

CENTRO UNIVERSITÁRIO BRASILEIRO - UNIBRA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LUCAS RAMIS FERREIRA BERNARDINO

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DO AGREGADO LATERÍTICO EM  
MISTURAS ASFÁLTICAS**

RECIFE

2023

LUCAS RAMIS FERREIRA BERNARDINO

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DO AGREGADO LATERÍTICO EM  
MISTURAS ASFÁLTICAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Disciplina TCC II do Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Brasileiro - UNIBRA, como parte dos requisitos para conclusão do curso.

Orientador (a): Prof.<sup>a</sup> Dra. Carolina de Lima França  
Coorientador (a): Prof. Me. Robson Barros Araújo

RECIFE

2023

Ficha catalográfica elaborada pela  
bibliotecária: Dayane Apolinário, CRB4- 2338/ O.

B523e Bernardino, Lucas Ramis Ferreira.  
Estudo da viabilidade técnica do uso do agregado laterítico em misturas  
asfálticas / Lucas Ramis Ferreira Bernardino. - Recife: O Autor, 2023.  
41 p.

Orientador(a): Dra. Carolina de Lima França.  
Coorientador (a): Me. Robson Barros Araújo.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro Universitário  
Brasileiro - UNIBRA. Bacharelado em Engenharia Civil, 2023.

Inclui Referências.

1. Misturas asfálticas. 2. Agregados. 3. Concreções lateríticas. 4.  
Ligante asfáltico. I. Centro Universitário Brasileiro. - UNIBRA. II. Título.

CDU: 624

Ao Meu Deus, que dá propósito à minha vida,  
Soli Deo gloria!  
E a minha mãe que sempre esteve orando pelo  
meu bem e trabalhando para o meu crescimento.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, de quem provém todas as boas dádivas e que em sua eterna sabedoria me deu a oportunidade de glorificá-lo através da Engenharia civil.

À minha mãe, um exemplo de abnegação e que me ensinou a lutar a favor das pessoas que ama (muitas vezes sozinha), apesar de não ter tido oportunidade de estudar na juventude, nunca deixou de me apoiar em meus estudos, mesmo quando eu quis desistir, te amo!

À minha orientadora, professora Carolina, pela paciência em responder minhas dúvidas, muitas bem redundantes, pelo direcionamento e os conhecimentos transmitidos e que me mostrou o tipo de professor que inspira outros a seguirem esta profissão.

Ao meu coorientador, professor Robson, pelos valiosos conselhos sobre os rumos do trabalho e na delimitação do tema, por ter participado ativamente na realização dos ensaios e na obtenção dos materiais, obrigado pela paciência e tempo dedicado.

Aos meus amigos que me apoiaram em todo este percurso, quando eu me sentia desmotivado, ou percebendo quando eu não estava bem, mesmo não demonstrando, vocês foram verdadeiros terapeutas.

Aos professores do curso de Engenharia civil da UNIBRA que eu tive a oportunidade de aprender, pelos conhecimentos transmitidos nesta jornada, alguns saíram, mas os frutos do seu trabalho permanecem conosco.

Aos meus colegas de trabalho, pelo enorme incentivo que me deram.

A todos que fizeram parte desta jornada, direta ou indiretamente, orando ou aconselhando.

Estas poucas palavras não expressam tudo que eu gostaria de dizer, vocês são poucos, mas significam muito.

Obrigado!

## RESUMO

O custo da execução de pavimentos é diretamente influenciado pela disponibilidade dos materiais necessários para sua execução. A escassez de jazidas de rochas graníticas em diversas regiões do Brasil, como a região norte, estimula o estudo de materiais alternativos encontrados nessas regiões. As concreções lateríticas surgem como uma alternativa de agregado graúdo pelo fato de advirem de um tipo de solo que existe em abundância em território brasileiro e em regiões tropicais de maneira geral. Este trabalho teve por objetivo estudar a viabilidade técnica do uso do agregado laterítico em misturas asfálticas. Para isto, foram realizados ensaios de caracterização na laterita proveniente da jazida localizada no município Barrolândia – TO. Os resultados nos ensaios demonstraram que a laterita estudada possui boa resistência ao desgaste mecânico, porém porosidade elevada, além de ter demonstrado adesividade ao ligante asfáltico insatisfatória. Apesar da alta porosidade apresentada pela laterita, esta ainda se mostra como uma alternativa viável de agregado graúdo para misturas asfálticas, já que seus problemas relacionados à porosidade e adesividade podem ser contornados com o aumento do teor de ligante, além do uso de dope para melhorar a adesividade ao ligante. De uma forma geral, o agregado laterítico se mostra uma alternativa viável para uso em misturas asfálticas.

Palavras-chave: misturas asfálticas; agregados; concreções lateríticas; ligante asfáltico.

## **ABSTRACT**

The cost of executing pavements is directly influenced by the availability of the necessary materials for their execution. The scarcity of granite rock quarries in various regions of Brazil, such as the northern region, stimulates the study of alternative materials found in these regions. Lateritic concretions emerge as an alternative to coarse aggregate because they come from a type of soil that exists in abundance in Brazilian territory and in tropical regions in general. This work aimed to study the technical feasibility of using lateritic aggregate in asphalt mixtures. For this, characterization tests were carried out on the laterite from the quarry located in the municipality of Barrolândia - TO. The results in the tests showed that the studied laterite has good resistance to mechanical wear, but high porosity, in addition to having shown unsatisfactory adhesiveness to the asphalt binder. Despite the high porosity presented by the laterite, it still shows itself as a viable alternative of coarse aggregate for asphalt mixtures, since its problems related to porosity and adhesiveness can be circumvented with the increase of the binder content, in addition to the use of dope to improve adhesiveness to the binder. In general, the lateritic aggregate proves to be a viable alternative for use in asphalt mixtures.

Keywords: asphalt mixtures; aggregates; laterite concretions; asphalt binder.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Densidade da malha rodoviária federal pavimentada por região do Brasil (km/mil km <sup>2</sup> )	17
Figura 2 - Mapa mundial mostrando as regiões de ocorrência de solos lateríticos	30
Figura 3 - Distribuição de solos lateríticos no Brasil: (a) solos Lateríticos; (b) latossolos Vermelho-Amarelos	31
Figura 4 - laterita britada utilizada	37
Figura 5 - ligante asfáltico utilizado	38
Figura 6 - agregado laterítico lavado depositado em estufa para secagem	39
Figura 7 - agregado secado superficialmente após ser removido do tanque	41
Figura 8 - agregado sendo pesado para determinação da massa do agregado seco	42
Figura 9 - Curva granulométrica das concreções lateríticas	46
Figura 10 - separação da amostra para o ensaio	48
Figura 11 - mistura do agregado com o ligante asfáltico	49
Figura 12 - Amostra após 72 horas com descolamento da película asfáltica	49



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades dos agregados lateríticos _____	36
Tabela 2 - Composição granulométrica das concreções lateríticas _____	45

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS E SÍMBOLOS

ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABPV	Associação Brasileira de Pavimentação
ADP	Asfaltos Diluídos de Petróleo
AIMS	Aggregate Imaging Measurement System
AMB	Asfalto Modificado por Borracha Moída de Pneu
AMP-E	Asfaltos Modificados por Polímeros Elastoméricos
ANP	Agência Nacional de Petróleo
ARE	Agentes de Reciclagem Emulsionados
ASAC	Agregados Sinterizados de Argila Calcinada
ASTM	American Association of State Highway and Transportation Officials
ATR	Afundamento de Trilha de Roda
BBTM	Béton Bitumineux Très Mince
BBUM	Béton Bitumineux Ultra-Mince
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CCP	Concreto de Cimento Portland
CM	Cura Média
CNT	Conselho Nacional de Transportes
CPA	Camada Porosa De Atrito
CR	Cura Rápida
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAP	Emulsão Asfálticas de Petróleo
EAP-E	Emulsões Asfálticas Catiônicas Modificadas por Polímeros Elastoméricos
EM	Especificação de material
ES	Especificação de Serviço
ESAL	Equivalent Single Axle Load
Gap-graded	Graduação Descontínua
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás
IMP	Ligante Asfáltico Modificado por Borracha Reciclada de Pneus
IPIPEN	Ligante Asfáltico Modificado por Asfaltita
LTDA	Limitada
MAM	Misturas Asfálticas Mornas
ME	Método de Ensaio
MR	Módulo de Resiliência
MRAF	Microrrevestimento Asfáltico
NBR	Norma Brasileira

NM	Norma Mercosul
PB	Paraíba
PE	Pernambuco
PMF	Pré-misturado A Frio
RT	Resistência à Tração
SMA	Stone Matrix Asphalt
TO	Tocantins
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
WMA	Warm Mix Asphalt

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b>	14
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	14
1.1 OBJETIVO GERAL	15
1.1.1 Objetivos específicos	15
<b>CAPÍTULO 2</b>	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	16
2.1. PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA	16
2.1.1 Definição e importância	16
2.1.2 Pavimentos asfálticos	18
2.1.3 Misturas asfálticas	19
2.1.3.1 Materiais constituintes	22
2.1.3.2 Utilização de agregados alternativos	26
2.2 AGREGADO LATERÍTICO	29
2.3 VIABILIDADE TÉCNICA DO AGREGADO LATERÍTICO PARA MISTURAS ASFÁLTICAS	32
<b>CAPÍTULO 3</b>	37
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	37
3.1 MATERIAIS	37
3.1.1 Agregado laterítico	37
3.1.2 Ligante asfáltico	37
3.2 MÉTODOS	38
3.2.1 Beneficiamento do agregado laterítico	38
3.2.2 Granulometria	39
3.2.3 Índice de forma	39
3.2.4 Massa específica e absorção	40
3.2.5 Adesividade	42
3.2.6 Abrasão Los Angeles	43
<b>CAPÍTULO 4</b>	44
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	44

4.1	GRANULOMETRIA	44
4.2	ÍNDICE DE FORMA	47
4.3	MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO	47
4.4	ADESIVIDADE	48
4.5	ABRASÃO LOS ANGELES	49
<b>CAPÍTULO 5</b>		<b>51</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>	<b>51</b>
5.1	CONCLUSÕES	51
5.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	52
<b>REFERÊNCIAS</b>		<b>53</b>

**1 INTRODUÇÃO**

A escassez de jazidas de rochas graníticas em determinadas regiões do Brasil influencia o custo da execução de pavimentos asfálticos em que se pretenda utilizar materiais provenientes dessas jazidas, tanto nas camadas de base e sub-base, como nas camadas de revestimento, como agregado. Como mencionado por Araújo (2009), a região norte e algumas partes da região nordeste do país são as mais afetadas por essa escassez, o que pode resultar em custos mais elevados para a obtenção desses materiais, principalmente em função da distância de transporte de jazidas distantes, que segundo Chagas Filho (2005) podem atingir distâncias de até 700 km da jazida até o canteiro de obras.

Uma alternativa viável para reduzir esse custo é a substituição do agregado graúdo convencional, como a brita oriunda de rochas graníticas, calcárias ou basálticas, pelas concreções lateríticas como agregado graúdo na camada de revestimento. Segundo Oliveira et al. (2011), o solo laterítico é característico de regiões de climas tropicais, onde há abundância de rochas lateríticas que podem ser britadas e utilizadas em sua forma particulada como agregado em substituição ao agregado granítico, sendo este solo abundante em grande parte do Brasil e principalmente na região norte. Para isso é necessário que sejam realizados estudos cuidadosos das características destes materiais e de suas condições de uso, sabendo que a adoção de novos materiais alternativos na cadeia produtiva é viável somente quando apoiada em um entendimento científico sólido e comprovado, podendo assim apresentar vantagens econômicas significativas.

Sendo assim, esses estudos podem gerar informações importantes a respeito da viabilidade e eficiência desses materiais como agregados em misturas asfálticas, considerando que os agregados, que formam o chamado esqueleto mineral da mistura asfáltica, são os principais responsáveis pelo seu desempenho mecânico e pela resistência a diversos tipos de danos, como o acúmulo de deformações permanentes e a fratura por fadiga, conforme mencionado por Cruz (2018). Desta forma será possível avaliar as possibilidades e limitações do uso das concreções lateríticas nesse contexto.

Poucos estudos sobre a utilização do agregado laterítico em misturas asfálticas foram publicados recentemente. Os estudos tidos como referências no assunto foram publicados na primeira década do século XXI, porém tendo apresentado resultados promissores, onde se vale destacar Amaral (2004) e Moizinho (2007) que encontraram valores de abrasão e adesividade ao ligante satisfatórios se comparado aos parâmetros estabelecidos em norma, que usam os agregados convencionais, como as pedras calcárias e principalmente as britas graníticas, como referência. Vale mencionar também os estudos com as concreções lateríticas voltados para produção de concreto de cimento Portland destinado às camadas de revestimento dos pavimentos rígidos, como os conduzidos pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em que Chagas

Filho (2005) e Araújo (2009) também encontraram valores de abrasão e adesividade ao ligante satisfatórios para os agregados lateríticos voltados para esse tipo de pavimento.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Procura-se, por meio deste trabalho, verificar a viabilidade técnica da utilização do agregado laterítico na produção de misturas asfálticas destinadas às camadas de revestimento de pavimentos asfálticos, em virtude da demanda de materiais alternativos em regiões de escassez de jazidas de rochas graníticas.

### 1.1.1 Objetivos específicos

- Definir a granulometria dos agregados lateríticos utilizados;
- Determinar o índice de forma dos agregados lateríticos utilizados;
- Identificar o potencial de absorção do agregado laterítico e a sua massa específica;
- Verificar a adesividade do agregado laterítico ao ligante asfáltico;
- Analisar a resistência à abrasão do agregado laterítico através do ensaio de Abrasão Los Angeles.

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo trata da revisão bibliográfica, foram reunidas informações em publicações nacionais e internacionais sobre assuntos pertinentes ao tema abordado. São descritas algumas generalidades que justificam o intuito deste trabalho, como questões relacionadas à pavimentação e às misturas asfálticas, além de ser descrito os materiais constituintes destas, a importância dos agregados em misturas e a escassez dos principais tipos de agregados utilizados em misturas asfálticas em diversas regiões do Brasil e do mundo. No final deste capítulo são descritos agregados alternativos aos convencionais e por último é apresentado o agregado laterítico, suas limitações de uso e trabalhos publicados que referenciam sua utilização em misturas asfálticas.

#### 2.1 PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA

##### 2.1.1 Definição e importância

Segundo Medina e Motta (2015), pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

Essa é a definição clássica atribuída aos pavimentos e que descreve a sua função básica e histórica, que, em resumo, é melhorar as estradas de terra, proporcionando-as proteção contra os efeitos das intempéries climáticas, prevenção contra o desprendimento de poeira e pedras, além de torná-las mais confortáveis, seguras e duradouras para o tráfego.

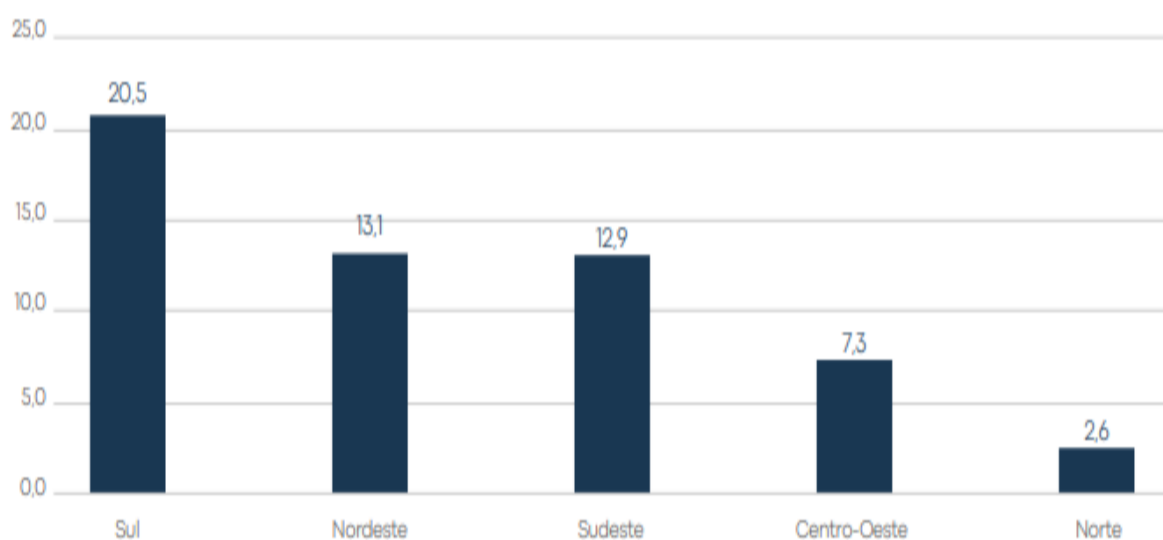
A pavimentação rodoviária tem impacto significativo na economia nacional, principalmente pelo fato de o modal rodoviário ser o meio de transporte de pessoas e cargas mais utilizado no Brasil. Segundo pesquisa do Conselho Nacional do Transporte - CNT (2022), no Brasil, cerca de 65% do transporte de cargas e 95% do transporte de passageiros é realizado pelo modal rodoviário. A pesquisa ainda revela que somente 12,4%, dos cerca de 1,7 milhões de km das rodovias brasileiras são pavimentadas, o que demonstra a necessidade de investimento nesse serviço, tendo em vista a demanda da sociedade por vias pavimentadas. Dentre os empecilhos mais citados para o baixo crescimento da malha rodoviária brasileira estão as frequentes instabilidades na economia nacional e destinação de verbas públicas insuficientes para o setor (CNT, 2022), verifica-se a partir daí a interdependência entre o crescimento do setor e a disposição das condições financeiras ideais.

A demanda social em torno do desenvolvimento do setor faz urgir a necessidade de investimento para a pavimentação de rodovias, sabendo-se também que a escassez



dos recursos financeiros disponíveis incentiva a racionalização dos orçamentos para a execução dessas rodovias. Um dado da pesquisa do CNT (2022) sobre a distribuição da malha rodoviária pelo território nacional aponta que há uma grande desigualdade entre as regiões nesse quesito, com a região norte tendo a menor densidade da malha rodoviária federal pavimentada, com cerca de 2,6 km/1.000 km<sup>2</sup>, comparando-se a região sul, que é a região com a maior densidade de malha rodoviária federal pavimentada, com seus 20,5 km/1.000 km<sup>2</sup>, fica clara a necessidade de investimento no setor não somente nessa região, mas em grande parte do Brasil, conforme apresentado na Figura 2.1. Diante deste cenário, ainda que seja feita a destinação de verbas para a execução deste serviço nas regiões mais carentes, torna-se necessário selecionar cuidadosamente os materiais, as técnicas de dimensionamento e de execução destas rodovias para que os recursos financeiros sejam utilizados da maneira mais eficiente e economicamente possível, principalmente em regiões que possuem escassez de materiais para a pavimentação, tornando necessária a seleção consciente de materiais disponíveis para se viabilizar técnica e economicamente a execução destes serviços.

Figura 1 - Densidade da malha rodoviária federal pavimentada por região do Brasil (km/mil km<sup>2</sup>)



Fonte: Pesquisa CNT de Rodovias (2022).

A viabilidade técnica e econômica da execução do pavimento está diretamente interligada com os materiais selecionados e o tipo de pavimento (Balbo, 2007). Os materiais empregados na pavimentação variaram durante a história, no passado, os revestimentos de estradas eram compostos por solos argilosos, porém, devido ao desgaste ocorrido durante as épocas chuvosas, passou-se a utilizar cascalho e saibro como camadas de revestimento, até que foram substituídos pelo uso de macadame ou pedra britada.

Atualmente há diversos tipos de materiais empregados na pavimentação que são selecionados em função de fatores como o tipo de pavimento que será executado, disponibilidade e qualidade dos materiais e, principalmente, o custo associado. O tipo de pavimento escolhido, que é um dos principais fatores para a escolha de determinado material na execução de um pavimento, segundo Bernucci *et al.* (2022) é dividido em dois

tipos básicos: rígidos e flexíveis, ou pavimentos de concreto de cimento Portland e pavimentos asfálticos, respectivamente. Sendo os pavimentos flexíveis e os pavimentos semirrígidos englobados na categoria dos pavimentos asfálticos. A partir desses dois tipos básicos de pavimentos, o concreto de cimento Portland e principalmente o asfalto se configuram como os materiais mais usuais para execução de pavimentos, isso sem contar os materiais utilizados como agregados.

Dados do CNT (2017) apontam que cerca de 99% de toda a malha rodoviária brasileira é composta de pavimentos asfálticos, caracterizando-se como o tipo de pavimento mais executado no país. O menor custo de execução dos pavimentos asfálticos em comparação aos pavimentos rígidos é um dos principais fatores que influenciam na preferência deste em relação aos pavimentos de Concreto de Cimento Portland (CCP), apesar de representarem um maior custo a longo prazo com manutenção se comparados aos pavimentos em CCP.

### 2.1.2 Pavimentos asfálticos

Os pavimentos asfálticos são comumente construídos utilizando o sistema de resposta estrutural flexível. Sendo este um sistema definido pelo manual de pavimentação do DNIT (2006) como aquele que sofre deformação elástica significativa em todas as suas camadas sob o carregamento aplicado, tendo assim uma distribuição de cargas em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas do pavimento, ou seja, é um tipo de pavimento que impõe um campo de tensões muito mais concentrado nas proximidades do ponto de aplicação da carga, além de distribuir uma magnitude maior de esforços verticais no subleito e exigindo mais deste, diferentemente dos pavimentos rígidos que possuem um campo de tensões bem mais disperso, menos concentrado, e que distribuem os efeitos da carga de maneira semelhante em toda a dimensão da placa de revestimento (Balbo, 2007).

Bernucci *et al.* (2022) afirma que os pavimentos asfálticos são formados por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito, podendo ainda ter a ausência de algumas camadas a depender do tráfego e da disponibilidade de materiais. A execução da camada de revestimento dos pavimentos asfálticos é feita a partir de uma mistura asfáltica formada basicamente de agregados e ligante asfáltico.

A fabricação do material empregado na camada de revestimento pode ser feita em usina específica, fixa ou móvel, como no caso das misturas asfálticas usinadas, em que o revestimento asfáltico pode ser classificado em função do ligante utilizado, como as misturas asfálticas usinadas a quente com o uso de cimento asfáltico de petróleo (CAP), ou asfaltos modificados por polímeros, borracha ou outros modificadores, misturas asfálticas usinadas mornas, em que há a redução da temperatura de usinagem e execução e as misturas usinadas a frio com o uso de emulsão asfáltica (EAP). A fabricação do material de revestimento asfáltico ainda pode ser feita no próprio local de aplicação do revestimento, como no caso dos tratamentos superficiais (Bernucci *et al.*,

2022).

Dentre as principais características esperadas para as misturas asfálticas, Roberts *et al.* (1996) destaca: resistência à deformação permanente, resistência à fadiga, resistência ao trincamento em baixas temperaturas, durabilidade, resistência ao dano pela água, resistência à derrapagem e trabalhabilidade.

### 2.1.3 Misturas asfálticas

De acordo com Motta (2011) as misturas asfálticas podem ser classificadas de acordo com a temperatura necessária para sua produção, sendo divididas em quatro grupos básicos: misturas asfálticas a quente, misturas asfálticas mornas, misturas asfálticas semimornas e misturas asfálticas a frio. As misturas asfálticas a frio e principalmente as misturas asfálticas a quentes são as mais utilizadas no Brasil.

As misturas asfálticas a frio correspondem a uma mistura de agregados utilizando a emulsão asfáltica ou o asfalto diluído como ligante sem que haja necessidade de aquecimento da mistura, eventualmente pode ser necessário haver um pequeno aquecimento do ligante, mas geralmente seu uso é feito em temperatura ambiente (Bernucci *et al.*, 2022). O uso das misturas asfálticas a frio é apropriado para vias de baixo volume de tráfego, podendo ser aplicadas como revestimento de ruas, principalmente os Pré-misturados a frio (PMF) densos e os semidensos, em camadas intermediárias de pavimentos e em serviços de manutenção de pavimentos. Sua utilização se destaca ainda pela redução dos gastos energéticos, que variam em função do nível de aquecimento requerido no processo de usinagem.

De acordo com o Manual básico de emulsões asfálticas da Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos - ABEDA (2010), o pré-misturado a frio (PMF) é possivelmente o serviço mais empregado com emulsão asfáltica entre os inúmeros que podem ser executados com este material, consistem em misturas usinadas de agregados graúdos, miúdos e de enchimento, misturados com EAP à temperatura ambiente. Outra solução de mistura a frio muito utilizada é o Microrrevestimento Asfáltico (MRAF). Os PMF são classificados em função do volume de vazios da mistura, sendo:

- aberto: graduação aberta, possui elevado volume de vazios após a compactação, entre 22 e 34%, com pequena ou nenhuma quantidade de agregado miúdo ou fíler na mistura;
- semidenso: granulometria contínua grossa, possui volume de vazios intermediário após a compactação, entre 15 e 22%;
- denso: graduação contínua e bem graduado, possui baixo volume de vazios, entre 9 a 15%, com agregados graúdo, miúdo e de enchimento;

A princípio as misturas asfálticas a frio não obtiveram sucesso em se estabelecer como uma alternativa de material para pavimentação. Quando foram trazidas para o Brasil na década de 50 as primeiras emulsões asfálticas aniônicas quando combinadas com os agregados encontrados em solo nacional, predominantemente ácidos, e as chuvas tropicais, tiveram seu desempenho e resistência comprometidos (ABEDA, 2010).

Os avanços na tecnologia das emulsões asfálticas, principalmente em decorrência do advento das emulsões catiônicas ainda no século passado, fazem com que atualmente as misturas asfálticas a frio representem uma excelente alternativa de material para pavimentação de vias sujeitas a baixo volume de tráfego, além de representarem uma solução mais econômica se comparado às misturas asfálticas a quente e não terem efeitos tão nocivos ao meio ambiente e à saúde dos trabalhadores.

As misturas asfálticas mornas e semimornas possuem temperaturas intermediárias em relação às misturas a frio e as misturas a quente, podendo as misturas semimornas atingirem temperaturas de até 100°C e as misturas mornas atingindo temperaturas na ordem de aproximadamente 140°C (Motta, 2011). Ainda que haja redução na temperatura de produção da mistura, se faz necessário o aquecimento parcial dos agregados antes de serem envolvidos pelo ligante asfáltico, que podem ser asfalto ou emulsão. Bernucci *et al.* (2022) define as misturas mornas como uma variação das misturas a quente, tendo sido introduzidas no Brasil no início da década de 2010, onde foram produzidas misturas a quente com o uso de aditivos que permitiam a redução de temperatura de usinagem entre 20 a 30° C, essas misturas são denominadas no Brasil de misturas asfálticas mornas (MAM), uma representação da sigla WMA (warm-mix asphalt).

As misturas asfálticas a quente são produzidas a partir do aquecimento da mistura dos agregados e do ligante sob altas temperaturas, atingindo temperaturas de usinagem na ordem de cerca de 180°C. O concreto asfáltico (CA), também conhecido como concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), é o tipo de mistura asfáltica usinada mais utilizada no Brasil (Bernucci *et al.*, 2022; Balbo, 2007). A norma DNIT-ES - 031/2006, classifica o concreto asfáltico como uma Mistura executada a quente, em usina apropriada, com características específicas, composta de agregado graduado, material de enchimento (filer) se necessário e cimento asfáltico, espalhada e compactada a quente.

O Concreto Asfáltico possui textura lisa, devido ao seu baixo índice de vazios, além de possuir alto desempenho mecânico ao ser submetido a solicitações elevadas de carga e alta impermeabilidade, sendo, desta forma, caracterizado como um tipo de mistura com aplicação majoritária nas vias de tráfego pesado (Jesus, 2021). Bernucci *et al.* (2022) afirma que misturas a quente podem ser divididas em função da granulometria dos agregados, sendo os três tipos mais usuais:

- graduação densa: a curva granulométrica é contínua e bem graduada, proporcionando um esqueleto mineral de grande intertravamento, com poucos vazios com ar disponível, neste caso os agregados de dimensões menores preenchem os vazios deixados pelos maiores. Exemplo: Concreto Asfáltico;

- graduação aberta: a curva granulométrica é uniforme sendo os agregados quase exclusivamente de um mesmo tamanho, isto gera um esqueleto mineral com muitos vazios interconectados, a mistura asfáltica obtém elevado volume de vazios, tornando-se assim drenante ao possibilitar a percolação da água. Exemplo: mistura asfáltica drenante, conhecida no Brasil por camada porosa de atrito (CPA);

- graduação descontínua: a curva granulométrica apresenta majoritariamente a grãos de maiores dimensões em relação aos grãos de dimensões intermediárias, completados por certa quantidade de finos, o esqueleto mineral se torna mais resistente à deformação permanente com o maior número de contatos entre os agregados de maiores dimensões. Exemplos: matriz pétreo asfáltica (stone matrix asphalt – SMA), mistura sem agregados de certa graduação (gap-graded), concreto asfáltico descontínuo delgado (béton bitumineux très mince – BBTM), concreto asfáltico descontínuo ultradelgado (béton bitumineux ultra-mince – BBUM).

O custo elevado na produção de misturas asfálticas a quente é influenciado principalmente pelos custos operacionais e energéticos associados à usinagem, que, por vezes, ultrapassam os recursos disponíveis, já que ele exige aquecimento dos agregados e do cimento asfáltico de petróleo em usinas com aquecedores de óleo térmico, mão de obra qualificada, equipamento adequado para o processo de mistura e aquecimento do material e transporte adequado para o local da obra, além de não poder ser estocado (Jesus, 2021; ABEDA, 2010).

Seja qual for o tipo de mistura asfáltica utilizada na pavimentação, a garantia do desempenho da mistura asfáltica é essencial para que o pavimento atenda as funções esperadas durante sua vida útil de maneira econômica e tecnicamente eficiente. Lucena (2009) afirma que o desempenho esperado da mistura asfáltica na camada de revestimento depende diretamente, dentre outros fatores, das propriedades físicas e mecânicas das suas camadas constituintes. Sabendo da importância dos componentes da camada de revestimento e do custo elevado destes, torna-se necessário o controle rigoroso de fatores que possam comprometer seu desempenho, tais como: as características dos materiais, dosagem, condições de compactação, processo construtivo e plano de manutenção.

Sobre a importância dos materiais nas misturas asfálticas, Nascimento (2008) complementa que as propriedades e a proporção dos materiais constituintes das misturas asfálticas são fatores de grande impacto no seu desempenho quando estão sob a ação dos esforços do pavimento, as solicitações do tráfego ou as condições climáticas.

Em virtude disso, as metodologias de dosagem tentam estimar o teor ideal do ligante, ou teor “ótimo”, a partir de uma faixa granulométrica predefinida, aplicado às misturas asfálticas de forma a não comprometer seu desempenho, estabelecendo uma proporção de ligante e agregado que, dentre outros benefícios, previna o surgimento de deformações permanentes ou fratura por fadiga.

Bernucci *et al.* (2022) afirma que o Concreto Asfáltico é muito sensível à variação do teor do ligante asfáltico, pelo fato de ser uma mistura com composição granulométrica bem graduada. Sendo assim, quanto mais próxima sua curva granulométrica estiver da curva de densidade máxima, menos vazios do agregado mineral estará disponível e pequenas variações de teores de ligante asfáltico podem gerar excesso ou falta em relação ao teor de projeto, comprometendo sobremaneira seu comportamento mecânico, podendo gerar patologias como trincas por fadiga ou deformações permanentes.

Em relação aos agregados, Gouveia (2006) destaca sua importância nas misturas

asfálticas ao afirmar que suas características afetam diretamente o desempenho das misturas asfálticas, pois uma única propriedade deste material pode influenciar as propriedades fundamentais da mistura, acarretando em alterações complexas do todo, isto considerando o fato de os agregados representarem cerca de 90% do volume total de uma mistura asfáltica.

Pelo fato de os agregados exercerem importante papel na resistência e durabilidade da mistura asfáltica torna-se prudente fazer a correta seleção do material que será utilizado como agregado, observando características como origem do material, a granulometria, a forma, a textura, a porosidade entre outras propriedades que possam afetar o desempenho do revestimento asfáltico.

Por fim, para que as propriedades ideais de desempenho sejam alcançadas, torna-se necessário estabelecer um perfeito equilíbrio entre o esqueleto mineral formado pelos agregados e o teor de asfalto. Afinal, espera-se que as misturas asfálticas tenham estabilidade o suficiente para evitar a ocorrência de deformações permanentes, flexibilidade o suficiente para que não ocorram trincas devido à fadiga e que sejam duráveis para resistir às ações do tráfego, das intempéries e do tempo (Gouveia, 2006).

#### 2.1.3.1 Materiais constituintes

A produção de uma mistura asfáltica é feita principalmente pela mistura dos agregados e o Cimento asfáltico de petróleo (CAP), caso haja necessidade pode haver o acréscimo de material de enchimento (filer) e até de aditivos em alguns casos. Algumas propriedades físicas, químicas e morfológicas de seus constituintes influenciam de modo substancial no desempenho da mistura.

Dentre as definições, os atributos e as principais propriedades dos ligantes asfálticos e dos agregados, são apresentadas:

##### a) Cimento asfáltico de petróleo (CAP)

A norma DNIT-EM 095/2006 define Cimento asfáltico de petróleo como o asfalto obtido especialmente para apresentar as qualidades e consistências próprias para o uso direto na construção de pavimentos.

Desta forma, quando o asfalto se enquadra em parâmetros que se baseiam em suas propriedades físicas visando o bom desempenho para a pavimentação, ele passa a ser denominado por cimento asfáltico de petróleo (CAP), ou ainda ligante asfáltico, sendo estes termos utilizados de maneira intercambiável na literatura, ou seja, o CAP nada mais é do que o asfalto quando produzido com características voltadas à pavimentação.

O CAP é constituído basicamente de uma mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo, que atingem a ordem de cerca de 95% de sua composição, tendo o Betume como principal componente e possuindo também em sua composição cerca de 5% a 10% de heteroátomos unidos por ligações covalentes (Bernucci *et al.*, 2022). Sua obtenção pode ser por meio da destilação do petróleo em refinarias ou do asfalto natural encontrado em jazidas. Diante de temperatura ambiente os cimentos asfálticos apresentam consistência viscoelástica, na sua forma mais comum de utilização os cimentos asfálticos

de petróleo (CAPs) necessitam de aquecimento para alcançarem a consistência ideal para envolver os agregados.

A preferência dos ligantes asfálticos na pavimentação se justifica por proporcionarem forte união dos agregados, flexibilidade controlável à mistura, por serem duráveis e resistentes à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais, além de poderem ser utilizados aquecidos ou à temperatura ambiente, como no caso das emulsões ou do asfalto diluído, permitindo misturas sob diversas configurações de graduação, podendo ser usados com ou sem aditivos (Roberts *et al.*, 1996).

A classificação do CAP é feita em função da sua penetração (consistência), sendo de acordo com a Norma DNIT-EM 095/2006 classificados: CAP-30/45, CAP-50/70, CAP-85/100 e CAP-150/200. Quanto maior a consistência do CAP maior a temperatura exigida para a sua fabricação, espalhamento e a compactação de misturas asfálticas em pista (Balbo, 2007).

Segundo ABEDA (2010), os cimentos asfálticos de petróleo (CAPs) são matéria-prima da maioria dos tipos de materiais asfálticos existentes no mercado brasileiro, dentre eles:

- Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) – Especificação ANP Resolução nº 19, de 11 de julho de 2005, e anexo Regulamento Técnico nº 3/2005.
- Asfaltos Diluídos de Petróleo (ADP CR e CM) – Especificação ANP Resolução nº 30, de 9 de outubro de 2007, e anexo Regulamento Técnico nº 2/2007.
- Aditivos Asfálticos de Reciclagem para Misturas a Quente – Regulamento Técnico DNC nº 04/97 – Portaria nº 44, de 29 de setembro de 1997.
- Emulsões Asfálticas para Pavimentação (EAP) – Proposta de Especificação da Comissão de Asfalto do IBP-ABNT, pendente.
- Agentes de Reciclagem Emulsionados (ARE) – Proposta de Especificação da Comissão de Asfalto do IBP.
- Asfaltos Modificados por Polímeros Elastoméricos (AMP-E) – Proposta de Especificação da Comissão de Asfalto do IBP-ABNT, pendente.
- Asfalto Modificado por Borracha Moída de Pneu (AMB) – Especificação ANP Resolução nº 39, de 24 de dezembro de 2008, e anexo Regulamento Técnico nº 05/2008.
- Emulsões Asfálticas Catiônicas Modificadas por Polímeros Elastoméricos (EAP-E) – Especificação ANP Resolução nº 32, de 14 de outubro de 2009, e anexo Regulamento Técnico 05/2009.

#### b) Agregados para misturas asfálticas

De acordo com Bernucci *et al.* (2022) agregado é um termo genérico para os materiais que estão nas dimensões da fração areia, dos pedregulhos, e maiores dimensões, decorrentes da britagem de rochas minerais ou de cascalheiras de ocorrência natural. Podem ser classificados quanto à natureza, tamanho, distribuição dos grãos, forma e outras propriedades importantes.

• Os agregados classificados quanto à natureza podem ser subdivididos em: agregados de origem natural, são os que incluem todas as fontes de ocorrência natural e 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. Ou seja, os agregados naturais podem ser empregados em pavimentação na forma e tamanho como se encontram na natureza, ou podem ainda passar por processamentos como a britagem. Os agregados britados provenientes de rochas naturais pertencem a um de três tipos principais, que são ígneos, sedimentares e metamórficos;

Os agregados 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. O tipo de agregado artificial atualmente mais utilizado para a pavimentação são os vários tipos de escórias, subprodutos da indústria do aço. Elas podem apresentar problemas de expansibilidade e heterogeneidade, requerendo tratamento adequado para utilização, ou alta resistência ao atrito;

Agregados reciclados são os provenientes do reuso de materiais diversos. Devido a restrições ambientais na exploração de agregados naturais, a possibilidade de utilização de agregados reciclados vem despertando interesse, além do desenvolvimento de técnicas de reciclagem que possibilitam a produção de materiais reciclados dentro de determinadas especificações existentes para utilização. O uso de resíduos da construção civil e de demolições vem se destacando como uma solução em regiões urbanas e em locais com ausência de agregados pétreos ou mesmo em áreas urbanas que possuam pedreiras, como forma de reduzir os problemas ambientais de disposição desses resíduos (Bernucci *et al.*, 2022).

- Tamanho: Os agregados são classificados quanto ao tamanho em graúdo, miúdo e material de enchimento ou fíler (DNIT-ES 031/2006).

Agregado graúdo é o material com dimensões maiores do que 4,8 mm e máxima de 50 mm. São britas, cascalhos, seixos etc;

Agregado miúdo é o material com dimensões maiores que 0,075mm e menores que 2,0mm. O agregado miúdo é o material que fica retido na peneira N°200, mas que passa na de número 10 (areias, pó de pedra etc.);

Material de enchimento (fíler) – é o material onde pelo menos 65% das partículas apresentam diâmetro inferior a 0,075mm, correspondente à peneira 200 (cal hidratada, cimento Portland).

- Distribuição dos grãos: a distribuição granulométrica dos agregados é uma de suas principais características e tem influência direta em quase todas as propriedades importantes das misturas asfálticas, dentre elas: rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida, etc. Dessa forma o comportamento dos revestimentos asfálticos e das camadas granulares em pavimentos asfálticos é diretamente influenciado pela distribuição granulométrica dos agregados.

Os agregados exercem um importante papel no desempenho das misturas asfálticas, portanto, é prudente fazer a correta seleção deles, considerando-se as características que possam afetar no seu desempenho, desde a sua quantificação na



dosagem das misturas e suas propriedades morfológicas, à sua origem, sabendo que as características da rocha de origem estão relacionadas com as propriedades dos agregados, como resistência, abrasão e dureza, e que a seleção de agregados para utilização em revestimentos asfálticos depende de sua disponibilidade, custo e qualidade, bem como do tipo de aplicação (Roberts *et al.* 1996; Bernucci *et al.*, 2022). Desta forma é importante obter informações sobre o tipo de rocha ou processo de formação, sua composição mineralógica, sua composição química, sua granulação, seu grau de alteração, sua tendência à degradação, abrasão ou fratura sob tráfego e o potencial de adesão do ligante asfáltico em sua superfície.

As características dos agregados influenciam diretamente no comportamento e o desempenho das misturas asfálticas, e apesar disto ser um fato amplamente conhecido, não é uma tarefa fácil estabelecer o comportamento que novas misturas terão em campo somente conhecendo as características deles, senão seria possível estabelecer um prognóstico aproximado do comportamento de uma mistura asfáltica somente conhecendo as características dos agregados, afinal uma única propriedade dos agregados pode influenciar propriedades fundamentais das misturas, culminando em alterações complexas do todo (Gouveia, 2006).

Apesar de não ser uma simples tarefa relacionar quais são as propriedades dos agregados de maior impacto no desempenho de misturas asfálticas, há certas propriedades que são frequentemente apontadas na literatura como fatores de maior influência para o bom desempenho de misturas asfálticas, como as propriedades morfológicas por exemplo, dentre as principais: angularidade, forma e textura superficial. Essas propriedades morfológicas afetam diversas propriedades das misturas asfálticas, como a trabalhabilidade, o ângulo de atrito e a energia de compactação necessária para a mistura alcançar a densidade desejada (Bernucci *et al.*, 2022).

Pazos (2015) afirma que de acordo com suas características de forma e angularidade, as partículas de agregados usadas em obras de pavimentação podem ser cúbicas, lamelares (achatadas e alongadas) ou arredondadas, porém Bastos (2016) complementa que agregados com maior angularidade (maior número de faces fraturadas) e com textura mais rugosa tendem a compor misturas asfálticas com maior resistência à deformação permanente, além de apresentarem melhor intertravamento entre as partículas dos agregados.

Nascimento (2008) afirma que as partículas de agregados adequadas para o uso em misturas asfálticas devem ser aproximadamente cúbicas ao invés de chatas ou alongadas. Após a compactação, partículas mais angulares exibem maior intertravamento e atrito interno do que partículas arredondadas, o que resulta em maior estabilidade mecânica. Partículas achatadas e alongadas são indesejáveis nas misturas asfálticas, já que elas tendem a quebrar durante o processo construtivo e sob a aplicação das cargas dos veículos, além de serem menos resistentes à fratura durante a compactação das misturas nas obras de pavimentação (Pazos, 2015).

Segundo Roberts *et al.* (1996), são as propriedades físicas dos agregados que determinam principalmente a adequação para o uso em misturas asfálticas e em menor

extensão as propriedades químicas. São propriedades físicas e mecânicas básicas: a resistência, a porosidade e a densidade. As rochas de origem possuem influência determinante nas características físicas dos agregados. Propriedades físico-químicas tais como umidade, adesividade e, em consequência, descolamento da película de asfalto são função da composição e da estrutura dos minerais no agregado, entre outros fatores. As propriedades químicas dos agregados têm pequeno efeito no seu desempenho, exceto quando afetam a adesividade do ligante asfáltico ao agregado e a compatibilidade com aditivos antidescolamento que podem ser incorporados ao ligante asfáltico. A caracterização destas propriedades geralmente segue um roteiro de testes laboratoriais preconizados em normas específicas.

A preferência pelos agregados graníticos em misturas asfálticas ou em estruturas de concreto de cimento portland se justifica pelo atendimento à maioria das propriedades requeridas para os agregados, porém em regiões que possuem escassez de jazidas deste material se faz necessário propor soluções para sua substituição total ou parcial visando materiais disponíveis nas proximidades de forma a viabilizar economicamente a execução de rodovias.

A utilização de agregados alternativos se apresenta como uma solução para as regiões com escassez de jazidas de rochas graníticas, porém a falta de estudos e de normas que referenciam a utilização destes materiais alternativos atua como um fator impeditivo para a sua utilização, isto faz com que a execução de pavimentos nestas regiões seja encarecida devido aos gastos elevados com transporte de materiais de outras localidades, ou muitas vezes fazendo com que haja o uso indiscriminado de materiais de características insatisfatórias para a pavimentação.

De acordo com Bernucci *et al.* (2022) agregados naturais ou britados com elevada porosidade normalmente não devem ser utilizados em misturas asfálticas, pois além de consumirem maior quantidade de ligante asfáltico, podem apresentar porosidade variável conforme a amostragem, o que dificulta o estabelecimento do teor de ligante, podendo resultar em excesso ou falta do mesmo. Porém, nem sempre há outro agregado disponível, sendo então necessários alguns cuidados na dosagem. A escória de aciaria, a laterita e alguns tipos de basaltos e agregados sintéticos são exemplos de materiais que podem apresentar alta porosidade.

### 2.1.3.2 Utilização de agregados alternativos

Várias pesquisas com agregados alternativos têm sido feitas com o intuito de caracterizar suas propriedades e viabilizar a utilização destes materiais na pavimentação. De acordo com Bernucci *et al.* (2022) a variedade de agregados passíveis de utilização em revestimentos asfálticos é muito grande. Contudo, cada utilização em particular requer agregados com características específicas o que inviabiliza muitas fontes potenciais.

Ao longo dos anos, pesquisas como as de Pazos *et al.* (2015), Freitas e Motta (2008) e Frota *et al.* (2007, 2018) estudaram a utilização de agregados alternativos em

substituição total ou parcial dos agregados convencionais, como o agregado de argila calcinada ou o uso de escórias de aciaria, em misturas asfálticas, tendo apresentado resultados satisfatórios por atenderem requisitos mínimos estabelecidos em norma.

Pazos *et al.* (2015) estudou a utilização do seixo rolado como alternativa de agregados naturais. Na pesquisa foram utilizadas seis misturas de diferentes proporções de seixos rolados e pedra britada para avaliar os efeitos das propriedades morfológicas dos agregados no comportamento mecânico do concreto asfáltico.

No ensaio de Abrasão Los Angeles somente a mistura que continha apenas seixo rolado ultrapassou os valores limites de abrasão, que segundo a norma DNIT 031/2006 que estabelece as Especificações de serviço para o concreto asfáltico, são de até 50%. As misturas contendo Brita Cúbica e Seixo Rolado apresentaram valores mais próximos dos limites estabelecidos. No ensaio de módulo de resiliência, com exceção da mistura "50% Brita - 50% Seixo", todas as misturas apresentaram módulos resiliência parecidos e dentro do estabelecido em norma. No ensaio de módulo dinâmico uniaxial a mistura com seixo rolado apresentou módulos dinâmicos inferiores aos das misturas com brita, porém as misturas compostas por combinações de brita cúbica e seixo rolado apresentaram módulos dinâmicos muito semelhantes aos das misturas com apenas britas, a presença de material mais cúbico na composição de misturas contendo brita e seixo rolado gerou um melhor intertravamento das partículas do que quando só seixo, pelo fato de ser um material mais arredondado. No ensaio do Flow number a mistura com apenas seixo rolado foi a mais suscetível ao dano por deformações permanentes, porém a adição de brita cúbica nas misturas contendo seixo gerou um aumento considerável nos valores de flow number. No ensaio de resistência à tração todas as misturas, com exceção da mistura com brita lamelar, apresentaram valores estatisticamente semelhantes de resistência à tração.

Os resultados apontaram que misturas utilizando o seixo rolado podem ser utilizadas em obras de pavimentação para um nível de tráfego de até 10 milhões de ESALs (Equivalent Single Axle Load), apesar de suas partículas serem mais arredondadas do que as de britas. Combinações do seixo rolado e da brita de característica mais cúbica resultaram em misturas com desempenho similar ou superior ao de misturas asfálticas contendo somente agregado britado lamelar, usado com frequência no campo. Isto pode resultar em economia significativa no custo de transporte de agregados britados para locais em que seixo rolado é mais disponível.

Freitas e Motta (2008) estudaram o uso de escórias de aciaria como agregado em obras rodoviárias em comparação ao agregado granítico. Segundo as autoras quantidades significativas de resíduos industriais são geradas anualmente e o aproveitamento desses é de suma importância para a conservação do meio ambiente. Dentro deste contexto, destaca-se o uso de escórias de aciaria como agregado em obras rodoviárias, que tem se mostrado como alternativa de redução do custo e da degradação ambiental causada pela extração de materiais de jazidas. A escória de aciaria é produzida em alta quantidade já que cada tonelada de aço produzido gera, aproximadamente, 140 kg de escória de aciaria. Apesar de apresentarem alta resistência ao atrito e dureza

elevada, algumas podem ter problemas de expansibilidade e heterogeneidade, por isso devem ter tratamento adequado para sua utilização.

A escória de aciaria do estudo atendeu às expectativas quanto ao uso como agregado em misturas asfálticas de módulo elevado, demonstrando características físicas e mecânicas tão boas quanto e, em alguns casos, até superiores às do agregado convencional analisado. Tendo apresentando valores até 17% superiores para o ensaio de módulo de resiliência, e cerca de 12% superior na resistência à tração, além de ter apresentado valores quase três vezes menor no ensaio de abrasão Los Angeles e valores satisfatórios para os ensaios de deformação permanente por compressão axial e ensaio de fadiga. Apesar do maior teor de ligante utilizado em relação ao das misturas com agregado convencional, deve-se levar em consideração o custo global para cada caso, como a distância de transporte ao local da obra, preço do agregado, etc, além do bem ambiental ao se aproveitar um resíduo.

Frota *et al.* (2007, 2018) estudaram a viabilidade do emprego de agregado de argila calcinada na composição do concreto asfáltico, em substituição ao seixo rolado. Este agregado sintético é produto de solos com matriz argilosa, obtidos através do processo de calcinação. Na primeira pesquisa os autores dosaram 3 misturas asfálticas enquadradas na Faixa C, do DNIT, sendo 2 confeccionadas com agregados sinterizados de argila calcinada (ASAC) e a terceira com seixo rolado. Após isso, submeteram os agregados e as misturas aos ensaios de qualificação das amostras. Os autores chamam atenção para o processo de produção do agregado, pois se o solo for mal homogeneizado pode gerar agregados quebradiços, mais propensos à formação de trincas durante a queima ou de pouca resistência após a calcinação.

No estudo em questão, uma das amostras de ASAC's demonstrou alto desgaste por abrasão, acima do estabelecido em norma, mas apesar disto, se mostrou a mistura com o melhor desempenho entre as três, corroborando com a literatura que destaca que misturas com esses agregados de argila apresentam resistência mecânica apreciável, apesar de apresentarem alto valor de abrasão para os agregados. As misturas asfálticas confeccionadas com agregados sinterizados de argila calcinada (ASAC) apresentaram maior teor de ligante, devido ao seu alto potencial de absorção, mas, em contrapartida, apresentaram resultados superiores nos testes de resistência à tração, até 54% superior para os módulos de resiliência (MR), e ainda apresentaram baixa tendência à deformação, além de terem apresentado considerável recuperação elástica. Segundo o estudo, o seixo rolado não imprimiu maior resistência às misturas por apresentar forma e superfície que prejudicam o atrito entre as partículas.

No segundo trabalho os autores avaliaram a influência da variação de temperatura no comportamento mecânico de misturas asfálticas com o agregado sinterizado de argila calcinada (ASAC), comparando-o ao seixo. Os resultados apresentados nos ensaios de caracterização dos agregados evidenciaram que devido ao ASAC se tratar de um agregado leve, o mesmo apresentou valores de massa específica (Aparente, Solta e Compactada) inferiores aos respectivos valores característicos dos agregados naturais, além de o mesmo ter apresentado valor no ensaio de abrasão quase duas vezes superior

ao seixo, o que é uma característica deste tipo de agregado. O agregado alternativo também apresentou alto potencial de absorção de ligante, isto devido à sua alta porosidade.

Com relação aos ensaios com as misturas asfálticas com ASAC e com o seixo, observou-se no ensaio de Resistência à Tração que para temperaturas acima de 40°C o ASAC apresentou maiores valores de RT do que o seixo, porém as duas apresentaram valores de RT na temperatura de 25°C maiores que 0,65 MPa, atendendo, portanto, a norma para os concretos asfálticos. Nos ensaios de Módulo de Resiliência a mistura com seixo apresentou grandes variações de MR nas temperaturas entre 25°C a 35°C, uma menor diferença entre 35°C a 45°C, e apresentou valores mais constantes entre 45°C a 60°C, apresentando valores significativamente baixos para esta última faixa (valor em torno de 500 MPa) se comparado à mistura com o agregado sintético que apresentou MR praticamente constante para diferentes tensões e faixas de temperaturas, provando-se ser pouco suscetível à variação de temperatura.

## 2.2 AGREGADO LATERÍTICO

O primeiro registro científico do termo laterita é atribuído ao geógrafo inglês Buchanann (1807), que o descreveu como um material que podia ser facilmente cortado por um canivete, mas que em contato com o ar sofria um endurecimento considerável e irreversível, produzindo um excelente material para construção, daí vem o termo laterita, do latim “later”, que significa tijolo (MELFI, 1997; ESPÍNDOLA E DANIEL, 2008). Melfi (1997) afirma que aquilo a que Buchanann estava se referindo eram na verdade argilas endurecidas, sem estratificação, extremamente porosas, ricas em cavidades e que possuíam grandes quantidades de ferro na forma de óxidos e hidróxidos de coloração amarelo avermelhada.

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) define o solo laterítico como um solo que ocorre comumente sob a forma de crostas contínuas, como concreções pisolíticas isoladas ou, ainda, na forma de solos de textura fina, mas pouco ou nada ativos. Suas cores variam do amarelo ao vermelho mais ou menos escuro e mesmo ao negro. Diversas designações locais existem para os solos ou cascalhos lateríticos, tais como: piçarra, recife, tapiocanga e mocoioró.

Chagas Filho (2005) afirma que os solos lateríticos são típicos de regiões tropicais e subtropicais do planeta, sendo encontrados, principalmente, nas regiões identificadas nas subordens dos Argissolos e Nitossolos (segundo as nomenclaturas atuais), além de serem resultado dos processos de transformação ocorridos nas rochas pelo intemperismo físico e químico. Chuvas abundantes e períodos de estiagem regular aceleram os processos de intemperismos o que acaba por desintegrar as rochas mais rapidamente.

Apesar do processo de formação das lateritas ser um só, elas podem englobar vários tipos de produtos, pois a intensidade do processo de laterização pode variar de local para local, assim como o tipo de material de origem, tempo de atuação do processo,

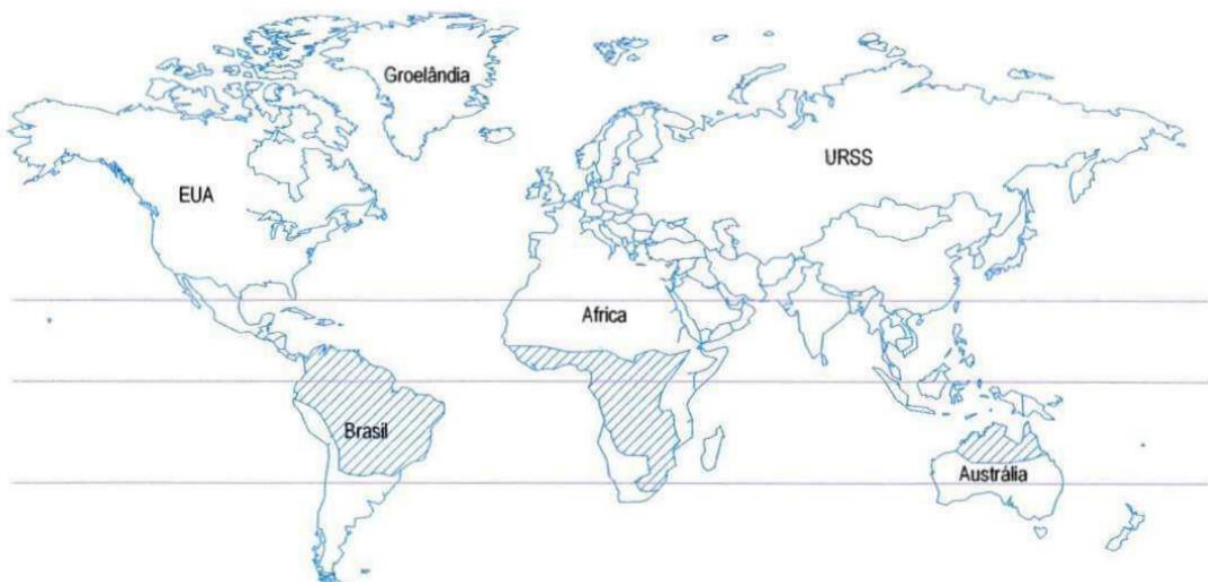
etc. Além de apresentarem propriedades físicas (cor, "fabric", dureza, consistência, etc), químicas, físico-químicas e mineralógicas (aluminosas, ferruginosas, manganíferas, níquelíferas, etc) diferentes (Melfi, 1997). Souza (2007) aponta que, pedologicamente, os solos lateríticos são uma variedade de solo superficial pedogenético, típico das partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas.

Não há consenso entre engenheiros e geólogos sobre a definição da laterita. De maneira geral, o que se pode afirmar é que tal material se forma devido a uma série de complexas reações químicas, mineralógicas e bioquímicas interligadas, atuando sobre rochas já existentes.

Costa (1991) afirma que "Lateritos" são caracteristicamente ricos em Ferro e Alumínio e pobres em Silício, Potássio e Magnésio, se comparados à composição de sua rocha-mãe. Podem também ser compactos, maciços, coesos e incoesos, terrosos ou argilosos, com coloração variando de vermelho, violeta, amarelo, marrom até o branco. Sua composição mineralógica envolve geralmente oxi-hidróxidos de ferro (goethita e hematita), de alumínio (gibbsita e bôhmita), titânio (anatásio) e de manganês (litoforita, todorokita etc); argilominerais (caulinita e esmectita); fosfates (crandalita-goyazita, augelita, outros) e resistatos (turmalina, cassiterita, rutilo etc).

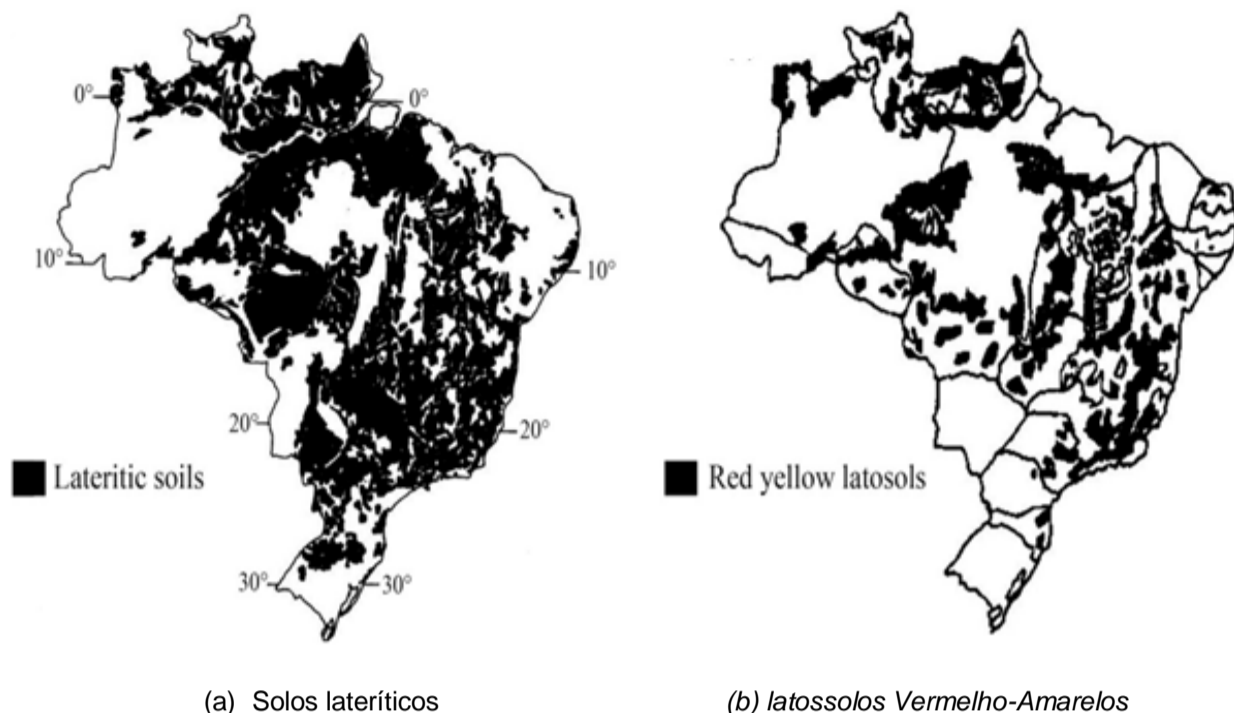
Melfi (1997) aponta que cerca de 40% das terras emersa do globo são recobertas por lateritas (Figura 2.2). Segundo o autor, em território brasileiro as lateritas recobrem perto de 65% da área total do país (Figura 2.3). Entretanto, o autor destaca que esta cobertura não é homogênea, pelo fato de comportar diferentes tipos de materiais lateríticos. O tipo mais comum é aquele representado por materiais argilo-ferruginosos, friáveis, que os processos pedogenéticos transformaram em um solo muito fino, pulverulento, com microagregação característica, nomeados de latossolos. Mais raramente, é possível encontrar formações endurecidas, tanto na forma contínua de couraças ou carapaças, como no Planalto Central do Brasil, ou descontínuas, como é o caso de certos solos nodulares do Nordeste Brasileiro.

*Figura 2 - Mapa mundial mostrando as regiões de ocorrência de solos lateríticos*



Fonte: SANTANA (1987), apud CHAGAS FILHO (2005).

Figura 3 - Distribuição de solos lateríticos no Brasil.



Fonte: Portelinha *et al.* (2012)

Segundo Melfi (1997), devido a extensão geográfica que as formações lateríticas ocupam é fácil compreender a sua importância para as regiões tropicais, pois os países que se situam na zona tropical são países em desenvolvimento e que, portanto, apresentam uma economia fortemente dependente da exploração de seus recursos naturais, sendo quase todos eles obtidos direta ou indiretamente das lateritas.

Caso haja maior conhecimento sobre as limitações do uso das lateritas, elas poderão se estabelecer com um material alternativo na construção civil em regiões que possuem escassez de materiais granulares, como as regiões norte e Centro Oeste do Brasil. Segundo Chagas Filho (2005), este conhecimento científico e de uso prático na engenharia, poderá inclusive beneficiar outros países que disponham deste material. Como se sabe, a região amazônica representa 44% do território sul-americano e abrange área de cerca de oito países; nela encontram-se concreções lateríticas em grandes quantidades. Uma característica particular e que estimula o uso da laterita na Região Norte do Brasil, é que existe ausência de brita granítica em pelo menos 45,5% do território, que tem área de cerca de 3.869.637 km<sup>2</sup>.

A Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv), desde 1976, considera que a laterita é bem aceita em camadas de base, sub-base e revestimento primário e notifica que, historicamente, as primeiras experiências com este tipo de material ocorreram em 1953, nos estados do Pará e Maranhão, e como exemplos mais importantes de seu uso cita as pavimentações das rodovias Belém – Brasília e Transamazônica, ambas da década de setenta. Amaral (2004) cita que há experiências com as lateritas como material alternativo no Brasil pelo menos desde 1943, onde foi utilizada como agregado graúdo no revestimento asfáltico da pista de pouso e decolagem do aeroporto de São Luís no estado do Maranhão, executada no período da 2ª Guerra Mundial pelo Corpo de

Engenheiros do Exército Americano.

Conforme Guimarães e Motta (2000), no meio rodoviário brasileiro a laterita é conhecida como um solo concrecionado enriquecido com óxidos hidratados de ferro ou alumínio, tendo a caulinita como argilo-mineral predominante, possuindo coloração vermelha, amarela, marrom ou alaranjada.

O agregado laterítico é empregado preferencialmente lavado em misturas asfálticas, sendo resultante do processo de separação dos agregados graúdos desse material, maiores que 4,8mm, desta forma a quantidade de finos é reduzida (Bernucci *et al.*, 2022).

A depender da jazida onde são coletados os agregados lateríticos podem apresentar variação nas suas características físicas e químicas, podendo apresentar variação substancial em parâmetros como massa específica, absorção e resistência ao desgaste. Nogami e Villibor (1995) alertam que a grande variação de propriedades da laterita dificulta a previsão do seu comportamento.

O agregado laterítico apresenta características que o diferem do agregado granítico em misturas asfálticas, como por exemplo, alta absorção e uma baixa resistência à abrasão Los Angeles. A alta absorção do agregado laterítico faz com que este consuma maior quantidade de ligante asfáltico e é uma característica natural deste devido à sua alta porosidade, sendo um ponto desfavorável deste tipo de agregado (Martínez, 2003; Bernucci *et al.*, 2022), o que o assemelha a outros tipos de agregados alternativos que tendem a apresentar alta porosidade e conseqüentemente alta absorção de ligante.

Pelo fato de não existirem normas específicas para a determinação dos parâmetros físicos para a utilização dos agregados lateríticos em misturas asfálticas, são utilizados os parâmetros estabelecidos em norma para o agregado granítico, tido como ótimo para pavimentação.

### 2.3 VIABILIDADE TÉCNICA DO AGREGADO LATERÍTICO PARA MISTURAS ASFÁLTICAS

Diversos autores têm realizado pesquisas com agregados lateríticos em misturas asfálticas no intuito de referenciar sua utilização e conhecer as limitações do uso desse agregado nesse contexto. Amaral (2004), Moizinho (2007), Costa *et al.* (2016) e Cruz (2018) estudaram o comportamento do agregado laterítico em misturas asfálticas a partir da realização de ensaios estabelecidos em normas que se baseiam principalmente no desempenho dos agregados graníticos em misturas asfálticas.

Amaral (2004) realizou ensaios para 4 misturas: três intituladas “granulometria A”, feitas com o agregado laterítico, areia natural e fíler de calcário na faixa C do DNIT, utilizando três tipos de ligantes asfálticos: o CAP 50-60, IMP 5 e IPIPEN 60/25, os ligantes IMP 5 e IPIPEN 60/25, e uma mistura intitulada “granulometria B”, que utilizou o agregado laterítico, seixo de rio, areia natural e fíler de calcário na faixa 12,5 da metodologia Superpave, o ligante utilizado foi o CAP 50/60. O objetivo da autora foi analisar a



possibilidade de utilizar as concreções lateríticas lavadas com agregados em rodovias de baixo nível de tráfego.

As misturas de granulometria A com laterita lavada apresentaram maior consumo de ligante devido a alta porosidade dos agregados e por possuir uma curva granulométrica com alto percentual de agregados miúdos, o que, segundo a autora, causou uma maior superfície específica e conseqüentemente maior consumo de ligante para envolver todas suas partículas. A mudança de granulometria para a faixa B provou-se benéfica para reduzir a formação de ATR (afundamento de trilha de roda), já que foi feita uma redução do percentual de agregados miúdos (de cerca 50% para cerca de 30%), além de ter havido redução do percentual do agregado laterítico com a adição do seixo de rio (ficando em cerca de 30% para cada), dessa forma, a mistura de granulometria B foi a única a apresentar resultados satisfatórios de ATR, de acordo com os parâmetros franceses de 10% de afundamento na trilha de roda para 30.000 ciclos.

A autora ressalta que a queda significativa de deformação permanente foi obtida por ter aumentado provavelmente o travamento granular ou a resistência ao cisalhamento da mistura dada a distribuição mais densa, o que acarretou uma redução de teor de ligante, que, segundo a autora, sempre leva a uma redução de deformação permanente.

A mistura de granulometria A utilizando apenas a concreção laterítica como agregado graúdo e ligante IPIPEN 60/25, foi a que apresentou resultados superiores nos ensaios Marshall, resistência à tração, módulo de resiliência e de fadiga por compressão diametral, porém devido ao alto valor de deformação permanente, possivelmente causado pelo alto consumo de ligante do agregado, seu uso foi considerado pela autora mais apropriado para vias de baixo volume de tráfego, atendendo a meta da pesquisa.

Moizinho (2007) utilizou agregados lateríticos provenientes de jazidas do estado de Roraima e do Distrito Federal e o CAP 50/70 como ligante para compor quatro misturas alifáticas a quente. Os agregados foram lavados e secados ao ar e após isso foram britados e enquadrados na faixa C do DNIT, sendo mantida a mesma granulometria para as misturas e variando apenas o agregado. A composição das misturas foi de cerca de 32,5% de agregado graúdo laterítico, 60% de areia laterítica e 7,5% de fíler laterítico.

Os agregados com lavagem e sem lavagem apresentaram adesividade satisfatória apesar de sua elevada porosidade. Os resultados obtidos mostraram diferentes comportamento dos agregados lateríticos em relação aos parâmetros de resistência medidos, tendo, por exemplo, a massa específica dos agregados variado em função do diâmetro, além do comportamento mecânico de alguns tipos de agregados se apresentado fortemente sensível à variação de temperatura. Essa relação foi perceptível no ensaio de abrasão em que o autor concluiu que os materiais com maiores quantidades de areia na sua constituição apresentaram-se com pouco susceptibilidade à variação de temperatura, mantendo o nível de desgaste mais equilibrado sob as variações de temperatura nos ensaios, principalmente sob altas temperaturas (mais parecidas com as condições de intenso tráfego). O autor conclui que esses agregados que se mostraram menos suscetíveis às variações de temperatura e que conseqüentemente apresentaram resultados mais equilibrados nos ensaios de abrasão podem ser utilizados inclusive em

condições de tráfego pesado.

Costa et al. (2016) analisaram a influência das propriedades mecânicas do agregado laterítico em misturas asfálticas. Foi utilizado agregado granítico proveniente da cidade de Caruaru (PE) em comparação com o agregado laterítico oriundo de uma jazida de concreções lateríticas localizada a 6 km da cidade de Mari (PB). O ligante utilizado foi o CAP 50/70, além disso as misturas foram compostas por areia quartzosa, pó de pedra e cal.

De maneira geral as misturas estudadas atenderam a maioria das especificações estabelecidas em norma. A partir dos resultados dos ensaios foi observado que as lateritas apresentaram dificuldade na moldagem dos corpos-de-prova devido à dificuldade de envolvê-las com o ligante, os autores afirmam que isso ocorreu devido à alta absorção da laterita (que foi cerca de nove vezes maior), que por ser um material muito poroso necessita de um maior teor de ligante para ser envolvida por completo. A mistura com laterita apresentou resultados inferiores nos ensaios de Abrasão Los Angeles e Cântabro, pois apresentaram maior arrancamento progressivo de agregados da capa de rolamento por efeito do atrito pneu-pavimento (desgaste). Ambas as misturas apresentaram resultados parecidos em seus comportamentos mecânicos, sendo apenas o módulo de resiliência maior para a mistura com a laterita (cerca de 30%), porém ainda dentro do preconizado. Neste trabalho a adesividade da laterita foi insatisfatória, porém os autores ressaltam que isto não é um fator determinante para sua não utilização na pavimentação pois é possível o uso de melhoradores de adesividade.

Cruz (2018) teve por objetivo avaliar a influência das características morfológicas de agregados graníticos e lateríticos e dos métodos de seleção granulométrica na resistência de misturas asfálticas. A pesquisa utilizou dois tipos de agregados graúdos, um agregado granítico, obtido na cidade de Campina Grande – Paraíba, e um agregado laterítico, obtido na cidade de Mari – PB. Foram realizados diversos ensaios nos agregados, dentre eles: granulometria, massa específica e absorção, índice de forma, equivalente de areia, partículas alongadas e achatadas, partículas fraturadas, angularidade, durabilidade, adesividade e abrasão Los Angeles, além disso foi as amostras foram submetidas ao AIMS2 (Aggregate Image Measurement System - 2) a fim de avaliar com mais precisão as características de angularidade, textura e forma. Os métodos de seleção granulométrica foram os seguintes: o método do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte), o Bailey e o método Francês.

Os resultados obtidos evidenciaram que a mistura com o agregado granítico selecionado pelo método DNIT (que é o tipo mais convencional) apresentou melhor desempenho para a maioria dos ensaios realizados em comparação com as demais. A mistura com o melhor desempenho dentre as que utilizaram o agregado laterítico foi a que utilizou o método de seleção granulométrica francês. Em diversos ensaios os agregados lateríticos apresentaram resultados inferiores aos limites preconizados pelos órgãos rodoviários brasileiros, como nos ensaios físicos, onde se vale mencionar a absorção (foi apresentado o dobro do limite estabelecido), a adesividade (insatisfatória para ambos os agregados), a porosidade da mistura com laterita só foi satisfatória para

a mistura selecionada pelo método Bailey.

Por fim, a autora conclui que as discrepâncias apresentadas para as misturas formadas pelos agregados lateríticos podem ser explicadas pelo fato de as normas brasileiras se basearem nas propriedades dos agregados graníticos, sendo necessária a verificação de valores limite mais apropriados às características das lateritas. Além do fato de que a caracterização física dos agregados não deve ser o único critério de escolha para aplicação em misturas asfálticas, sendo importante a realização de procedimentos que também se baseiam em outros parâmetros antes de definir o material como impróprio para a pavimentação.

Por fim, a autora conclui que as discrepâncias apresentadas para as misturas formadas pelos agregados lateríticos podem ser explicadas pelo fato de as normas brasileiras se basearem nas propriedades dos agregados graníticos, sendo necessária a verificação de valores limite mais apropriados às características das lateritas.

A tabela 2.1 apresenta um resumo dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização da laterita nas pesquisas apresentadas e a média aritmética dos valores numéricos. Observa-se que, apesar de apresentar resultados similares para a maioria dos parâmetros estudados, a laterita pode apresentar alta variação de algumas de suas propriedades a depender da jazida escolhida, como por exemplo, porosidade variável, conforme se observa na variação do percentual de absorção apresentado, indo de cerca de 4,94% (para a laterita pesquisada da Jazida de Mari-PB) à 13,3% (para a laterita da jazida localizada em Brasília, no Distrito Federal, intitulada de “Jazida J275” pelo autor da pesquisa).

Nota: os valores foram arredondados para 2 casas decimais.

Tabela 1 – Propriedades dos agregados lateríticos.

Parâmetros	Jazidas dos agregados/resultados								Valores médios
	Amaral	Moizinho				Costa <i>et al.</i>	Cruz		
	Jazida Nazareno	JEURI	J406	J275	BVRR	Mari	Brita Laterítica 19.0 mm	Brita Laterítica 9.5 mm	
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	2,67	3,01	2,91	2,85	2,99	2,66	3,01	3,10	2,79
Absorção (%)	8,15	8,90	8,80	13,30	5,00	4,94	5,26	5,67	7,50
Índice de forma	1,90	0,60	0,60	0,40	0,60	0,93	0,93	0,78	0,84
Abrasão Los Angeles (%)	46,00	33,40	37,50	56,10	53,00	40,66	39,10	31,20	42,12
Adesividade	satisfatório	satisfatório	satisfatório	satisfatório	satisfatório	insatisfatório	insatisfatório	insatisfatório	Maioria satisfatório

Fonte: Amaral (2004); Moizinho (2007); Costa *et al.* (2016); Cruz (2018).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais utilizados na realização deste trabalho e os métodos seguidos para a realização dos ensaios de caracterização do agregado laterítico.

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Agregado laterítico

O agregado utilizado foi a concreção laterítica proveniente da jazida da jazida localizada no km 675, da obra de construção da Ferrovia Norte – Sul, no município de Barrolândia – TO (Figura 3.1).

*Figura 4 - laterita britada utilizada.*

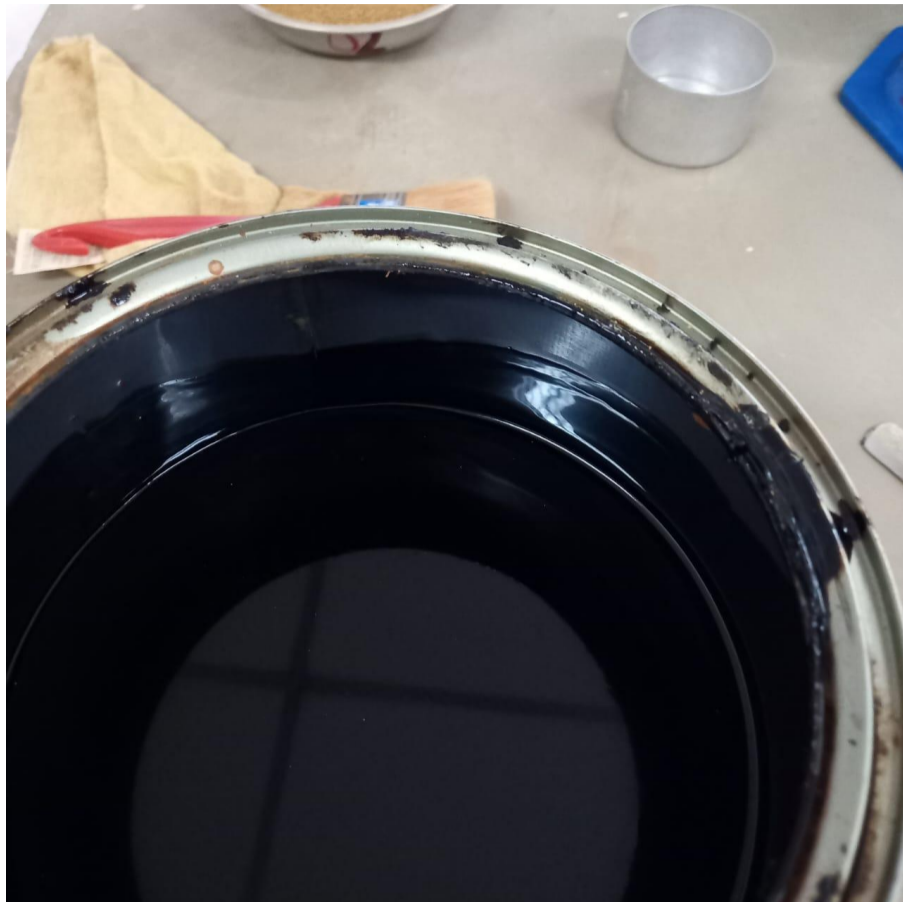


*Fonte: O Autor (2023).*

##### 3.1.2 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico escolhido foi o cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70 Fornecido pela empresa Betunel Indústria e Comércio Ltda. (Figura 3.2).

*Figura 5 - ligante asfáltico utilizado.*



*Fonte: O Autor (2023).*

## 3.2 MÉTODOS

A metodologia adotada foi baseada nas especificações normativas nacionais estabelecidas pelo DNIT e consistiu principalmente na caracterização física do agregado laterítico.

### 3.2.1 Beneficiamento do agregado laterítico

Foi necessário realizar um beneficiamento prévio do agregado laterítico devido à alta quantidade de material pulverulento (aqueles com dimensões inferiores a 0,075mm), que poderiam comprometer a adesividade do agregado ao ligante asfáltico. Desta forma, foi realizada a lavagem do agregado laterítico seguido de secagem em estufa por 24 horas numa temperatura entre 105°C e 110°C, conforme figura 3.3:

Figura 6 – agregado laterítico lavado depositado em estufa para secagem.



Fonte: O Autor (2023).

### 3.2.2 Granulometria do Agregado laterítico

O ensaio para determinar a granulometria do agregado foi executado de acordo com a norma DNIT 412/2019 – ME. O objetivo do ensaio foi determinar a distribuição granulométrica das partículas do agregado.

Primeiro foi realizado o peneiramento manual da amostra do agregado seguido da pesagem do material retido em cada fração. Em seguida foi calculado o peso em percentual do material retido em cada peneira sobre a massa total da amostra, desta forma foi definida a curva granulométrica do material ensaiado.

### 3.2.3 Índice de forma

A norma DNIT 425/20 foi a referência para a realização deste ensaio, que tem por objetivo determinar o índice de forma de agregados graúdos, utilizando o paquímetro.

O índice de forma é obtido a partir de uma relação da média entre o comprimento e a espessura das partículas do agregado, ponderada pelas proporções de cada fração granulométrica que compõem o agregado ensaiado, obtidas após peneiramento da amostra.

A princípio foi necessário determinar o número de grãos de cada fração que seriam medidos para determinar os valores médios de comprimento e espessura. O valor da porcentagem da massa dos agregados retida em cada peneira foi aplicado à seguinte fórmula para determinação da quantidade de amostras medidas em cada fração (sendo 200 o total de amostras medidas):

$$N_i = \frac{200}{\sum_{i=1}^n F_i} \times F_i \quad (1)$$

Onde:

**200** – Número de partículas necessárias para o ensaio;

$N_i$  – Número de partículas da fração  $i$  (número de partículas a serem medidas na fração  $i$ );

$F_i$  – Percentual da fração  $i$  (Percentual de massa retida na fração  $i$ );

$\sum_{i=1}^n F_i$  - Soma das porcentagens retidas em cada fração. Quando o  $N_i$  for fracionário deve-se arredondar ao número inteiro mais próximo.

Após medir as amostras, foi dividida a média aritmética do comprimento pela média aritmética da espessura (c/e) e obtido o índice de forma. Os resultados foram arredondados para a casa decimal mais próxima.

#### 3.2.4 Massa Específica e Absorção

A massa específica do agregado é uma relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluídos os vazios permeáveis. A absorção é o aumento da massa do agregado, devido ao preenchimento dos seus poros por água, expresso como porcentagem de sua massa seca. Os ensaios para determinação da massa específica e absorção se basearam na norma DNER-ME 195/97, que referencia os procedimentos para os ensaios de determinação da massa específica e absorção dos agregados graúdos. No ensaio, os agregados foram submersos em água, à temperatura ambiente, durante 24 horas e após isso foram removidos e espalhados sobre um pano absorvente e secados até que a película visível de água fosse removida (Figura 3.4), após isso, os agregados foram pesados para determinar a massa da amostra na condição saturada superfície seca (B). Subsequentemente, a amostra foi submersa em tanque e pesada para se determinar a massa do agregado imerso em água (C). Por fim, a amostra foi retirada e secada em temperatura entre 105°C e 110°C e pesada para se determinar a massa do agregado seco (A). A partir das equações I e II foram determinados os seguintes dados:



Equação I - Massa específica na condição seca:

$$\gamma_s = \frac{A}{B-C} \quad (2)$$

Onde:

$\gamma_s$  = massa específica do agregado na condição seca, em kg/dm<sup>3</sup> ou em g/cm<sup>3</sup>;

A diferença ( $B - C$ ) é numericamente igual ao volume do agregado, excluindo-se os vazios permeáveis.

Equação II - Absorção:

$$a = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

$a$  = absorção do agregado, em porcentagem;

*Figura 7 – agregado secado superficialmente após ser removido do tanque.*



*Fonte: O Autor (2023).*

Figura 8 - agregado sendo pesado para determinação da massa do agregado seco.



Fonte: O Autor (2023).

### 3.2.5 Adesividade

A adesividade do agregado é a característica de deixar-se aderir pelo ligante asfáltico. O ensaio para se determinar a adesividade do agregado ao ligante asfáltico se baseou na norma DNIT ME 078/94. De acordo com a norma, a verificação da adesividade ocorre por meio do não descolamento da película betuminosa que recobre o agregado, quando a mistura agregado-ligante é submetida, a 40°C, à ação de água destilada, durante 72 horas.

A importância deste ensaio se verifica pelo fato de que um agregado que apresenta fácil descolamento da película asfáltica na presença de água é insatisfatório para uso em misturas asfálticas, principalmente devido à alta exposição às intempéries climáticas que as camadas de revestimento dos pavimentos asfálticos estão.

A princípio, agregado e ligante foram aquecidos a temperaturas de cerca de 120°C e 100°C, respectivamente. Em seguida o agregado foi envolvido com o ligante asfáltico com o auxílio de espátula em recipiente preconizado na norma. Por fim, a mistura do agregado envolvido pelo ligante devidamente resfriada foi colocada em recipiente de vidro e foi totalmente recoberta com água destilada e depositada em estufa a 40°C e mantida em repouso durante 72 horas.

Por ser um método empírico o resultado é obtido através de uma avaliação visual do descolamento da película asfáltica do agregado após as 72 horas. Quando não há

deslocamento da película de ligante, o agregado possui adesividade satisfatória. Caso exista deslocamento parcial ou total da película de ligante, o agregado possui adesividade insatisfatória.

### 3.2.6 Abrasão Los Angeles

Devido às dificuldades de realizar o ensaio e tendo em vista a sua importância, foi tomado por referência os dados do ensaio de abrasão da pesquisa de Araújo (2009), que utilizou uma amostra de laterita proveniente da mesma jazida, portanto, possui as mesmas características da amostra estudada neste trabalho. A pesquisa de Araújo (2009) estudou a utilização das concreções lateríticas como agregado graúdo na fabricação de concreto destinado a execução das placas do pavimento que obedece aos mesmos procedimentos para realização do ensaio de abrasão em misturas asfálticas.

O ensaio Araújo (2009) se baseou na NBR NM 51, que descreve os procedimentos para a realização deste ensaio, que tem por objetivo determinar o desgaste sofrido pelo agregado, quando colocado na máquina “Los Angeles” juntamente com uma carga abrasiva (Um número variado de esferas de aço, conforme a granulometria da amostra), submetido a um determinado número de rotações da máquina à velocidade de 30 rpm a 33 rpm. O desgaste é convencionalmente expresso pelo percentual, em peso, do material que fica retido na peneira nº 12 (1,7 mm), em relação ao percentual da massa inicial da amostra especificada. Sendo um limite máximo para os valores de abrasão convencionalmente definido em cerca de 55%. A norma DNER-ME 035/98 e a ABNT NBR 16974 de 03/2022 também são tomadas por referência para a realização deste ensaio em pavimentos.

Verifica-se a importância deste ensaio pelo fato de que os agregados localizados próximo ou na superfície do pavimento devem apresentar resistência à abrasão maior do que os localizados nas camadas inferiores, desta forma, esse ensaio simula as condições de tráfego a que os agregados utilizados em pavimentos podem estar sujeitos.

### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo estão descritos os resultados dos ensaios de caracterização realizados com o agregado laterítico, de granulometria, índice de forma, massa específica e absorção, e adesividade.

#### 4.1 GRANULOMETRIA DO AGREGADO LATERÍTICO

A Tabela 4.1 e a Figura 4.1 apresentam os valores obtidos da distribuição granulométrica do agregado laterítico.

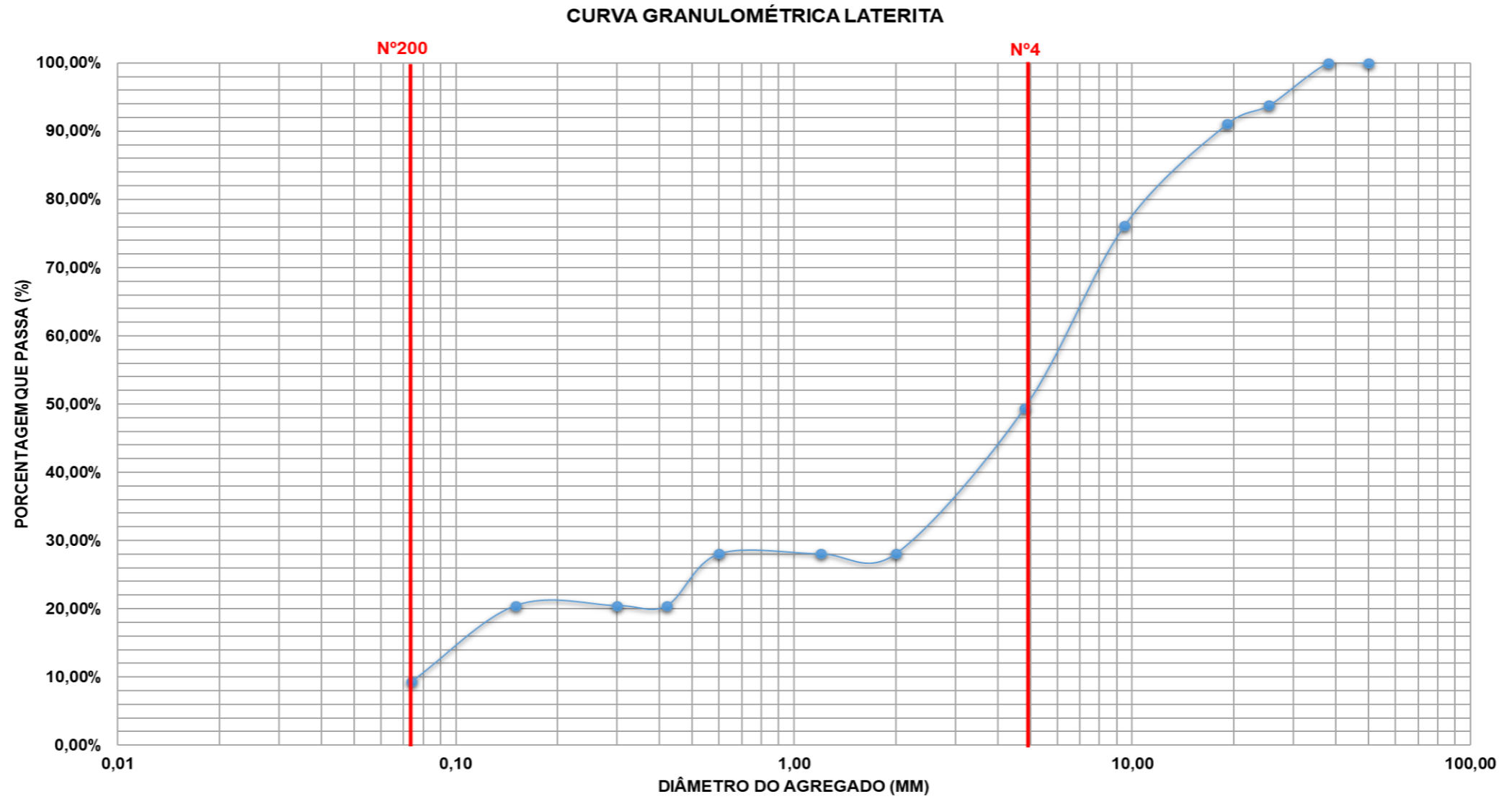
A partir da Tabela 4.1 é possível observar que cerca de 50,62% do material ficou acumulado até a peneira de abertura de 4,80 mm, sendo estas frações caracterizadas como pedregulho, enquanto que 40,10% do material ficou acumulado entre as peneiras de abertura de 2,0 mm à de 0,074 mm, os 9,28% restantes que passaram na peneira de nº 200, que são os materiais pulverulentos, a norma os define como Partículas minerais com dimensões inferiores a peneira nº 200 (0,075 mm), incluindo os materiais solúveis em água, presentes nos agregados. Esse dado demonstra a grande quantidade de finos na amostra e é uma característica das concreções lateríticas, por isso é recomendável realizar a lavagem da laterita previamente à sua utilização, pois estes finos podem afetar o desempenho do material em misturas asfálticas, prejudicando sua adesividade ao ligante e elevando seu consumo de ligante asfáltico, além de possivelmente aumentar a chance de desenvolver trincas no pavimento, conforme demonstrado na pesquisa de Amaral (2004).

**Tabela 2 - Composição granulométrica das concreções lateríticas.**

Concreções lateríticas						
Peneira (ASTM)	Abertura de malha (mm)	Massa retida (g)	Massa acumulada (g)	Retido (%)	Acumulado (%)	Passando (%)
2"	50,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
1.1/2"	38,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
1"	25,40	124,00	124,00	6,20%	6,20%	93,80%
3/4"	19,10	54,20	178,20	2,71%	8,91%	91,09%
3/8"	9,50	297,80	476,00	14,89%	23,80%	76,20%
4	4,80	536,40	1012,40	26,82%	50,62%	49,38%
10 - 9	2,00	426,80	1439,20	21,34%	71,96%	28,04%
16 - 14	1,20	-	-	-	71,96%	28,04%
30 - 28	0,60	-	-	-	71,96%	28,04%
40 - 35	0,42	152,00	1591,20	7,60%	79,56%	20,44%
50 - 48	0,30	-	-	-	79,56%	20,44%
100	0,15	-	-	-	79,56%	20,44%
200	0,074	223,20	1814,40	11,16%	90,72%	9,28%
		185,60	2000,00	9,28%	100,00%	0,00%
Amostra total (g)		2000,00				

Fonte: O Autor (2023).

Figura 9 - Curva granulométrica das concreções lateríticas



Fonte: O Autor (2023).

## 4.2 ÍNDICE DE FORMA

A quantidade de grãos medidos dos que ficaram retidos em cada peneira ficou definida em 52 grãos do percentual retido na peneira 25, 23 grãos do percentual retido na peneira 19 e 125 grãos do percentual retido na peneira 9,5, totalizando 200 grãos conforme o preconizado.

O índice de forma da amostra pesquisada ficou em cerca de 1,44. O índice de forma dos agregados graúdos geralmente varia de 0,0 a 1,0, sendo o agregado considerado de ótima cubicidade quando o valor estiver próximo de 1,0 e considerado lamelar quando estiver próximo de 0,0. O agregado laterítico apresenta-se satisfatório de acordo com este parâmetro, apesar de ter apresentado forma superior a 1, já que o limite máximo recomendado é 3 e o limite mínimo recomendado é 0,5.

## 4.3 MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO

A absorção da laterita ensaiada ficou em cerca de 4,69% e a massa específica na condição seca em cerca de 2,62 g/cm<sup>3</sup>, a partir dos valores obtido da pesagem do agregado (figuras 3.4 e 3.5), conforme valores demonstrados abaixo:

Equação I - Massa específica na condição seca:

$$\gamma_s = \frac{2772,3 (A)}{2483,56 (B) - 1425,43 (C)} \quad (4)$$

$$\gamma_s = 2,62 \text{ g/cm}^3$$

A = massa do agregado seco, em kg ou g;

B = massa do agregado na condição saturada superfície seca, em kg ou em g;

C = massa do agregado imerso em água.

Equação II - Absorção:

$$a = \frac{2483,56 (B) - 2372,30 (A)}{2372,30 (A)} \times 100 \quad (5)$$

$$a = 4,69\%$$

Esse valor de absorção do agregado laterítico é relativamente alto, pois o valor ideal de absorção de acordo com a norma é menos de 2,00%, o que indica que o agregado laterítico possui alta porosidade e, conseqüentemente, um maior consumo de ligante asfáltico. Esse valor é característico do agregado laterítico e segue o mesmo padrão apresentado em outros trabalhos publicados.

A alta porosidade da laterita é um fator relevante na sua escolha como agregado

graúdo, sabendo que esta propriedade afeta diretamente no teor de ligante da mistura asfáltica, o que pode encarecer as misturas com este agregado, considerando-se também o aumento constante do preço do petróleo. Outro fator a se levar em conta é a problemática da dosagem, sabendo que o concreto asfáltico, por exemplo, que é uma mistura com composição granulométrica bem graduada (com poucos vazios na mistura) é muito sensível à variação do teor do ligante asfáltico, desta forma, pequenas variações de teores de ligante asfáltico podem gerar excesso ou falta em relação ao teor de projeto, afetando o seu comportamento mecânico, podendo ocasionar trincas por fadiga ou deformações permanentes.

#### 4.4 ADESIVIDADE

As figuras 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam a mistura do agregado com o ligante asfáltico, que, após serem aquecidos e misturados, foram depositados em estufa em um recipiente com água destilada por 72 horas a 40° C. Após a amostra ser retirada da estufa, foi observado que houve descolamento parcial da película asfáltico dos agregados (figuras 4.5 e 4.6), desta forma, verificou-se o efeito da água de descolar a película de ligante asfáltico da superfície do agregado.

É importante destacar que para a realização deste ensaio a laterita foi lavada mais uma vez, além do beneficiamento prévio, e mesmo assim apresentou considerável quantidade de finos na sua superfície, o que aponta necessidade de ser realizada uma lavagem mais prolongada da laterita para verificar a influência dos finos na adesividade.

Desta forma, a laterita ensaiada apresentou adesividade insatisfatória, demonstrando a necessidade do uso de melhoradores de adesividade (conhecidos como “dope” no Brasil) para terem um melhor desempenho caso apresentem a alta quantidade de finos da amostra ensaiada.

*Figura 10 - separação da amostra para o ensaio.*



*Fonte: O Autor (2023).*



Figura 11 - mistura do agregado com o ligante asfáltico



Fonte: O Autor (2023).

Figura 12 – Amostra após 72 horas com descolamento da película asfáltica



Fonte: O Autor (2023).

#### 4.5 ABRASÃO LOS ANGELES

O desgaste do material ensaiado na pesquisa de Araújo (2009) ficou em cerca de 35,04%, o que enquadra a amostra da laterita ensaiada dentro dos limites aceitáveis, demonstrando que houve pouco desgaste no atrito das partículas do agregado e o material abrasivo durante o giro do tambor.

Este valor de abrasão do material ensaiado está próximo da média dos valores apresentados em outros estudos com a laterita e bem próximo dos valores médios dos trabalhos apresentados na revisão deste trabalho (42,12%), porém a variação nos valores de abrasão apresentados em lateritas de determinadas jazidas encoraja uma escolha

critérioria do material, observando sua origem e atentando-se ao fato de que apesar de algumas lateritas apresentarem altos valores de abrasão (como a laterita da Jazida denominada "J275" apresentada na revisão, com valor de 56,10%) isto não se caracteriza como um fator determinante para se excluir as concreções lateríticas como uma solução de agregado alternativo, tendo em vista que materiais de determinadas jazidas apresentam características satisfatórias.

É importante ressaltar que a norma DNIT - ES 031/2006 admite excepcionalmente agregados com valores de abrasão maiores do que 50%, no caso de terem apresentado comprovadamente desempenho satisfatório em utilização anterior.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este capítulo apresenta as conclusões gerais obtidas a partir dos resultados dos ensaios de caracterização realizados com a laterita e sugestões de pesquisas futuras.

### 5.1 CONCLUSÕES

A partir dos ensaios realizados com o agregado laterítico é possível inferir que os parâmetros para a utilização do agregado laterítico se baseiam nos valores preconizados em normas que tomam os agregados convencionais como referência, porém ele apresenta determinadas características próprias que não necessariamente o excluem como um material alternativo para a pavimentação, como a absorção, que geralmente apresenta um valor consideravelmente maior que o do agregado granítico, por exemplo. A partir daí, verifica-se a necessidade de estabelecer normas próprias para o uso do agregado laterítico, pois sua utilização já se mostrou eficaz a longo prazo como solução de agregado para revestimentos de rodovias, conforme demonstrado na revisão deste trabalho.

A laterita apresentou alta absorção e adesividade insatisfatória, o que demonstra a necessidade de se elevar o consumo de ligante asfáltico para misturas com a laterita, além de acrescentar melhorador de adesividade à mistura.

A laterita estudada demonstrou considerável resistência ao desgaste mecânico, verificado através do ensaio de abrasão Los Angeles, o que demonstra que a laterita desta jazida possui característica de resistência mecânica satisfatória.

As características morfológicas do material estudado se mostram satisfatórias para a utilização em misturas asfálticas, visto que sua distribuição granulométrica e índice de forma se mostram similares às características esperadas para os agregados convencionais.

Por fim, conclui-se que as concreções lateríticas se mostram uma alternativa viável aos agregados convencionais, apesar de apresentarem maior consumo de ligante asfáltico devido à sua alta porosidade e adesividade insatisfatória, problema este que pode ser contornado com o uso de melhoradores de adesividade. Apesar de apresentarem maior consumo de ligante asfáltico e adesividade insatisfatória, o custo global destas misturas, ainda assim, tende a ser inferior ao gasto da importação dos agregados convencionais em determinadas regiões. Desta forma, cabe analisar qual solução mais se adequa ao contexto, tendo em vista que misturas com materiais inadequados tendem a apresentar um alto custo a longo e, talvez até, curto prazo com manutenções, reparos e até reconstruções.

## 5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como sugestões para pesquisas futuras propõe-se: estudar o desempenho de misturas asfálticas da laterita com ligante asfáltico utilizando melhorador de adesividade (dope); verificar a adesividade da laterita a diferentes tipos de ligantes asfálticos; executar misturas com a laterita com uma lavagem mais prolongada desta, para eliminar maior quantidade de finos possível e assim verificar a influência dos finos na adesividade ao ligante; avaliar o impacto dos finos nas propriedades mecânicas das misturas com a laterita, como a sua resistência; estudar a viabilidade econômica do uso da laterítica como agregado graúdo em pavimentos flexíveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEDA. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2010.
- AMARAL, S. D. C. **Estudos de misturas laterita-asfalto da região metropolitana de Belém-PA para revestimento de pavimentos**. Tese de doutorado - Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo. 2004.
- ARAÚJO, R. B. **Estudo das concreções lateríticas de Tocantins como agregado graúdo na fabricação de Concreto de Cimento Portland destinado a pavimentação rodoviária**. Dissertação de Mestrado-UFCG. Campina Grande, PB. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 51: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”**. Rio de Janeiro. 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16974: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão Los Angeles**. Rio de Janeiro. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO. **Utilização da laterita em pavimentação**. ABPv.- Relatório Técnico Nº 9, Editora Gráfica Luna LTDA. Rio de Janeiro, p. 47. 1976.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 1ª. ed. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2007.
- BASTOS, J. B. D. S. **Considerações Sobre a Deformação Permanente de Pavimentos Asfálticos no Dimensionamento Mecânico – Empírico**. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2016.
- BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica Formação básica para engenheiros**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022.
- CHAGAS FILHO, M. B. **Estudo de Agregados Lateríticos para utilização em Concretos Estruturais**. Tese de Doutorado - CCT/UFCG. Campina Grande, PB. 2005.
- CONSELHO NACIONAL DE TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de rodovias 2017: relatório gerencial**. CNT: SEST: SENAT. Brasília. 2017.
- CONSELHO NACIONAL DE TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de rodovias 2022**. CNT: SEST: SENAT. Brasília. 2022.
- COSTA, L. F. D. et al. Avaliação do uso de agregados lateríticos em misturas asfálticas. **45° RAPv, 19° ENACOR**, Brasília-DF, setembro 2016.
- COSTA, M. L. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. **Brazilian Journal of Geology**, v. 21, n. 2, p. 146-160, 1991.
- CRUZ, G. K. A. **Influência das propriedades morfológicas e dos métodos de seleção granulométrica nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas**. Dissertação de mestrado - UFCG. Campina Grande, PB. 2018.
- CUNHA, M. J. A. et al. Efeito da temperatura no comportamento mecânico de misturas asfálticas com agregados sinterizados de argila calcinada (ASAC). **Matéria (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, 2018.
- DNER-ME 035/98. **Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”**. DNER. Rio de Janeiro, RJ. 1998.
- DNER-ME 078/94. Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso, Rio de Janeiro, RJ, 1994.
- DNER-ME 195/97. Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo, Rio de Janeiro, RJ, 1997.
- DNIT 031/2006 - ES. Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de Serviço, Rio de Janeiro, 2006.
- DNIT 095/2006 - EM. Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material, Rio de

Janeiro, RJ, 2006.

DNIT. **MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006.

DNIT 412/2019 - ME. Pavimentação - Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – Método de ensaio, Brasília, DF, 2019.

DNIT 425/2020 - ME. Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com paquímetro – Método de ensaio, Brasília, DF, 2020.

ESPINDOLA, C. R.; DANIEL, L. A. Laterita e solos lateríticos no Brasil. **Boletim Técnico da FATECSP BT/ 24**, p. 21-24, 2008.

FREITAS, H. B. D.; MOTTA, L. M. G. D. Uso de escória aciaria em misturas asfálticas de módulo elevado. **TRANSPORTES**, v. XVI, n. 2, p. 5-12, 2008.

FROTA, C. A. et al. Desempenho mecânico de misturas asfálticas confeccionadas com agregados sintéticos de argila calcinada. **Cerâmica**, p. 255-262, setembro 2007.

GOUVEIA, L. T. **Contribuições ao estudo da influência de propriedades de agregados no comportamento de misturas asfálticas densas**. Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos - USP. São Paulo. 2006.

GUIMARÃES, A. C. R.; MOTTA, L. M. G. Execução de revestimentos asfálticos com agregado de laterita lavada no Acre. **Anais do 15º Encontro de Asfalto do IBP**, Rio de Janeiro, 2000. 86-95.

JESUS, F. F. S. **Análise comparativa de uma mistura asfáltica ensacada comercial com um pré-misturado a frio e um concreto asfáltico**. Dissertação de mestrado – UFCG. Campina Grande, PB. 2021.

LUCENA, L. C. D. F. L. **Verificação da influência do uso de resíduos industriais como filer em misturas asfálticas sob o efeito da presença d'água**. Campina Grande, PB: Dissertação de Mestrado-UFCG, 2009.

MARTINEZ, G. **Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Lateríticos da Formação Barreiras**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre. 2003.

MEDINA, J. D.; MOTTA, L. M. G. D. **Mecânica dos Pavimentos**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015.

MOIZINHO, J. C. **Caracterização e uso de agregados lateríticos do Distrito Federal e do Estado de Roraima em CBUQ**. Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Brasília, DF. 2007.

MOTTA, R. D. S. **Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético**. Tese de Doutorado – USP. São Paulo. 2011.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia / COPPE/ UFRJ. Rio de Janeiro. 2008.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo, p. 213. 1995.

OLIVEIRA, D. R. C. et al. Propriedades mecânicas de concreto laterítico com metacaulim. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, p. 25-31, 2011.

PAZOS, A. G. **Efeito de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil / COPPE/ UFRJ. Rio de Janeiro. 2015.

PORTELINHA, F. H. M. et al. Modification of a Lateritic Soil with Lime and Cement: An Economical Alternative for Flexible Pavement Layers. **Soils and Rocks**, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 51-63, 2012.

ROBERTS, F. L. et al. **Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction**. 2<sup>a</sup>. ed. Maryland, USA: Natl Asphalt Pavement Assn, 1996.

SOUZA, J. L. F. **Estudo de Durabilidade de Concretos e Argamassas Através de RAA em Agregados Convencionais da Região de Campina Grande e Alternativos em Concreções Lateríticas Sapé-PB e Jacumã-PB**. Pós-graduação em Geotecnia CTRN/UFCG, Dissertação de mestrado. Campina Grande, PB. 2007.