais e misturas asfálticas em geral. Assim como as bases e sub-bases, o revestimento também possui variações como ilustra o Quadro 2.

Quadro 2 – Classificação dos Revestimentos.

<table>
<tr><td rowspan="8">Revestimentos</td><td rowspan="8">Flexíveis</td><td rowspan="5">Betuminosos</td><td colspan="2">Concreto betuminoso</td><td rowspan="3">Usinados</td></tr>
<tr><td colspan="2">Pré-misturado a quente</td></tr>
<tr><td colspan="2">Pré-misturado a frio</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Tratamento superficial</td><td>Penetração direta</td><td rowspan="2">Simples
Duplo
Triplo
Quádruplo</td></tr>
<tr><td>Penetração invertida</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Calçamentos</td><td colspan="3">Alvenaria poliédrica</td></tr>
<tr><td colspan="3">Paralelepípedos</td></tr>
<tr><td colspan="3">Blocos de concreto pré-moldados e articulados</td></tr>
</table>

Fonte: Adaptado de Senço (2007).

Os materiais para tratamentos superficiais podem ser produzidos na própria pista, os das misturas usinadas podem ser produzidos em usinas fixas ou móveis. Ainda sobre as misturas usinadas, podem ser divididas em função da granulometria em: densas, abertas, contínuas e descontínuas. Podem ser classificados também em relação ao ligantes: a quente e frio, usando CAP e Emulsão Asfáltica de Petróleo (EAP), respectivamente (BERNUCCI et al., 2010).

2.3 CHAMOTES CERÂMICOS

A indústria cerâmica vermelha durante a produção de produtos como blocos cerâmicos e telhas produz um subproduto proveniente de rejeitos de material cerâmico originado na etapa de queima, que pode eventualmente retornar ao processo, após trituração, gerando um resíduo conhecido como chamote (VIEIRA et. al., 2004).

Conforme a Associação Nacional da Indústria de Cerâmica (ANICER), que representa atualmente 164 indústrias cerâmicas, a perda de produtos de cerâmica vermelha não é fixo no Brasil, e depende de fatores tais como: matéria prima, tecnologia na fabricação e controle de qualidade adotados nas indústrias, dentre outros, e situa-se entre 2 a 10%, podendo até ultrapassar o limite máximo de 10%.

Esses resíduos atualmente vêm sendo acumulado nos pátios das indústrias sem nenhuma utilização aparente conforme ilustra a Figura 6.

Figura 6 – Resíduos depositados em pátio de indústria cerâmica.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A reutilização e a reciclagem de resíduos, após a detecção de suas potencialidades são consideradas atualmente alternativas que podem contribuir para a diversificação de produtos, diminuição dos custos de produção, fornece matérias-primas alternativas para uma série de setores industriais, conservação de recursos não renováveis, economia de energia e, principalmente, melhoria da saúde da população (MENEZES et. al., 2007).

2.4 AGREGADOS

De acordo com a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a Norma Brasileira (NBR) 9935/2005, que determina a terminologia dos agregados, o termo agregado é definido como “material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e de concreto”.

O agregado que é utilizado nas misturas asfálticas é obtido da exploração de jazidas e provém da britagem de rochas como o basalto, granito, gnaisse, calcário, entre outros tipos, os quais são transformados em pedra britada com vários tamanhos e de graduação específica (ZHU, WU E WANG, 2012). A construção e a

manutenção dos pavimentos asfálticos requerem grandes quantidades de agregados, os quais normalmente são responsáveis por mais de 90% em peso das misturas asfálticas (HUANG, BIRD E HEIDRICH, 2007).

Antes de serem utilizados em revestimentos asfálticos ou na mistura para fabricação do concreto é necessário que haja uma análise completa das suas características, através de ensaios em laboratório e da experiência prática, obtendo resultados de como o agregado irá se comportar durante toda sua vida de projeto. O desempenho de um agregado depende do histórico antes da extração, da maneira como são produzidos e sob quais condições ocorrerá as solicitações (BERNUCCI et. al., 2008).

O agregado escolhido para determinada utilização deve apresentar propriedades de modo a suportar todas as tensões impostas na superfície do pavimento e também em seu interior, a escolha do material é feita em laboratório, onde uma série de ensaios são realizados para ter-se uma previsão de como o agregado irá se comportar quando estiver no determinado serviço (BERNUCCI et. al., 2008).

2.4.1 Classificação

Há uma grande variedade de agregados que podem ser utilizados na pavimentação, contudo cada utilização em particular requer um tipo de agregado específico. Podendo assim serem divididos em 3 grandes grupos, segundo sua natureza, tamanho e distribuição dos grãos. Segundo Senço (2011), essa divisão é descrita da seguinte maneira:

2.4.1.1 Quando a natureza

- Naturais: são obtidos por processos convencionais de desmonte, escavação e dragagem em depósitos continentais, marinhos, estuários e rios. São exemplos os pedregulhos, as britas, os seixos, as areias etc.
- Artificiais: são resíduos de processos industriais, tais como a escória de alto-forno e de aciaria, ou fabricados especificamente com o objetivo de alto desempenho, como a argila calcinada e a argila expandida.

- Reciclados: Nessa categoria estão os provenientes de reuso de materiais diversos. Devido às restrições ambientais, vem crescendo o uso desse agregado reciclado, destacando-se o uso dos resíduos da construção, que serão os agregados utilizados nessa pesquisa.

2.4.1.2 Quando ao tamanho

- Graúdo: é o material com dimensões maiores do que 2.0 mm, ou seja, é o material que fica retido na peneira de nº 10. São as britas, cascalhos, seixos etc.;
- Miúdo: é o material com dimensões maiores que 0.075 mm e menores que 2.0 mm, ou seja, é o material que fica retido na peneira de Nº 200, mas que passa na de abertura de Nº 10. São as areias, o pó de pedra etc.;
- Material de enchimento (fíler) – é o material onde pelo menos 65% das partículas é menor que 0.075 mm, correspondente à peneira de nº 200, exemplo: cal hidratada, cimento Portland etc.

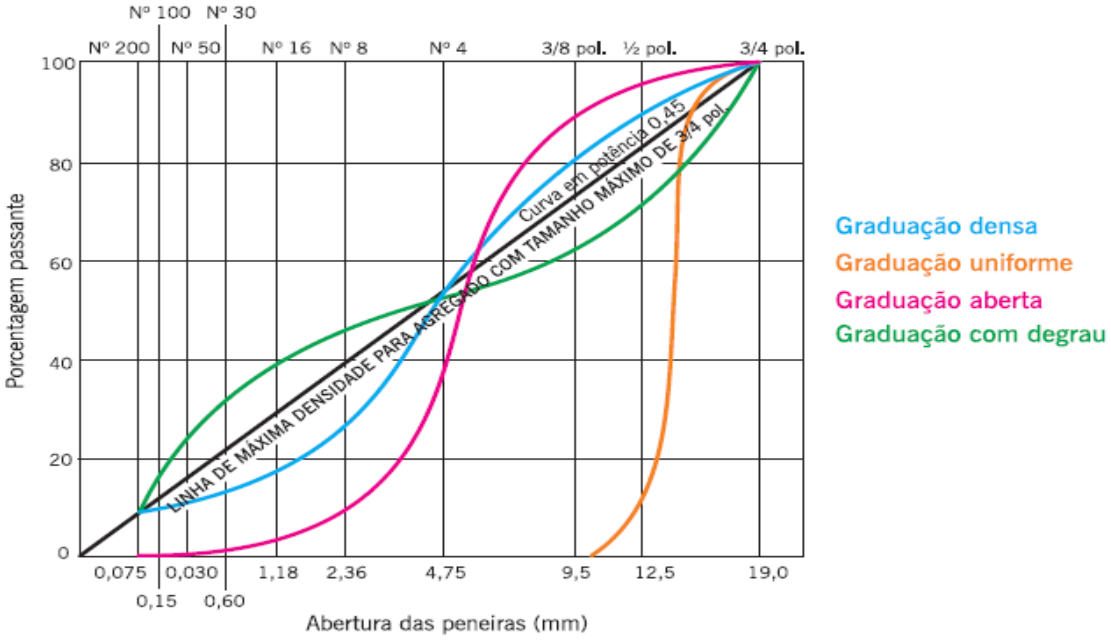
2.4.1.3 Quanto a distribuição dos grãos

- Graduação densa ou bem graduada: é aquele que apresenta distribuição granulométrica contínua, próxima à de densidade máxima.
- Graduação aberta: é aquele que apresenta distribuição granulométrica contínua, mas com insuficiência de material fino (menor que 0.075 mm) para preencher os vazios entre as partículas maiores, resultando em maior volume de vazios.
- Graduação uniforme: é aquele que apresenta a maioria de suas partículas com tamanhos em uma faixa bastante estreita. A curva granulométrica é bastante íngreme;
- Graduação descontínua ou com degrau: é aquele que apresenta pequena porcentagem de agregados com tamanhos intermediários, formando um patamar na curva granulométrica correspondente às frações intermediárias. São agregados que devem ser adequadamente trabalhados quando em misturas asfálticas, pois são muito sensíveis à segregação.

  O Gráfico 1 faz a representação convencional das curvas granulométricas de

cada tipo de graduação:

Gráfico 1- Representação convencional das curvas granulométricas.



Fonte: Bernucci et al., 2008.

2.4.1.4 Classificação dos solos para fins rodoviários

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) um sistema de classificação de solos bastante utilizado em pavimentação é o do HRB, atualmente denominado Transportation Research Board (TRB), aprovado em 1945. Este sistema de classificação liga-se intimamente ao método de dimensionamento de pavimentos.

Nesta classificação, os solos são reunidos em grupos e subgrupos, em função de sua granulometria, limites de consistência e do Índice de Grupo (IG). No Quadro 3 a seguir é mostrado a classificação dos solos, segundo o TRB. Determina-se o grupo do solo, por processo de eliminação da esquerda para a direita, no Quadro de classificação. O primeiro grupo a partir da esquerda, com o qual os valores do solo ensaiado coincidir, será a classificação correta. A classificação serve de parâmetro para aceitação do material na área do subleito.

Quadro 3- Classificação dos solos TRB.

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 max.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

Fonte: Manual de Pavimentação do DNIT (2006).

2.5 URBANIZAÇÃO X IMPACTO AMBIENTAL

Segundo a resolução do Conama 001 (BRASIL, 1986), impacto ambiental é qualquer tipo de alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, ocasionados pela atividade humana, e que possa causar danos a população e aos ecossistemas.

Os impactos ecológicos não eram considerados nas sociedades primitivas, pois a produção de resíduos era pequena e a assimilação ambiental era grande. Somente após o desenvolvimento tecnológico da revolução industrial no mundo, é que esta preocupação veio à tona. A partir desta constatação, começam a surgir as primeiras preocupações e questionamentos relativos ao efeito estufa e consequentemente o aumento do consumo de energia, a destruição da camada de ozônio, a poluição do ar e as chuvas ácidas, o consumo desmedido de matérias-primas não renováveis, a geração de resíduos, dentre outros (CHEN E CHAMBERS,

1999).

Como as indústrias cerâmicas produzem uma quantidade expressiva de resíduos, em diversos lugares do mundo há uma preocupação coletiva com a destinação correta desse material, pois a maioria das cidades cresceu sem ter um desenvolvimento adequando de sua infraestrutura, levando essas empresas a depositarem os seus resíduos em locais inadequados, ocasionando sérios problemas para essas cidades e principalmente para o meio ambiente (MIRANDA, 2009).

Devido ao grande volume de resíduos, o custo para deposição licenciada desse material e a falta de consciência ambiental, surgiram os aterros clandestinos, pois, por conta desses fatores, as indústrias não sentem a necessidade de arcar com todas as despesas de seus resíduos, dando qualquer destino ao mesmo, desde que seja mais barato. Por esse motivo há uma grande necessidade do poder público buscar alternativas para incentivos, seja econômicos ou sociais, para que essas empresas sintam uma motivação a mais para procurar uma destinação correta para seus resíduos.

As atividades de construção demandam uma notável quantidade de materiais inertes, tais como areia e cascalho, que usualmente são fornecidos por meio da extração de sedimentos aluviais. A extração desses sedimentos modifica o perfil dos rios e o seu equilíbrio, além de introduzir problemas ambientais como modificação em sua estrutura hidrológica e hidrogeológica. A extração de material inerte de formações rochosas em área acidentadas e montanhosas também é uma danosa atividade ao meio-ambiente, uma vez que altera a paisagem e provoca problemas de instabilidade (CABRAL et al., 2009).

Outro tipo de impacto ambiental é no momento da execução do projeto de pavimentação, pois, para a construção de uma rodovia, há a necessidade de uma exploração demasiada dos recursos naturais, um exemplo disso é a extração de blocos de rocha sã, cujo único objetivo é a transformação desses blocos com diâmetro variando de acordo com a necessidade de utilização. Mas, para a extração dessa rocha, é necessário retirar o material que a cobre, pois o mesmo possui uma resistência muito baixa e por esse motivo, o mesmo é retirado e logo em seguida descartado, mas segundo Bernucci (2008), para minimizar o impacto ocasionado por essa atividade, pode-se utilizar esse material em áreas que necessitem de elevação de cotas do terreno, servindo como aterro para os mesmos.

2.6 RECICLAGEM DO CHAMOTE

Os resíduos cerâmicos, normalmente, são depositados nos pátios das industrias cerâmicas ou lançados irregularmente em depósitos clandestinos, provocando gastos desnecessários ao poder público, pois o mesmo terá que assumir a responsabilidade sobre esse entulho e a Figura 7 demostra bem essa realidade.

Figura 7 – Resíduos cerâmicos no pátio de indústria cerâmica.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para que a reciclagem desse material ocorra de maneira correta, é necessário que as empresas procurem dar uma destinação final adequada para os resíduos produzidos, sendo as usinas recicladoras uma das principais alternativas, pois oferecem vantagens para a economia dessa empresa, diminui os impactos ambientais e oferece um produto reciclado de excelente qualidade, produto esse que pode ser utilizado de várias maneirais, como na pavimentação de estradas (CRISTO et al., 2014).

Analisando todos esses fatos, pode-se perceber que a reciclagem do chamote cerâmico é uma das mais importantes alternativas para a diminuição do volume de resíduos nas indústrias, pois essa técnica utiliza uma quantidade expressiva de resíduos, tanto na porção graúda quanto na miúda, além de ser uma técnica de fácil execução (HORTEGAL; FERREIRA; SANT’ANA, 2009).

A reciclagem do material depende de uma coleta prévia do material, logo após

deve passar por um processo de britagem, que é realizado em locais apropriados, em seguida é realizado o peneiramento, para a obtenção de materiais com os diâmetros de acordo com os padrões a serem utilizados (BERNUCCI; LEITE; MOTTA, 2007).

Segundo Leite (2007) após todos esses processos, obtêm-se um novo produto, que é o chamote cerâmico britado. Como ilustração a Figura 8 com o chamote em processo de britagem e a Figura 9 o resíduo cerâmico britado.

Figura 8 – Britagem do chamote cerâmico.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 9 – Chamote cerâmico britado.

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.7 UTILIZAÇÃO DO CHAMOTE CERÂMICO NA PAVIMENTAÇÃO

Devido à preocupação mundial com o desenvolvimento sustentável e visando garantir as condições mínimas e adequadas paras as futuras gerações, tem sido corriqueira a busca por novas alternativas que garantam o progresso sem prejudicar o meio ambiente (AMORIM, 2013).

A escassez de jazidas naturais (solos e agregados) cujas características não se enquadram nas especificações técnicas tradicionais para o uso em pavimentação, aliada a uma legislação ambiental mais austera quanto à concessão de licenças para a exploração de jazidas naturais são fatores motivadores para a busca e utilização de materiais alternativos (BATALIONE, 2007).

Segundo Silveira e Borges (2016) o uso de resíduos é extremamente benéfico ao meio ambiente uma vez que esses materiais, geralmente, são descartados e dispostos de forma inadequada. A grande exploração de jazidas naturais causa sua escassez por se tratar de uma fonte não renovável e finita. Grandes centros urbanos estão aumentando o custo de suas obras devido às grandes distâncias de transporte desse material até seu ponto de aplicação, aumentando o custo do transporte.

Ainda segundo os autores a difusão de pesquisas nessa área, desperta à sociedade para estar sempre buscando tecnologias novas e cada vez mais ecológicas e sustentáveis. A população em geral é prejudicada pelos grandes volumes de resíduos acumulados em indústrias ou em áreas das cidades, causando poeira, poluição visual etc.

Su e Chen (2002) em sua pesquisa, utilizaram agregado reciclado de vidro em substituição ao agregado natural nas proporções 0, 5, 10 e 15% em peso e, utilizaram agregado proveniente de resíduo de mármore para a produção de concreto asfáltico, ambos os resultados comprovam a viabilidade técnica na utilização de resíduos.

Na Austrália, o Institute Public Works Engineering Australia – NSW Division (2010) foi contratado pelo Department of Environment, Climate Change and Water NSW para atualizar e aperfeiçoar a Especificação de Fornecimento de Materiais Reciclados para Pavimentos, Terraplenagens e Drenagens, publicada originalmente no ano de 2003, que havia sido realizada para suprir as necessidades das industrias com relação a utilização de materiais reciclados em obras públicas. Através deste estudo foram definidos alguns parâmetros para a utilização de materiais reciclados

em obras de pavimentação. Em 2006 foi executada a pavimentação asfáltica da Rua Armstrong, localizada no Estado de Artney Glen, com uma extensão de 680 metros, onde a estrutura do pavimento era composta por uma camada de revestimento com 4 cm de CBUQ, uma camada de base com 15 cm e uma camada de sub-base com 30 cm de espessura, composta por materiais reciclados.

Como os materiais convencionais possuem um elevado custo e para sua obtenção é necessária uma altíssima exploração de jazidas de agregados minerais, a técnica do agregado reciclado ganhou força, pois segundo Leite (2007), o agregado reciclado custa cerca de 30% a menos que a brita graduada convencional, por esse motivo várias empresas viram um incentivo a mais para a substituição, quando possível, o material convencional pelo reciclado.

Possa e Antunes (2016) analisaram a reutilização do Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV), com a intenção de reinseri-lo no ciclo de produção da construção civil, através de materiais de construção como: concretos estruturais e não estruturais, argamassas de revestimento, blocos de alvenaria, em substituição, ainda que pequena, do cimento e como agregado na pavimentação e o emprego do resíduo de Cerâmica Vermelha em base e sub-base de pavimentos rodoviários de tráfego leve, se mostraram adequados mais especificamente para sub-base em misturas de solo-agregado.

Silva e Carvalho (2017) fizeram estudos experimentais com o objetivo de identificar a possível aplicação de RCV em camadas de base de pavimentos de baixo tráfego no município de Palmas - TO misturado ao solo da própria região foi possível concluir que é favorável a configuração 50%Solo + 50%RCV, em aplicação como camada de base de pavimentos de baixo tráfego. Essa afirmação se deu principalmente com relação ao parâmetro do ISC, mostrando que o material possui viabilidade técnico-ambiental adequada.

Redivo (2011) realizou analises com misturas entre solo e agregados obtidos de resíduos da fabricação de tijolos e telhas para utilização em camadas de pavimentos com baixo volume de tráfego, observando que em todas as misturas realizadas ocorreu uma redução da massa específica aparente seca e um aumento da umidade ótima, quando comparadas com as amostras de solo. Com relação ao ensaio de CBR, estas misturas apresentaram um aumento no valor deste índice e uma redução no valor da expansão.

Através da análise da granulometria das misturas após o ensaio de

compactação verificou que, independente do tipo de solo, as misturas que mais apresentaram quebra dos cacos cerâmicos foram as misturas compostas por 70% de material cerâmico, devido a quantidade de cacos presentes nas misturas; A partir da análise dos resultados dos ensaios de Compactação e CBR verificou que os cacos de telhas apresentaram melhor comportamento, quando incluídos nas misturas com solo, que os cacos de tijolos.

Dias (2016) utilizou resíduo cerâmico como agregado graúdo e constatou que, apesar de ser um resíduo descartado por falha de produção, o mesmo apresenta condições favoráveis para a sua reutilização, devido demonstrar desgaste à fervura e desgaste à abrasão inferiores aos parâmetros estipulados pelas normas vigentes, além de se verificar, através da análise da composição química e mineralógica do mesmo, que a presença dos elementos que o compõem em sua maioria, inclusive a presença da caulinita, indicador das propriedades ideais para uso na indústria de cerâmica vermelha, que confere boa resistência ao resíduo, após o mesmo ser submetido a altas temperaturas.

Khalaf (2004) apresentou na Conferência Internacional para a utilização de materiais em construção e estruturas um estudo avaliando a possibilidade de utilizar cacos de tijolos como agregado em misturas betuminosas. Neste estudo foram realizados vários ensaios comparando as propriedades de um agregado de tijolo reciclado, chamado de RBA, com um agregado tradicional de granito. Os agregados selecionados foram analisados e então utilizados em misturas betuminosas, que por sua vez, foram ensaiadas para determinar as suas propriedades fisicas e mecânicas.

Os resultados desta investigação mostram que a utilização de agregado de tijolo reciclado como agregado graúdo é uma opção viável, haja vista que, devido à alta porosidade e rugosidade das superfícies do agregado de tijolo, estes possuem a capacidade de absorver mais betume, proporcionando uma melhor ligação na mistura. Outro resultado importante obtido por Khalaf, foi que, devido a densidade dos blocos de tijolo serem menores que os de granito, a mistura betuminosa se torna mais leve, se tornando mais fácil de usinar, transportar e executar na obra. A resistência do agregado de tijolo tem pouca influência nas propriedades finais das misturas betuminosas. Por outro lado, a porosidade e a rugosidade produzem melhores resultados.

Em regiões carentes de material pétreo, a reutilização desse material pode ser considerada uma alternativa técnica e ambientalmente viável, uma vez que a

resistência do resíduo cerâmico, com granulometria de agregado graúdo mostrou-se satisfatória, contribuindo para maior durabilidade dos pavimentos e na redução dos impactos ambientais resultantes da exploração de pedreiras e retiradas de seixo do leito dos rios.

De acordo com o relatório da Federal Highway Administration (FHWA, 2000), o Illinois Department of Transportation utiliza anualmente milhões de toneladas de materiais em suas rodovias. A utilização de materiais reciclados, por ano, é superior a 1,5 milhões de toneladas, resultando na diminuição dos custos e aumento no desempenho das rodovias. O Departamento selecionou alguns materiais reciclados que vêm sendo utilizados para realizar a complementação ou a substituição dos agregados utilizados em base de pavimentos.

2.8 VIABILIDADE DO USO DO CHAMOTE CERÂMICO NA PAVIMENTAÇÃO

Para a utilização de resíduos cerâmicos na pavimentação alguns critérios devem ser analisados, como atender ao critérios físicos e mecânicos descritos pelo Manual de Pavimentação do DNIT (2006) e a Distância de Transporte do material não encarecer a obra.

De acordo com DNIT (2006) um material será considerado satisfatório, quando os materiais coletados forem ensaiados quanto a:

a) Granulometria por peneiramento com lavagem do material na peneira de 2.0 mm (n°10) e de 0.075 mm (n° 200);

b) Limite de Liquidez (LL).;

c) Limite de plasticidade (LP);

d) Equivalente de Areia;

e) Compactação;

f) Índice Suporte Califórnia (ISC).

2.8.1 Granulometria por peneiramento

Através deste ensaio é possível verificar a dimensão dos grãos e a proporção em peso de cada material passante nas peneiras do total do material. É importante na avaliação do entrosamento das partículas proporcionando um esqueleto em que os materiais de granulometria menor preencham os vazios deixados pelos grãos

maiores, garantindo uma estabilidade ao material.

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) prevê 6 faixas granulométricas nomeadas de “A” a “F” que devem ser respeitadas para o material ser considerado apto a ser utilizado nas camadas do pavimento, o torna importante o ensaio na fase de aceitação do material para execução das camadas vias rodoviárias.

2.8.2 Limite de Liquidez

O LL, segundo Senço (2001), é a umidade de transição entre os estados líquido e plástico do solo, e experimentalmente corresponde ao teor de umidade com que o solo fecha certa ranhura sob o impacto de 25 golpes do aparelho de Casagrande. Em laboratório é obtido determinando-se o teor de umidade no qual um cilindro de um solo com 3 mm de diâmetro apresenta-se fissuras. Para realização de ambos os ensaios, passou-se uma amostra do solo na peneira de Nº40.

Já de acordo com a norma DNER-ME 122/94 o LL corresponde ao teor do solo com o qual se unem, em um centímetro de comprimento, as bordas inferiores de uma canelura feita em uma massa de solo colocada na concha de um aparelho normalizado (Casagrande) sob a ação de 25 golpes da concha sobre a base desse aparelho. O LL marca a transição do estado plástico ao estado líquido e é expresso em percentagem. O ensaio ´necessário para mensurar a consistência do material na presença de água.

2.8.3 Limite de Plasticidade

Assim com o ensaio para determinação do LL, o ensaio do LP também analisa a consistência do material e segundo a norma DNER-ME 82/94 é realizado através da modelagem em forma elipsoidal, rolando a massa do material entre os dedos e a face esmerilhada da placa de vidro, com pressão suficiente para moldar um cilindro de diâmetro uniforme. A desagregação vai se manifestar, conforme o tipo de solo, como exemplo os solos muito argilosos que requerem mais pressão pra deformação do cilindro. Importante ensaio para estudo do comportamento do solo.

2.8.4 Equivalente de Areia

O Equivalente de Areia corresponde a relação volumétrica entre a altura do nível superior da areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de solo ou de agregado miúdo, numa proveta, em condições estabelecidas pela norma DNER-ME 54/97. Os resultados caracterizam o material com relação a quantidade de finos em sua composição, essencial para definir a necessidade de uma eventual estabilização granulométrica.

O Equivalente de Areia determina a quantidade de impurezas e finos em determinada mistura de agregado, ou seja, quanto maior o equivalente de areia, menor a quantidade de finos e impurezas na amostra (POERSCHKE, 2016).

2.8.5 Compactação

Através do Ensaio de Compactação é possível obter a correlação entre o teor de umidade e o peso específico seco de um solo quando compactado com determinada energia (SANTOS, 2008).

O ensaio descrito pela norma DNIT 164/2013-ME, a utilização de amostras não trabalhadas, que corresponde àquela amostra de solo que não foi reutilizada nos ensaios. Já a amostra não deformada é aquela que se apresenta conforme foi retirada da natureza. Importante para definir a umidade ótima do material, ou seja, aquela que proporciona a maior massa específica que o material poderá atingir.

A norma ainda descreve as três metodologias para o ensaio:

- Método A – Normal, quando o número de golpes aplicados em cada camada do corpo de prova for 12;
- Método B – Intermediária, quando são aplicados 26 golpes por camada do corpo de prova;
- Método C – Modificada, quando são necessários 55 golpes por camada do corpo de prova.

A norma DNIT 098/2007 – ES esclarece que para as camadas de base a o método que melhor se adequa é o método C, com a energia modificada, já a norma DNIT 139/2010 – ES informa que para as camadas de sub-base o método B, com a energia intermediária obtém melhores resultados.

2.8.6 Índice de Suporte Califórnia

Segundo Senço (2011) os resultados do ISC é uma das análises mais aceitas para avaliar o comportamento de um solo, quer como fundação de pavimento, quer como componente das camadas desse pavimento. Ainda de acordo com o autor o índice pode ser definido como a relação percentual entre a pressão necessária para fazer penetrar, de maneira padronizada, um pistão numa amostra de solo convenientemente preparada e a pressão para fazer penetrar o mesmo pistão, à mesma profundidade, numa amostra padrão de pedra britada, ou material equivalente, exigindo a pressão de 1.000 psi para a penetração de 0.1” ou 1.500 psi para a penetração de 0.2”.

O ensaio consiste na definição do valor relativo ao suporte do material utilizando amostras deformadas não trabalhadas de material que passa na peneira de 19 mm, correspondente a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima, através das definições da norma DNIT 172/2016-ME.

Além da resistência a penetração do pistão o ensaio do ISC analisa a expansão do material durante as 96 h de imersão em água dos corpos de prova, exigidos pelo ensaio antes de analisar a resistência. Esse estudo é importante para entender o comportamento do material em saturação, pois prefere-se solos e agregados estáveis na presença da água.

2.8.7 Distância Média de Transporte

Anta (2010) relata que o custo do transporte do material escavado é, obviamente, proporcional ao trabalho desenvolvido pelo equipamento que transporta. No caso da terraplenagem e da pavimentação é denominado de Momento de Transporte, no qual considera-se o volume escavado multiplicado pela distância de transporte entre a origem e o destino do material. Essa distância percorrida pelo material é conhecida ainda segundo o autor como Distância Média de Transporte.

Dessa forma o transporte do material é um custo que engloba os orçamentos rodoviários, inclusive interfere na escolha do local de exploração dos materiais a serem utilizados nas camadas do pavimento, quanto mais próxima a jazida do local de aplicação menor será o custo. Assim as obras onde eventualmente utilizem resíduos cerâmicos para composição das misturas para aplicação nas camadas de

base e sub-base devem ser próximas as industrias cerâmicas fornecedoras dos chamotes, pois caso contrário inviabilizaria economicamente o uso.

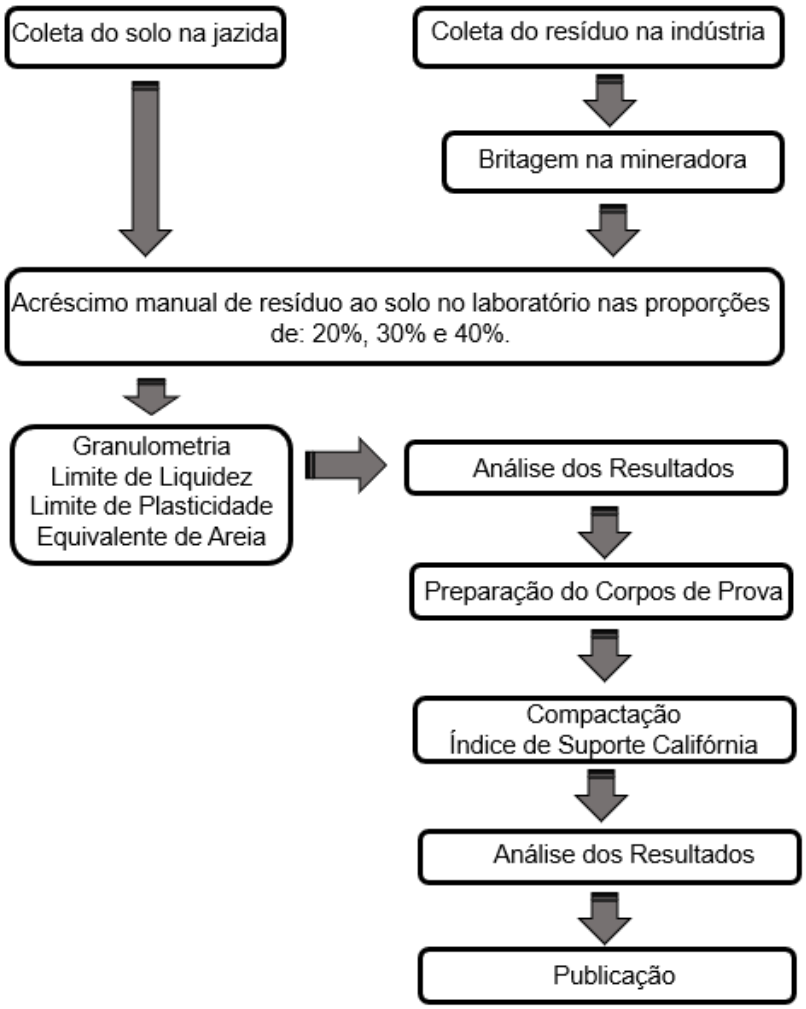
3 METODOLOGIA

3.1 TIPO DE ESTUDO

Trata-se de um estudo experimental para a determinação do comportamento mecânico e das principais características de amostras contendo diferentes proporções da mistura de chamote cerâmico associado ao solo laterítico, comparando-as com uma amostra contendo 100% desse mesmo solo, buscando a proporção mais adequada da mistura, e assim analisar a viabilidade de sua utilização nas camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviário.

O desenvolvimento experimental deste trabalho ocorreu de acordo com a demonstração do fluxograma da Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma do trabalho.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Partindo do conceito de que a análise de processo, ou análise de implementação, é realizada para obter informação descritiva sobre o processo de implementação de um novo programa ou procedimento, que a análise de resultado documenta a extensão em que as metas de um programa são atingidas e que a análise de intervenção tenta identificar, geralmente usado em delineamento experimental, os impactos ou efeitos brutos de uma intervenção, pode-se concluir que esta pesquisa se enquadra na área de análise de intervenção, pois analisará o desempenho e as principais características de amostras contendo misturas solo-chamote, sendo norteada por indicadores quantitativos.

3.2 AMOSTRA

Para realização do estudo foi coletado solo laterítico em uma jazida localizada na comunidade Taboca do Pau Ferrado, pertencente a zona rural da cidade de Teresina - PI, sendo a mesma jazida utilizada pelas obras de duplicação da BR - 343, próxima da capital do Estado do Piauí, que subsidiou a escolha do material por já apresentar, na fase de projetos da obra, índices favoráveis ao uso nas camadas estudadas na pesquisa a Figura 11 mostra a jazida escolhida. Com relação ao solo laterítico o critério de aceitação foi o solo apresentar variados tamanhos de grãos, de modo que a porcentagem do agregado miúdo preencha os vazios deixados pela porcentagem do agregado graúdo. A Figura 12 mostra o solo laterítico recolhido para o estudo.

Figura 11 – Jazida de solo laterítico.

Fonte: DER (2013).

Figura 12 – Solo laterítico.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resíduos cerâmicos foram recolhidos em uma indústria cerâmica localizada na cidade de União – PI, a escolha foi em função da parceria com a indústria que além de fornecer, coletou o material e o transportou até mineradora localizada também na cidade de Teresina – PI, onde foram triturados em britador de mandíbulas Faço modelo 40x60 ilustrado na Figura 14. O resíduo cerâmico foi misturado com o solo laterítico manualmente e as amostras utilizadas estão ilustradas na Figura 13, ao centro o resíduo cerâmico ladeado pelo solo laterítico em duas granulometrias distintas.

Figura 13 – resíduos cerâmicos entre duas amostras do solo laterítico.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 14 – Britador Faço 40x60 utilizado no processo.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a análise foram definidas três proporções de mistura e também foi ensaiado o solo puro para ser utilizado como parâmetro. As misturas foram divididas em dois grupos, o primeiro grupo foi ensaiado segundo a norma DNIT 098/2007-ES visando aplicação em camadas de base e o segundo grupo foi ensaiado conforme a norma DNIT 139/2010-ES almejando a aplicação em camadas de sub-base. Ainda para os ensaios do Equivalente de Areia, Compactação e ISC foram executados cinco corpos de prova para cada proporção de cada grupo conforme ilustra o Quadro 4:

Quadro 4 – Materiais analisados no estudo.

BASE	80% solo e 20% chamote	CP - 1	**SUB-BASE**	80% solo e 20% chamote	CP - 1
		CP - 2			CP - 2
		CP - 3			CP - 3
		CP - 4			CP - 4
		CP - 5			CP - 5
	70% solo e 30% chamote	CP - 1		70% solo e 30% chamote	CP - 1
		CP - 2			CP - 2
		CP - 3			CP - 3
		CP - 4			CP - 4
		CP - 5			CP - 5
	60% solo e 40% chamote	CP - 1		60% solo e 40% chamote	CP - 1
		CP - 2			CP - 2
		CP - 3			CP - 3
		CP - 4			CP - 4
		CP - 5			CP - 5

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3 COLETA DE DADOS

Os ensaios foram realizados no laboratório de pavimentação da empresa Copa Engenharia para a caracterização física e determinação das propriedades dos materiais utilizados para as camadas, seguiram o que determina o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), possibilitando a análise de desempenho e funcionalidade das misturas.

Para a análise do solo e das misturas foram executados os ensaios de Granulometria, LL, LP, Equivalente de Areia, Compactação e ISC. Esses ensaios foram realizados baseados nas normas, procedimentos e metodologias descritas pelo DNIT, visto o estudo visar a aplicação do material em camadas de pavimentos rodoviários e o órgão citado possuir ensaios mais específicos aos materiais tradicionalmente utilizados para esse fim, as normas estão reunidas no Quadro 5.

Quadro 5 - Normas utilizadas para a realização dos ensaios.

NORMA	DESCRIÇÃO
DNER – ME 080/1994	Solo – Análise granulométrica por peneiramento.
DNER – ME 082/1994	Solo – Determinação do limite de plasticidade.
DNER – ME 122/1994	Solo – Determinação do limite de liquidez.
DNER – ME 054/1997	Equivalente de areia.
DNIT 098/2007 – ES	Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico.
DNIT 139/2010 - ES	Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente.
DNIT 164/2013 – ME	Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas.
DNIT 172/2016 – ME	Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas.

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica da mistura seguiu os parâmetros estabelecidos pela norma DNER-ME 080/1994 que apresenta o procedimento para a análise granulométrica de solos por peneiramento.

Foram utilizadas a aparelhagem descrita na norma para a execução do ensaio:

- Peneiras de 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9.5 mm, 4.8 mm, 2.0 mm, 1.2 mm, 0.6 mm, 0.42 mm, 0.30 mm 0.15 mm e 0.075 mm, inclusive tampa e fundo.
- Agitador para peneiras, com dispositivo para fixação desde uma peneira até seis, inclusive tampa e fundo;
- Repartidores de amostras de 1.3 e 2.5 cm de abertura;
- Balança com capacidade de 200 g sensível a 0.01 g;
- Balança com capacidade de 1 kg sensível a 0.1 g;
- Balança com capacidade de 5 kg sensível a 5 g;
- Estufa capaz de manter a temperatura entre 105ºC e 100ºC;
- Cápsula de porcelana com capacidade de 500 ml;
- Almofariz e mão de gral recoberta de borracha, com capacidade de 5 kg de solo;
- Recipiente cilíndrico, aberto, com capacidade de 5 litros, munido de bico vertedor, para desagregar por lavagem a amostra de solo;
- Pá de mão de forma arredondada, com lâmina de alumínio;
- Tabuleiro de chapa de ferro galvanizado, com 50 cm x 30 cm x 6 cm de altura;
- Aparelho secador com lâmpada de infravermelho, para secagem de amostras de solos ou outro dispositivo para o mesmo fim.

A amostra foi preparada conforme será descrito na norma DNIT 164/2013-ME (Ensaio de Compactação) e determinado a massa da amostra seca ar e anotada a massa.

O material foi passado na peneira de 2.0 mm, tomando-se a precaução de desmanchar no almofariz todos os torrões eventualmente ainda existentes, de modo a assegurar a retenção na peneira somente dos grãos maiores que a abertura da malha.

Foi lavado a parte retida na peneira de 2.0 mm a fim de eliminar o material fino aderente e seco em estufa a 105ºC / 110°C, até a consistência de massa. O material obtido foi usado no peneiramento grosso na sequência a seguir:

a) o material passante na peneira de 2.0 mm foi tomado cerca de 120 g. Pesado esse material com resolução de 0.01 g. Foi retirado cerca de 100 g para determinação da umidade;

b) lavada a peneira de 0.075 mm o material assim obtido, vertendo-se água potável à baixa pressão.

O material retido na peneira de 0.075 mm foi seco em estufa, à temperatura de 105ºC a 110ºC, até consistência de massa, e, utilizando-se o agitador mecânico, foi passado nas peneiras de 1.2, 0.6, 0.42, 0.25, 0.15 e 0.075 mm. Foi anotado as massas retidas acumuladas em cada peneira.

O material retido na peneira de 2.0 mm foi colocado no agitador mecânico e o material passado nas peneiras de 50, 38, 25, 19, 9.5 e 4.8 mm, foi anotado as massas retidas e acumuladas em cada peneira. Em seguida calculado a massa total da amostra seca e as porcentagens correspondentes das amostras em suspensão através da leitura do densímetro e dos materiais passantes em cada uma das peneiras. Em posse dos resultados do peneiramento, foram montadas as curvas granulométricas. A Figura 15 ilustra o material retido no peneiramento do solo laterítico.

Figura 15 – Peneiramento do solo laterítico.

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.2 Limite de Liquidez

Para a determinação do LL foi utilizado os parâmetros estabelecidos pela norma DNER-ME 122/1994 e durante a execução do ensaio os equipamentos utilizados foram:

- Estufa capaz de manter a temperatura entre 105ºC e 110ºC;
- Balança com resolução de 0.01 g e sensibilidade compatível;
- Recipientes que evitem a perda de umidade;
- Cápsula de porcelana com capacidade de 500 ml;
- Espátula flexível com aproximadamente 8 cm de comprimento e 2 cm de

largura;

- Cinzel;
- Gabarito para verificação da altura de queda de concha;
- Esfera de aço com 8 mm de diâmetro;
- Pinça para retirar objetos da estufa.

Foi adicionado água aos poucos na amostra, até atingir a homogeneização, depois passou-se uma certa quantidade do material para a concha do aparelho de Casa Grande, até a parte central ficar com 1cm de altura, logo em seguida foi feita a tentativa de aranhar o meio da massa, no sentido do maior comprimento do aparelho, como mostra a Figura 16.

Figura 16 - Ensaio do Limite de Liquidez.

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.3 Limite de Plasticidade

Para a determinação do LP foi utilizado os parâmetros estabelecidos pela norma DNER-ME 082/1994. Para a realização do ensaio foi utilizada a seguinte aparelhagem:

- Estufa capaz de manter a temperatura entre 105ºC e 110ºC;
- Balança com resolução de 0.01 g e sensibilidade compatível;
- Recipientes que permitiram guardar amostras sem variação de umidade;

- Cápsula de porcelana com capacidade de 500 ml;
- Espátula flexível com aproximadamente 80 mm de comprimento e 20 mm de largura;
- Gabarito cilíndrico para comparação de 3 mm de diâmetro e cerca de 10 cm de comprimento;
- Placa de vidro de superfície esmerilhada.

A amostra foi colocada na capsula de porcelana e adicionada água destilada, amassando e revolvendo com auxílio de uma espátula o material durante aproximadamente 20 min. Cerca de 10 g da amostra foi seca e modelada em forma de bola e rolada sobre a placa de vidro para dar lhe forma de cilindro, foram feitas três tentativas tentando formar um cilindro com o material, como ilustra a Figura 17.

Figura 17 – Ensaio do Limite de Plasticidade.

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.4 Equivalente de Areia

Seguindo a norma DNER-ME 054/1994 para a realização do ensaio foi utilizada a seguinte aparelhagem:

- Peneira de 4,8 mm, para análise granulométrica solos;
- Proveta cilíndrica plástica, de 32 mm de diâmetro interno e cerca de 43 cm de altura;
- Tubo lavador de latão, de 6,4 mm de diâmetro externo e 50 cm de comprimento;

- Garrafão com capacidade de 5 litros, dotado de sifão constituído de rolha de borracha com dois furos e de um tubo de cobre dobrado;
- Tubo de borracha de 5 mm de diâmetro interno, com uma pinça de Mohr;
- Pistão constituído por uma haste metálica de 46 cm de comprimento, tendo na extremidade inferior uma sapata cônica de 25,4 mm de diâmetro;
- Funil para colocar o solo na proveta.

Foi coletada a mostra do solo que passou na peneira de Nº4, logo em seguida a amostra foi umedecida, colocada em uma capsula de aproximadamente 110 g e transferida para uma proveta que já estava com uma solução a 10 cm de sua base. O material ficou em repouso por 10 min na proveta. Após esse período, a proveta foi agitada por 90 ciclos de vai e vem e logo em seguida preenchida com uma solução até uma altura de 36 cm e deixada em repouso por 20 min.

Após o período foi efetuado a leitura do nível superior de suspensão de argila e logo em seguida foi introduzido o pistão até ele atingir a camada de areia e depois foi feita a leitura. Esse ensaio foi realizado três vezes, como recomenda a norma. O resultado é obtido da média aritmética dos três ensaios e expresso em porcentagem, arredondando-se para um número inteiro. A Figura 18 mostra a realização do ensaio.

Figura 18 – Ensaio do Equivalente de Areia.

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.5 Ensaio de Compactação

O ensaio descrito pela norma DNIT 164/2013-ME determina a correlação entre o teor de umidade de solo e sua massa específica aparente seca, quando a fração de solo que passa na peneira de 19 mm é compactada nas energias normal, intermediária e modificada, utilizando amostras não trabalhadas.

Seguindo a norma para a realização do ensaio foi utilizada a seguinte aparelhagem:

- Molde cilíndrico metálico de 15.24 cm de diâmetro interno e 17.78 cm de altura, com entalhe superior externo em meia espessura; cilindro complementar com 6.08 cm de altura e com o mesmo diâmetro do molde, com entalhe inferior interno em meia espessura e na altura de 1 cm; e base metálica com dispositivo de fixação ao molde cilíndrico e ao cilindro complementar;
- Disco espaçador metálico de 15.00 cm de diâmetro e de altura igual a 6.35 cm;
- Soquete metálico cilíndrico, de face interior plana de diâmetro igual a 5.08 cm, massa de 4.536 kg, e com a altura de queda igual a 45.72 cm, conforme;
- Extrator de amostra do molde cilíndrico, para funcionamento por meio de macaco hidráulico, com movimentos verticais alternados de uma alavanca;
- Balança com capacidade de 20 kg, com sensibilidade de 1 g;
- Balança com capacidade de 1 kg, com sensibilidade de 0.1 g;
- Estufa capaz de manter a temperatura a 110°C;
- Almofariz e mão de gral recoberta de borracha, com capacidade para 5 kg de solo;
- Régua de aço biselada, rija, de cerca de 30 cm de comprimento;
- Repartidor de amostras de 5.0 cm de abertura; cápsulas de alumínio com tampa, ou de outro material adequado, capaz de impedir a perda de umidade durante a pesagem;
- Peneiras de 50 mm, 19 mm e 4.8 mm;
- Proveta graduada, com capacidade para 1 000 ml;
- Papel de filtro circular com 15 cm de diâmetro;
- Acessórios, tais como bandeja, espátula, colher de pedreiro etc.

As amostras foram secas ao ar, destorroada no almofariz pela mão de gral,

homogeneizada e reduzida por quarteamento, até se obter uma amostra representativa de, aproximadamente 7 kg. A amostra representativa foi passada na peneira de 19 mm. Havendo material retido nessa peneira, foi procedido a substituição do mesmo por igual quantidade em massa do material passando na peneira de 19 mm e retido na peneira de 4,8 mm, repetiu-se as operações até a moldagem cinco corpos de prova para o solo laterítico e para cada percentagem de mistura. Foi determinado a massa destas amostras úmidas e secas em estufa numa temperatura de 110ºC, até constância de massa; foram determinadas as massas com a aproximação de 0.01 g e tomado a média como umidade representativa do corpo de prova compactado.

Foram compactados os materiais no molde com o disco espaçador, com fundo falso, em cinco camadas iguais, de forma a se obter uma altura total do corpo de prova de cerca de 12.5 cm após a compactação. Aplicando em cada camada golpes com o soquete caindo de 45.72 cm de altura, distribuídos uniformemente sobre a superfície da camada. Foi assente, previamente, sobre o disco espaçador um papel de filtro circular de 15 cm de diâmetro. Logo depois removido o cilindro complementar, tomando-se o cuidado de destacar com a espátula o material a ele aderente.

Com a régua de aço biselada os corpos de prova foram rasados retirando o excesso de material na altura exata do molde e determinado, com aproximação de 1 g, a massa do material úmido compactado mais a do molde. Por subtração da massa do molde se determina a massa do material úmido compactado e repetidas as operações para teores crescentes de umidade, utilizando amostras de solo não trabalhadas, quantas vezes necessárias para concretizar a curva de compactação do material e, no mínimo, cinco vezes.

Os corpos de prova moldados (conjunto cilindro + solo úmido compactado) foram utilizados nos ensaios de expansão e penetração, para determinação do ISC.

Ainda segundo a norma DNIT 164/2013-ME três energias de compactação poderiam ser utilizadas:

- Método A (normal) – aplica-se 12 golpes por camada;
- Método B (intermediária) – aplica-se 26 golpes por camada;
- Método C (modificada) – aplica-se 55 golpes por camada.

Seguindo a norma DNIT 098/2007 a energia de compactação utilizada para camada de base foi a intermediária aplicando em cada camada do corpo de prova

55 golpes e para camada de sub-base 26 golpes conforme preconiza a norma DNIT 139/2013-ME. Conforme ilustra as Figuras 19 (a) e 19 (b).

Figura 19 – Ensaio de Compactação.

(a) (b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.6 Ensaio do Índice de Suporte Califórnia

O ensaio do ISC consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo de prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa mistura padrão de brita estabilizada granulometricamente. Essa relação é expressa em porcentagem. O ensaio determina a capacidade de suporte do solo e o Índice de Expansibilidade do solo.

Seguindo a norma DNIT 172/2016-ME para a realização do ensaio foi utilizada a seguinte aparelhagem:

- Molde cilíndrico metálico com 15.24 cm de diâmetro interno e 17.78 cm de altura;
- Disco espaçador metálico, de 15.00 cm de diâmetro e de 6,35 cm de altura;
- Soquete metálico cilíndrico, de face inferior plana, com diâmetro de 5.08 cm, massa de 4.536 kg, e com altura de queda de 45,72 cm;
- Prato perfurado de latão, com 14.90 cm de diâmetro e 0.50 cm de espessura;
- Tripé porta-extensômetro, de latão, com dispositivo para fixação do extensômetro;

- Disco anelar de aço, para sobrecarga, dividido diametralmente em duas partes, com 2.27 kg de massa total, com diâmetro externo de 14.90 cm e diâmetro interno de 5.40 cm;
- Extensômetro, com curso mínimo de 10 mm, graduado em 0.01mm;
- Prensa, para determinação do Índice de Suporte Califórnia.

O experimento foi realizado de acordo com a norma anteriormente citada, inicialmente, para a execução do corpo-de-prova, as amostras foram submetidas a saturação, com teor de umidade próximo a umidade ótima, que foi obtida a partir do ensaio de compactação. Os corpos-de-prova foram moldados em cinco camadas, de forma a se ter uma altura total de solo de cerca de 12.5 cm após a compactação, aplicando, em cada uma delas, 26 ou 55 golpes, nos casos de materiais de sub-base ou base, respectivamente, caindo de 45.72 cm, e distribuídos uniformemente sobre a superfície da camada. Após executá-los, os corpos-de-prova foram pesados, e colocado um extensômetro, destinado a medir as expansões ocorridas. O material ficou sob saturação por 96 horas, como ilustra a Figura 20 (a) e a cada 24 horas era anotado o valor da expansão.

Após as 96 horas, levou-se os corpos-de-prova para a prensa e foi feito o assentamento do pistão de penetração no solo, por meio da aplicação de uma carga de, aproximadamente 45 N, controlada pelo deslocamento do ponteiro do extensômetro do anel dinamométrico, que foi zerado junto com o que mede a penetração do pistão no solo, como mostra a Figura 20 (b). Depois foi acionado, manualmente, a manivela da prensa com a velocidade de 1.27 mm/min. (0.05 pol/min). Cada leitura considerada no extensômetro do anel é em função da penetração do pistão no solo e do tempo especificado para o ensaio.

Figura 20 – Ensaio do Índice de Suporte Califórnia.

(a)

(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.7 Cálculo do Índice de Plasticidade e Índice de Grupo

Segundo Bernucci (2008) na mecânica dos solos, o Índice de Plasticidade (IP) é obtido através da diferença numérica entre o LL e o LP, ou seja:

$$IP = LL - LP \qquad \textit{(Fórmula 1)}$$

O IP é expresso em porcentagem e pode ser interpretado, em função da massa de uma amostra, como a quantidade máxima de água que pode lhe ser adicionada, a partir de seu LP, de modo que o solo mantenha a sua consistência plástica.

Já o IG é usado para avaliar a qualidade de um solo quanto a sua utilização como sub-base de uma rodovia. Corresponde a um número inteiro que varia de 0 (solo ótimo quanto a capacidade de suporte) a 20 (solo péssimo quanto a capacidade de suporte).

$$IG = 0{,}2 \times a + 0{,}005 \times a \times c + 0{,}01 \times b \times d \qquad \textit{(Fórmula 2)}$$

Onde:

a = porcentagem do solo que passa na peneira Nº 200 menos 35%. Se o valor de “a” for negativo adota-se zero, e se for superior 40, adota-se este valor como limite máximo.

b = porcentagem do solo que passa na peneira Nº 200 menos 15%. Se o valor de “b” for negativo adota-se zero, e se for superior 40, adota-se este valor como

limite máximo.

c = valor do LL menos 40%. Se o valor de “c” for negativo adota-se zero, e se for superior a 20, adota-se este valor como limite máximo.

d = valor do IP menos 10%. Se o valor de “d” for negativo adota-se zero, e se for superior a 20, adota-se este valor como limite máximo.

3.4 ANÁLISE DE DADOS

A análise de dados foi feita por meio de Quadros, Tabelas e Gráficos, onde foram registrados os resultados de cada ensaio. A partir dos resultados foram verificadas quais as proporções da mistura solo-chamote que estavam dentro das normas específicas pelo Manual de Pavimentação do DNIT (2006), que relata: para o material ser utilizado na camada de sub-base o ISC deve ser igual ou superior a 20% e IG = O. Já para a camada de base o material deverá apresentar LL máximo de 25%, IP máximo de 6%, Equivalente de Areia maior que 30%, apresentar o ISC maior ou igual a 80%, expansão máxima deverá ser 0,5% e a granulometria deverá estar enquadrada em uma das faixas especificadas no Quadro 6 onde caso o material se enquadre nas faixas A, B ou C, poderá ser usado em rodovias com solicitações previstas durante a vida de projeto de $N > 10^6$, ou seja, em rodovias com alto volume de tráfego, já se o material se enquadrar nas faixas D, E ou F, poderá ser utilizado em rodovias com solicitações previstas durante a vida de projeto de $N < 10^6$ e só devem ser executados para rodovias com baixo volume de tráfego. O número equivalente (N) é um parâmetro utilizado para determinar a quantidade de solicitações que a via irá receber de um eixo tomado como padrão, durante o período de projeto escolhido.

Poderá ainda ser adotado um ISC até 60%, quando economicamente justificado, em face da carência de materiais e prevendo-se a complementação da estrutura do pavimento pedida pelo dimensionamento pela construção de outras camadas betuminosas.

Quadro 6 – Faixas granulométricas do DNIT.

Tipos	Para N > 5 x 10^6			Para N < 5 x 10^6			Tolerâncias da faixa de projeto
Peneiras	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	±7
I"	-	75-90	100	100	100	100	±7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	±7
N° 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	±5
N° 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
N° 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	±2
N° 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	±2

Fonte: Manual de Pavimentação do DNIT (2006).

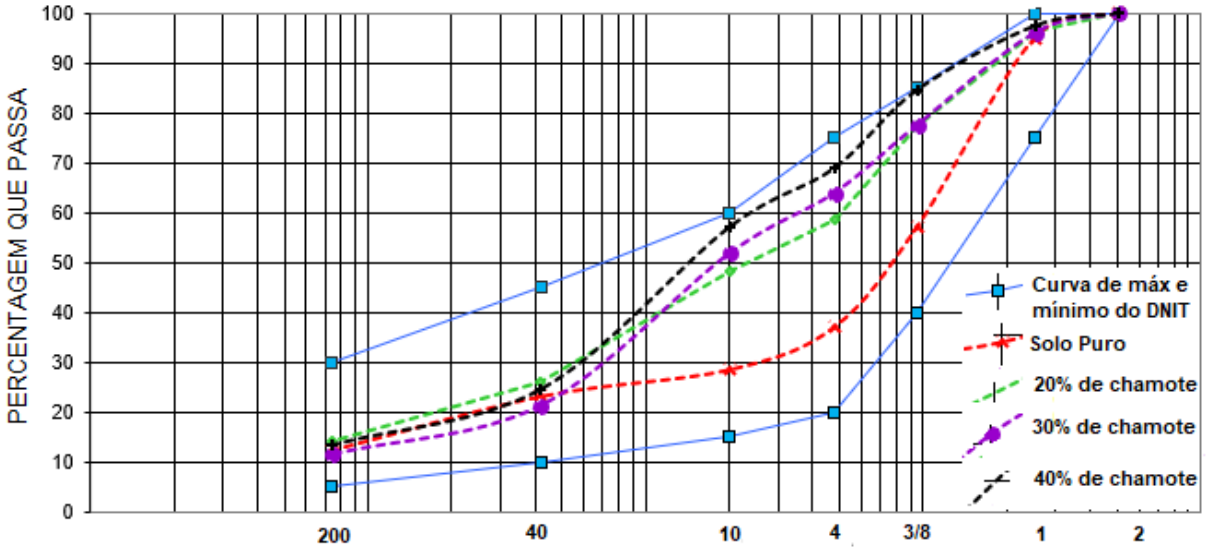
As proporções que estiveram com os resultados dentro desses padrões, foram comparadas com os resultados da amostra contendo 100% de solo laterítico, verificando, também, se essa amostra estava dentro dos requisitos que o Manual do DNIT (2006) explicita. Essa comparação foi feita para determinar as proporções da mistura solo-chamote com melhores ou piores características, quando confrontadas com as do agregado convencional (solo laterítico). A porcentagem solo-chamote mais adequada para ser utilizada na base e sub-base de pavimento, foi a que atendeu todas as especificações que o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) determina, como mais de uma proporção atendeu aos requisitos impostos, a escolhida foi a de maior ISC.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 GRANULOMETRIA, LIMITE DE LIQUIDEZ E DE PLASTICIDADE

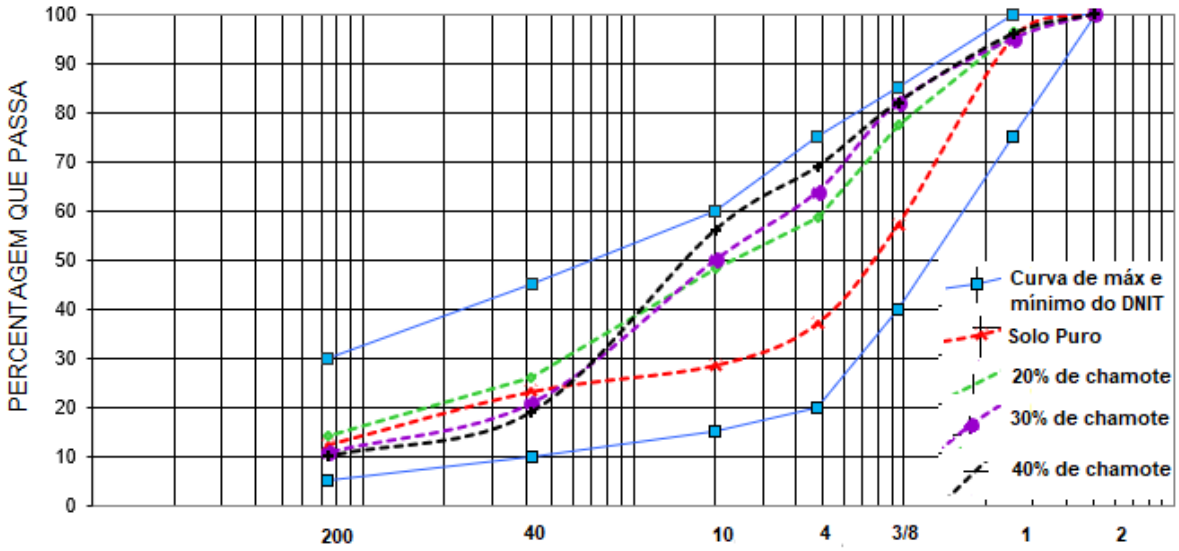
O Gráfico 2 apresenta os resultados do ensaio granulométrico com os materiais estudados para a camada de base e o Gráfico 3 apresenta os resultados dos materiais estudados para a camada de sub-base, onde as curvas em azul representam os limites granulométricos máximos e mínimos aceitos pelo Manual de Pavimentação do DNIT (2006), a curva máxima representa a faixa “F” prevista no manual e a curva mínima representa a faixa “A” para que o solo possa ser usado em camadas de base e sub-base. Não obstante, em vermelho apresenta a curva granulométrica do solo puro, em verde o solo após receber 20% de chamote cerâmico, a curva roxa o material com 30% de resíduo cerâmico e a preta o solo com 40% de chamote.

Gráfico 2- Granulometria dos materiais ensaios para a camada de base.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Gráfico 3- Granulometria dos materiais ensaios para a camada de sub-base.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O solo utilizado no estudo se encaixou entre as curvas de máximo e mínimo prevista no manual, assim como todos os materiais após receberem os chamotes cerâmicos permaneceram aceitáveis de acordo com o DNIT (2006).

- Solo laterítico puro

A partir dos Gráficos 2 e 3 pode-se concluir que o material se enquadra na faixa B do DNIT e poderá ser utilizado em rodovias com alto volume de tráfego e de acordo com a classificação TRB, tradicionalmente utilizada no meio rodoviário, trata-se de um material A-1-a, onde predominam pedra britada e pedregulho e areia, tendo um comportamento geral de excelente a bom para a pavimentação.

Durante o ensaio de LL o solo apresentou-se não líquido e não plástico.

- Mistura de 80% de solo laterítico e 20% de chamote britado

A partir dos Gráficos 2 e 3 pode-se concluir que o material se enquadra na faixa B do DNIT e poderá ser utilizado em rodovias com alto volume de tráfego e de acordo com a classificação TRB, a amostra com resíduo permaneceu classificada em A-1-a, onde predominam pedra britada e pedregulho e areia, tendo um comportamento geral de excelente a bom para a pavimentação.

Durante o ensaio de LL e LP a mistura também se apresentou nos estados não líquida e não plástica.

- Mistura de 70% de solo laterítico e 30% de chamote britado

.

A partir dos Gráficos 2 e 3 pode-se concluir que o material se enquadra na faixa C do DNIT e poderá ser utilizado em rodovias com alto volume de tráfego e de acordo com a classificação TRB, a amostra com 30% de resíduo passou a ser classificada em A-1-b, onde ainda predominam pedra britada e pedregulho e areia, tendo um comportamento geral de excelente a bom para a pavimentação. Durante o ensaio de LL e LP, a mistura, nessa proporção, também se apresentou não líquida e não plástica.

- Mistura de 60% de solo laterítico e 40% de chamote britado

A partir dos Gráficos 2 e 3 pode-se concluir que o material se enquadra na faixa D do DNIT e só poderá ser utilizado em rodovias com baixo volume de tráfego- e de acordo com a classificação da TRB após receber 40% de resíduo o material passou a ser classificada em A-1-b, onde ainda predominam pedra britada e pedregulho e areia, tendo um comportamento geral de excelente a bom para a pavimentação. Durante o ensaio de LL e LP a mistura nessa proporção também se apresentou não líquida e não plástica.

4.2 ENSAIO DO EQUIVALENTE DE AREIA

No Quadro 7 tem-se os resultados do ensaio para o solo puro e para as misturas com chamote cerâmico.

Quadro 7 - Resultados do ensaio do Equivalente de Areia.

Material			Equivalente de Areia (%)
BASE	Solo Puro		30,5
	80% solo e 20% chamote	CP - 1	44,2
		CP - 2	40,0
		CP - 3	37,9
		CP - 4	41,7
		CP - 5	37,3
	70% solo e 30% chamote	CP - 1	49,1
		CP - 2	39,3
		CP - 3	47,9
		CP - 4	54,0
		CP - 5	42,5
	60% solo e 40% chamote	CP - 1	65,1
		CP - 2	57,8
		CP - 3	61,1
		CP - 4	54,5
		CP - 5	60,6
SUB-BASE	Solo Puro		30,5
	80% solo e 20% chamote	CP - 1	42,9
		CP - 2	44,4
		CP - 3	42,3
		CP - 4	37,6
		CP - 5	43,1
	70% solo e 30% chamote	CP - 1	42,6
		CP - 2	40,0
		CP - 3	52,4
		CP - 4	53,8
		CP - 5	43,5
	60% solo e 40% chamote	CP - 1	58,7
		CP - 2	61,6
		CP - 3	64,3
		CP - 4	47,0
		CP - 5	57,6

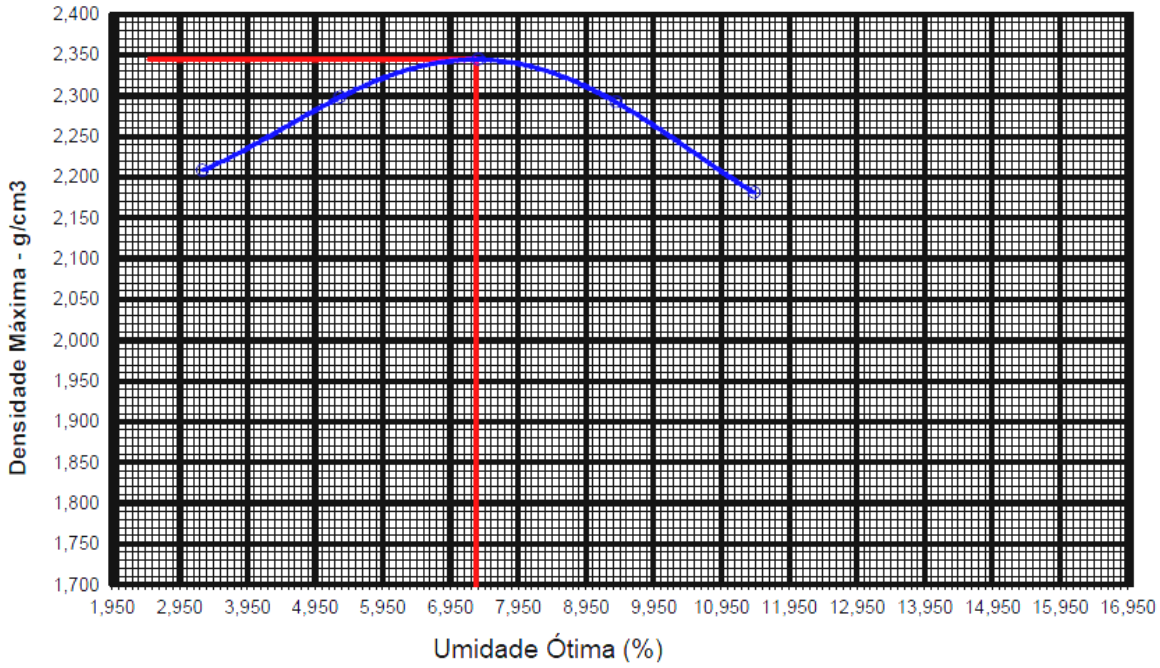
Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da análise dos resultados se observa que o acréscimo de chamote cerâmico fez aumentar a percentagem do equivalente de areia, diminuindo a quantidade de finos e impurezas da amostra, aumentando a qualidade do material e permanecendo nos valores aceitáveis pelo Manual de Pavimentação do DNIT (2006).

4.3 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação seguindo a norma DNIT 098/2007 a energia de compactação utilizada para camada de base foi a intermediária aplicando em cada camada do corpo de prova 55 golpes e para camada de sub-base 26 golpes conforme preconiza a norma DNIT 139/2013-ME. O Quadro 8 a seguir mostra os resultados obtidos durante o ensaio e o Gráfico 4 a curva obtida durante o ensaio com o solo laterítico.

Gráfico 4 - Solo laterítico puro.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro 8 - Resultados do ensaio de Compactação.

Material			Umidade Ótima (%)	Peso específico aparente seco (kgf/cm³)
BASE	Solo Puro		7,3	2,334
	80% solo e 20% chamote	CP - 1	10,8	2,113
		CP - 2	10,0	2,126
		CP - 3	11,4	2,112
		CP - 4	10,7	2,122
		CP - 5	10,3	2,103
	70% solo e 30% chamote	CP - 1	10,4	2,059
		CP - 2	10,6	2,055
		CP - 3	11,1	2,013
		CP - 4	11,4	2,023
		CP - 5	11,0	2,034
	60% solo e 40% chamote	CP - 1	13,8	1,945
		CP - 2	12,8	1,933
		CP - 3	12,5	1,942
		CP - 4	10,8	1,953
		CP - 5	12,4	1,945
SUB-BASE	Solo Puro		7,3	2,334
	80% solo e 20% chamote	CP - 1	10,9	2,070
		CP - 2	10,7	2,069
		CP - 3	11,4	2,023
		CP - 4	10,9	2,067
		CP - 5	10,4	2,059
	70% solo e 30% chamote	CP - 1	11,4	1,995
		CP - 2	12,6	1,975
		CP - 3	12,1	2,002
		CP - 4	11,9	1,945
		CP - 5	11,1	1,992
	60% solo e 40% chamote	CP - 1	14,3	1,901
		CP - 2	15,7	1,864
		CP - 3	14,1	1,884
		CP - 4	14,6	1,901
		CP - 5	14,7	1,888

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pela análise dos resultado do Quadro é possível observar que o acréscimo dos resíduos no solo influencia na umidade ótima apresentada pelo material, aumentando em até 89% dependendo da quantidade de chamote associado a mistura. Já a diminuição do valor do peso específico aparente seco é justificado pelo poder de retenção de líquidos que os resíduos cerâmicos possuem. A influência do aumento da umidade na resistência do material será observada no ensaio do ISC.

4.4 ENSAIO DO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

O ensaio do ISC foi realizado segundo a norma DNIT 172/2016-ME e foi feito para solo puro e para as misturas contendo 20%, 30% e 40% de chamote cerâmico. O Quadro 9 a seguir mostra os resultados obtidos durante o ensaio do ISC de resistência a penetração e a expansão.

Quadro 9 - Resultados do ISC e da Expansão.

Material			ISC (%)	Expansão (%)
BASE	Solo Puro		89,0	0,00
	80% solo e 20% chamote	CP - 1	88,0	0,00
		CP - 2	122,0	0,00
		CP - 3	131,0	0,00
		CP - 4	94,0	0,00
		CP - 5	109,0	0,00
	70% solo e 30% chamote	CP - 1	83,0	0,00
		CP - 2	94,0	0,00
		CP - 3	113,0	0,00
		CP - 4	87,0	0,00
		CP - 5	90,0	0,00
	60% solo e 40% chamote	CP - 1	54,0	0,00
		CP - 2	72,0	0,00
		CP - 3	74,0	0,00
		CP - 4	64,0	0,00
		CP - 5	66,0	0,00
SUB-BASE	Solo Puro		89,0	0,00
	80% solo e 20% chamote	CP - 1	73,0	0,00
		CP - 2	98,0	0,00
		CP - 3	81,0	0,00
		CP - 4	72,0	0,00
		CP - 5	86,0	0,00
	70% solo e 30% chamote	CP - 1	50,0	0,00
		CP - 2	60,0	0,00
		CP - 3	60,0	0,00
		CP - 4	43,0	0,00
		CP - 5	52,0	0,00
	60% solo e 40% chamote	CP - 1	36,0	0,00
		CP - 2	35,0	0,00
		CP - 3	32,0	0,00
		CP - 4	39,0	0,00
		CP - 5	36,0	0,00

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da análise dos resultados do Quadro é possível observar que o acréscimo dos resíduos no solo influencia na resistência a penetração do material diminuindo em até 39% nos materiais ensaiados para a base. A diminuição do valor do ISC nas proporções de 20% e 30% de chamote na mistura não compromete o seu uso em camadas de base do pavimento pois permaneceram com valores acima de 80%. Já para camada de sub-base, todas as misturas estão aptas a serem usadas pois obtiveram valor acima de 20%. O valor da expansão, por sua vez, não obteve mudança, o que comprova ser um material estável na presença de água, o que pode ser explicado pelo fato do chamote ser um resíduo cerâmico gerado após a queima, ocasião em que o procedimento muda as propriedades da argila e a faz se tornar estável.

4.5 ÍNDICE DE PLASTICIDADE E ÍNDICE DE GRUPO

Tanto o solo laterítico como as misturas em todas as proporções se apresentaram não líquidas e não plásticas, ou seja, os valores de LL e LP foram iguais a zero, dessa forma como o IP é uma subtração entres esses dois valores conclui-se que o valor de IP = 0 do solo e de todas as misturas.

Os valores do LP e do IP são utilizados para a definição do IG, como já mencionado esses valores tanto para o solo como para as misturas são nulos, assim o IG encontrado também é igual a zero conforme ilustra a Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados do Cálculo do IG.

MATERIAIS ENSAIADOS	% QUE PASSA NA PENEIRA Nº 200	LL	LP	IP	a	b	c	d	IG
Solo Puro	12,5	0	0	0	0	0	0	0	0
20% Chamote - 80% Solo	13,3	0	0	0	0	0	0	0	0
30% Chamote - 70% Solo	11,2	0	0	0	0	0	0	0	0
40% Chamote - 60% Solo	10,1	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o IG = 0 para todos os materiais, o solo e as misturas possuem uma ótima capacidade de suporte tornando-se aptos a serem utilizados nas camadas de sub-base.

4.6 DISCUSSÃO DA ANÁLISE DOS DADOS

A partir dos resultados apresentados e reunidos no Quadro 10 considerando a aceitabilidade dos materiais, levando em consideração as exigências apresentadas pelo Manual de Pavimentação do DNIT (2006), é possível utilizar com segurança 30% de chamote cerâmico associado ao solo laterítico em camadas de base e 40% de chamote cerâmico em camadas de sub-base, mas a proporção de 20% foi a que apresentou os melhores resultados.

Quadro 10 – Resumo da análise de aceitabilidade dos materiais.

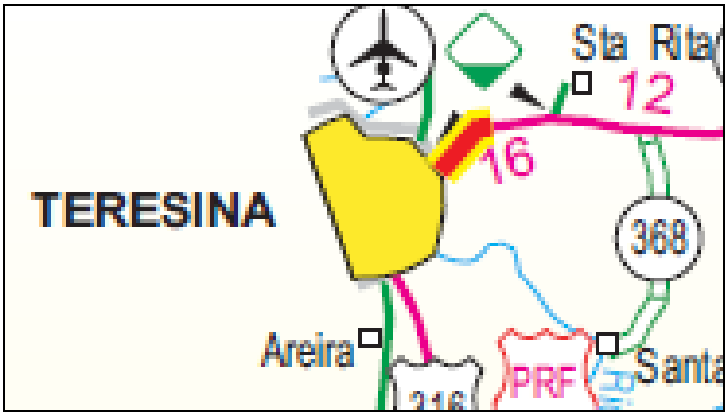
CAMADA	CARACTERÍSTICAS EXIGIDAS PELO MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO DO DNIT	RESULTADOS APRESENTADOS PELO ESTUDO			
		SOLO PURO	20% CHAMOTE	30% CHAMOTE	40% CHAMOTE
Sub-base	Granulometria	✓	✓	✓	✓
	ISC ≥ 20%	✓	✓	✓	✓
	IG = 0	✓	✓	✓	✓
Base	Granulometria	✓	✓	✓	✓
	LL ≤ 25%	✓	✓	✓	✓
	IP ≤ 6%	✓	✓	✓	✓
	Equivalente de areia ≥ 30%	✓	✓	✓	✓
	ISC ≥ 80%	✓	✓	✓	✗

Fonte: Elaborada pelo autor.

Caso as misturas com 30% de chamote e 40% de chamote fossem aplicadas respectivamente nas camada de base e sub-base da obra de duplicação da BR-343, mesma obra que forneceu o solo lateritico utilizado no estudo, trecho com 9,33 km de extensão ilustrada pelo trecho vermelho da Figura 21, conforme projeto fornecido pelo Departamento de Estradas e Rodagem do Piauí (DER-PI), onde prevê uma camada de base com 0.15m de espessura e camada de sub-base também com 0.15 m de espessura, conforme elucida a Figura 22, para a sub-base são necessários 38.997,42 m³ de material e para a base 37.846,92 m³ de material, seriam poupados

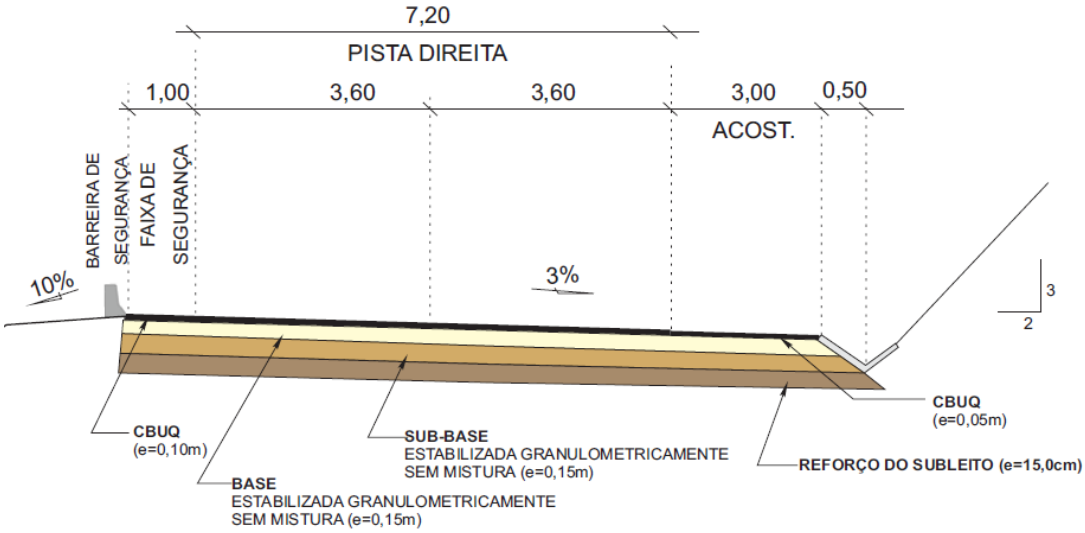
de exploração 26.953,043 m³ de solo laterítico.

Figura 21 – Trecho em duplicação da BR-343.



Fonte: DER-PI (2013).

Figura 22 – Seção transversal da pista direita.



Fonte: DER-PI (2013).

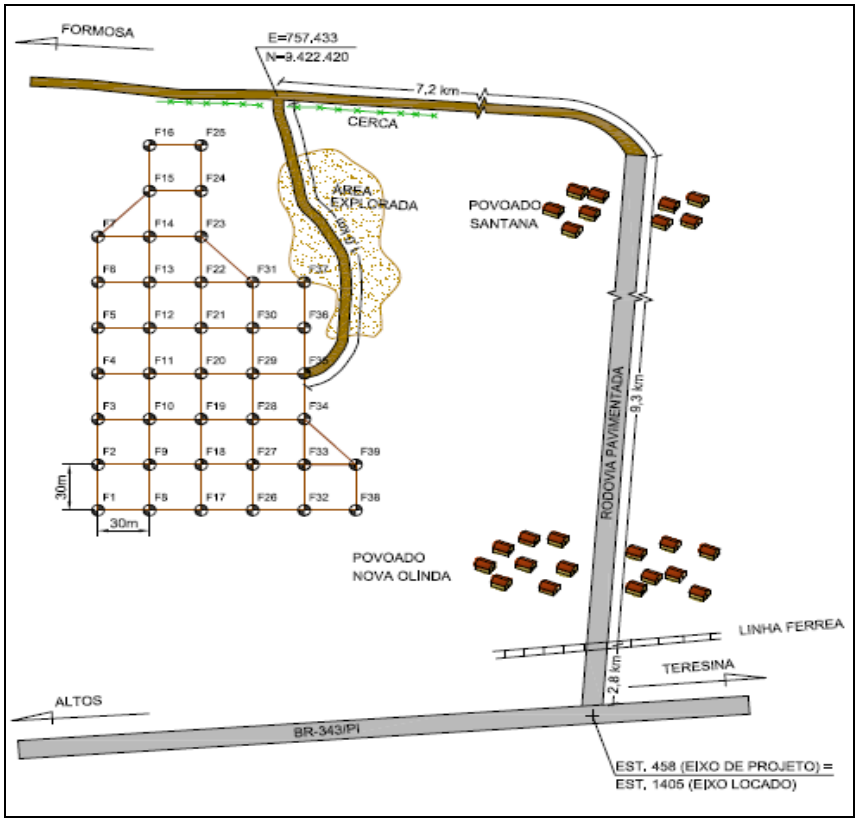
O custo relacionado a execução das camadas de pavimentação não está relacionado apenas a aquisição do material, mas também ao seu transporte. Dessa forma a distância a ser percorrida do local de exploração até a aplicação deve ser minimizada, barateando a execução das camadas, por isso além de apresentar características técnicas aceitáveis o chamote cerâmico deve possuir uma distância de transporte compatível com a da obra, para que o custo seja pelo menos equivalente e não encareça a execução da via.

De acordo com DER (2013) os materiais para execução das camadas

poderiam ser retirados de três jazidas a mais próxima fica a 600 m do eixo da rodovia e a mais distante representada pelo croqui da Figura 23, está localizada a 20.3 km do eixo da rodovia. Ainda segundo DER (2013) a Distância Média de Transporte (DMT) dos matérias de base variam de 0.96 a 14.54 km e para os materiais de sub-base de 7.33 a 16.58 km, dessa forma para os resíduos cerâmicos serem economicamente viáveis a distância de transporte deve ser compatível.

A partir de uma pesquisa na cidade de Teresina pode-se mensurar a distância das indústrias cerâmicas mais próximas do trecho previsto no projeto, a duas mais próximas ficam a 6 e 11.5 km do início do trecho, tornando-se viáveis para utilização no caso específico da obra de duplicação da BR-343 nas proximidades da capital do estado do Piauí.

Figura 23 – Croqui da localização de jazida.



Fonte: DER-PI (2013).

5 CONCLUSÃO

O aumento da utilização de materiais alternativos na construção de pavimentos, vem ganhando grande atenção dos setores acadêmicos e industriais, apresentando um bom desempenho estrutural, potencial economia e redução de emissões de gases de efeito estufa em várias fases da vida útil do pavimento. Dois materiais estudados atualmente são: a escória de alto-forno e as cinzas volantes (JAMSHIDI et al., 2017).

Outro exemplo de material alternativo é o chamote cerâmico associado ao solo laterítico e as análises feitas permitiram aferir positivamente sobre a mistura, pois de acordo com as normas específicas do Manual de Pavimentação do DNIT (2006), para um solo ser utilizado na camada de sub-base o ISC deve ser igual ou superior a 20% e IG = O. Já para a camada de base o material deverá apresentar LL máximo de 25%, IP máximo de 6%, Equivalente de Areia maior que 30%, apresentar o ISC maior ou igual a 80%, expansão máxima deverá ser 0.5% e a granulometria deverá estar enquadrada em uma das faixas especificadas pelo manual. Ainda é possível na camada de base utilizar material com ISC até 60%, quando economicamente justificado.

Dessa forma, todas as misturas estão aptas a serem utilizadas na camada de sub-base pois apresentaram ISC superior a 20% e IG = 0, sendo a proporção que recebeu 20% em peso de chamote cerâmico a que apresentou maior resistência e mostra-se mais adequada. Para a camada de base as misturas que receberam 20% e 30% de chamote cerâmico se mostraram potencialmente adequadas para o uso em camadas de base, pois atenderam a todos os requisitos do manual para essa utilização, mostrando-se totalmente viáveis. Assim como para camada de sub-base a proporção que apresentou maior resistência foi a mistura que recebeu 20% de chamote cerâmico.

Ressaltando que existem grandes quantidades de resíduos prontos para serem exploradas nos pátios das industrias cerâmicas e o uso do chamote evitaria impactos ambientais negativos, pois traria um novo material aparentemente sem uso e reduziria a exploração de jazidas para fornecimento de materiais para execução de base e sub-base de pavimentos, agregando um novo material as obras rodoviárias.

Além da diminuição do impacto ambiental, o custo de aquisição desses resíduos cerâmicos pode ser inferior ao de exploração de jazidas o que poderia

acarretar ainda na redução dos custos das obras de pavimentação rodoviária, melhorando assim tanto o setor econômico como o setor ambiental e os materiais ainda permaneceriam dentro dos critérios exigidos pelo manual.

A observar apenas o DMT, tornando propicio a utilização dos resíduos apenas em obras nas proximidades de industrias cerâmicas, o que se adequaria a execução de vias nos centros urbanos que apresentam escarces de jazidas de materiais com boa capacidade de suporte e industrias cerâmicas instaladas nas proximidades.

Como sugestão para complementação à pesquisa em trabalhos futuros utilizando o resíduo cerâmico proveniente de descarte, devido à falha de processo produtivo das indústrias ceramistas, sugere-se:

- Quantificação das perdas no processo de fabricação dos produtos cerâmicos na região da grande Teresina, a fim de quantizar a perda real e assim, a demanda do material descartado, para posterior planejamento na utilização e gestão desses resíduos.
- Analisar a viabilidade econômica da utilização dos resíduos cerâmicos nas camadas de base e sub-base em substituição parcial do solo laterítico em pavimentos asfálticos.
- Acompanhamento e execução de um trecho experimental de pavimento, utilizando a mistura solo-chamote, com as proporções estudadas nesta pesquisa, para a avaliação das misturas em condições reais de solicitação, em virtude de que as condições de laboratório nem sempre conseguem reproduzi-las.
- Simular umidades diversas na mistura solo-chamote, utilizado em faixa granulométrica de agregado graúdo, e suas condições de saturação, a fim de observar a influência dos teores de umidade na compactação de misturas solo-resíduo.

REFERÊNCIAS

ANICER - **Associação Nacional da Indústria de Cerâmica**. Disponível em <https://www.anicer.com.br/index.asp?pg=institucional_direita.asp&secao=6&ex=2.> Acessado em 28 mai. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2005) **NBR 9935/2005 – Agregados - Terminologia**. Rio de Janeiro, RJ.

AMORIM, E. F. (2013). **Viabilidade Técnica Econômica de Misturas de Solo-RCD em Camadas de Base de Pavimentos Urbanos. Estudo de Caso: Município de Campo Verde - MT.** Tese de Doutorado, Publicação G.TD-090/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 151 p

BRASIL. **Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Publicada no D.O.U. em 03/08/2010. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm> Acesso em 23 de março de 2017.

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

BATALIONE, G. **Estabilização de solos tropicais com a utilização de rejeitos finos de pedreira de uma rocha granítica**. 2007, 172 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

BERNUCCI, L. B.; LEITE, F. C.; MOTTA, R. S. **Pavimento Ecológico**. Revista Téchne. São Paulo, 2007.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro. Abeda, 2008.

BRASILEIRO, L. L. (2013**). Utilização de Agregados Reciclados Provenientes de RCD em Substituição ao Agregado Natural do Concreto Asfáltico.** Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2013.

CABRAL, A. E. B., SCHALCH V., DAL MOLIN D. C. C., Ribeiro J. L. D., RAVINDRARAJAH R. S. **Ultimate shrinkage modeling of recycled aggregate concrete**, Int. Conf. Eng. Environment, Phuket, 2009.

CARDOSO, A. C. F.; GALATTO, S. L.; GUADAGNIN, M. R. **Estimativa de Geração de Resíduos da Construção Civil e Estudo de Viabilidade de Usina de Triagem e Reciclagem.** Revista Brasileira de Ciências Ambientais, n. 31, 2014.

CHEN, J. J., CHAMBERS, D. **Sustainability and the impact of Chinese policy initiatives up on construction**. J. Construction Management and Economics, 17, 679-687, 1999.

CNT. **Revista Transporte Atual**. Brasília, ano XXIV, número 274, 2018.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Brasília. 1986**. Resolução CONAMA nº 001, de 23 de janeiro de 1986 - Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental.** Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=23. Acesso em 15/03/17.

CRISTO, F. I. de et al. **Parâmetros operacionais para implantação de uma recicladora de resíduos da construção civil.** CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS, 2014, Natal. Anais eletrônicos... Natal: Associação Brasileira de Custos, 2014. 16 p.

DEPARTAMENTO ESTADUAL DE ESTRADAS E RODAGENS DO PIAUÍ- DER-PI (2013). **Projeto básico de engenharia de adequação, duplicação, melhoramento e restauração da rodovia BR-343/PI, km 331,53 - km 341,20.** Teresina, PI.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS – DNER **-** ME 080/1994. **Solo – Análise granulométrica por peneiramento.** Rio de Janeiro, RJ.

_____ (1994) **DNER-ME 122/1994 – Solo – Determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito.** Rio de Janeiro, RJ.

_____ (1997) **DNER-ME 054/1997 – Solo – Equivalente de Areia.** Rio de Janeiro, RJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2006) **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, RJ.

_____ (2007) **DNIT 098/2007 – Pavimentação – base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, RJ.

_____ (2010) **DNIT 139/2010 – Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, RJ.

_____ (2013) **DNIT 164/2013 – Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio– Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, RJ.

_____ (2016) **DNIT 172/2016 – Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia – Método de Ensaio– Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, RJ.

DIAS, L. L.; MENEGAZZO, A. P. M.; QUINTEIRO, E.; SERAFIM, M. A. **Desenvolvimento de um novo produto cerâmico para pavimentação de passeios e áreas públicas**. Ambiente Construído, Porto Alegre, V. 16, n. 4, p. 155 - 165, out./dez. 2016.

DIAS, D. K. R. **Reutilização do resíduo cerâmico oriundo do polo oleiro de Iranduba e Manacapuru para emprego como elemento constituinte de base e sub-base de pavimento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa

de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Recycled materials in European highway environments: uses, technologies and policies**. Federal Highway Administration. Washington, 2000. Disponível em:< https://www.fhwa.dot.gov/>. Acesso em: 18 nov. 2018.

GARCIA, E.; CABRAL JUNIOR, M.; QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F. **Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo**. Cerâmica V.61, n.358, 2015.

HORTEGAL, M. V.; FERREIRA, T. C.; SANT'ANA, W. C. **Utilização de agregados resíduos sólidos da construção civil para pavimentação em São Luís, MA.** Revista Pesquisa em Foco, v. 17, n. 2, p. 60-74, 2009.

Huang, Y., Bird, R. N., Heidrich, O. **A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements**. Resources, Conservation and Recycling, 52, 58-73, 2007.

INSTITUTE PUBLIC WORKS ENGINEERING AUSTRALIA – NSW DIVISION. **Specifications for Supply of Recycled Material for Pavements, Earthworks and Drainage**. Institute Public Works Engineering Australia – NSW Division, 2010.

JAMSHIDI, A.; KURUMISAWA, K.; TOYOHARU, N.; JIZE, M.; WHITE, G.; **Performance of pavements incorporating industrial by products: A state-of-the-art study.** Journal of Cleaner Production. n.164, p. 367-388, 2017.

KHALAF, F. M. **Recycling of clay bricks as aggregate in asphalt concrete**. International Rillen Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, 2004, Barcelona.

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

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Anuário Estatístico de Transportes 2010 – 2016**, Brasília, 2016.

MIRANDA, L. F. R. et al. (2009). **A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. Revista Ambiente Construído.** Porto Alegre. v.9, n.1, p.51-71. jan/mar, 2009.

MENEZES, R.R., DE ALMEIDA, R.R., SANTANA, L.L., FERREIRA, H.S., NEVES, G.A., FERREIRA, H.C**. Utilização do Resíduo do Beneficiamento do Caulim na Produção de Blocos e Telhas Cerâmicos.** Revista Matéria, v. 12, n. 1, p. 225 – 235, 2007.

POERSCHKE, N. **Determinação do equivalente de areia.** Boa Vista, RR, 2016.

POSSA, A. S., ANTUNES, E. G. P. **Proposta de reutilização do resíduo de cerâmica vermelha proveniente da construção civil e demolições no município de criciúma, SC.** Revista Tecnologia e Ambiente, v. 22, 2016.

REDIVO, I. M**. Utilização de resíduo de cerâmica vermelha em misturas com solo para construção de camadas de pavimentos com baixo volume de tráfego.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Infraestrutura e Gerência Viária, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

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.

SILVEIRA, L. R., BORGES, R. A. **Uso de Materiais Alternativos para Melhoria de Solo na Pavimentação de Vias**. Engineering and Science v. 1, n. 5 (2016).

SANTOS, J. A. **Compactação – Elementos Teóricos.** Trabalho de Mestrado em Engenharia Civil (Instituto Superior Técnico – Departamento de Engenharia e Civil e Arquitetura), 2008.

SENÇO, W. de. Manual de Técnicas de Pavimentação. Vol. 2. São Paulo: PINI, 2011.

SU, N., CHEN, J. S. **Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass. Resources, Conservation and Recycling**, 35, 259-274, 2002.

VIEIRA, C. M. F.; SOUZA, E. T. A.; MONTEIRO, S. N**.. Efeito da incorporação de chamote no processamento e microestrutura de cerâmica vermelha**. Cerâmica . vol.50, n.315, pp. 254-260, 2004.

Zhu, J., Wu, S., Wang, J. Z. D. **Investigation of asphalt mixture containing demolition waste obtained from earthquake-damaged buildings. Construction and Building Materials**, 29, 466-475, 2012.