UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Irauna Maicona Rodrigues de Carvalho

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO FUNCIONAL DE UM REVESTIMENTO ASFÁLTICO DO TIPO CA

Manaus
2024

IRAUNA MAICONA RODRIGUES DE CARVALHO

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO FUNCIONAL DE UM REVESTIMENTO ASFÁLTICO DO TIPO CA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.
Área de concentração: Materiais.
Linha de pesquisa: Propriedades físicas, mecânicas e modelagem de materiais.

Orientador(a): Profa. Dra. Consuelo Alves da Frota

Manaus

2024

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

C331d

Carvalho, Irauna Maicona Rodrigues de
Avaliação do desempenho funcional de um revestimento asfáltico do tipo CA / Irauna Maicona Rodrigues de Carvalho . 2024
61 f.: il. color; 31 cm.

Orientadora: Consuelo Alves da Frota
Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Concreto Asfáltico. 2. Desempenho Funcional. 3. Índice de Irregularidade. 4. Macrotextura. 5. Densidade In Situ. I. Frota, Consuelo Alves da. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

IRAUNA MAICONA RODRIGUES DE CARVALHO

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO FUNCIONAL DE UM REVESTIMENTO ASFÁLTICO DO TIPO CA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.
Área de concentração: Materiais.
Linha de pesquisa: Propriedades físicas, mecânicas e modelagem de materiais.

Prof. Dra. Consuelo Alves da Frota (Orientadora e Presidente)
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM)

Prof. Dr José Costa de Macêdo Neto
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM)

Prof. Dra Jussara Socorro Cury Maciel
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM) – Membro Externo

Dedico o meu trabalho ao Deus eterno, ***Yeshua Adonai****, o Deus vivo de Israel, por sua infinita misericórdia e seu grandioso amor a todos os seres vivos desse universo.*

AGRADECIMENTOS

A Deus de Israel, por ter sido o criador do céu e a da terra. O detentor de todo conhecimento científico do universo.

À Iran Vieira de Carvalho, Jorge da Silva Dias Granja Filho e Dulcinéia Rodrigues Dutra, três grandes amores que sempre almejaram o meu bem. A vossa ausência física nesta terra fomenta dores e saudades, contudo, a permanecia do meu amor, mantém-se expressivamente presente.

À minha família, que forneceram o total apoio nos momentos de felicidades e dificuldades. Às mulheres da minha vida, a minha progenitora, Dulcijane Rodrigues, a qual sempre será minha referência de vida, e a minha amada esposa e companheira, Dra. Juliana Granja, a qual foi minha grande incentivadora, apoiadora e companheira desde 2013, sempre me apoiando nas decisões do nosso futuro, sendo a referência do significado de uma verdadeira mulher virtuosa. Meus sinceros agradecimentos a Deus por ter as colocadas em minha vida.

Aos meus dois pais, Iran Filho e Iraúna Carvalho, pelo incentivo a formação de qualidade e ao aperfeiçoamento profissional por meio do estudo. Aos meus tios, Eng. Mecânico Itaceny Carvalho e Eng. Mecânico Basilio Carvalho. A minha amada avó Izabel, pelos ensinamentos da realidade da vida. A minha sogra, Shirlene Granja, pelo apoio nos momentos de alegria e tristeza que enfrentamos juntos. A Sansa e ao Draco, pelo amor incondicional.

As minhas irmãs: Dra. Inayara Carvalho, Rebecca Carvalho, Itacyara Carvalho e Cristine Carvalho.

À minha professora orientadora, Prof. Dra. Consuelo Alves da Frota. Uma pessoa excepcional, que dedica a trajetória de sua vida, aos ensinamentos de Engenharia, e sobretudo, aos ensinamentos da vida!

À minha mentora, Prof. Dra. Jussara Socorro Cury Maciel, por ser a minha referência profissional e acadêmica. Tenho orgulho em ter sido seu aluno e estagiário.

Aos professores do Instituto Federal do Amazonas (IFAM): Prof. Luz Marina, Prof. Felipe Leão, Prof. Luiz Eduardo, Prof. Marcos Rayker, Prof. Nubia Cavalcante, e ao ex-reitor do IFAM, Prof. Eng. Civil Antônio Venancio *In Memoriam.*

A ARDO Construtora, em especial ao Eng. Civil Otemar, pela disponibilidade do uso dos equipamentos, da infraestrutura de sua empresa e por compartilhar o seu grandioso conhecimento das técnicas de construção. Aos colaboradores, o qual tive o prazer de ter criado

uma boa amizade na trajetória da realização dos ensaios: Welligton Santos, Fabio, Wendell Eloi, Thayná Queiroz e Marcelo.

Ao meu amigo, Eng. Civil Carlos Castro, o qual tive a honra e o prazer de ter sido companheiro nesta etapa. A sua paciência e seu magnifico conhecimento ajudaram-me na conclusão desse curso. A Eng. Civil e Mestre Anne Monteiro, por repartir o seu excelente conhecimento profissional e pela benignidade em ter apoiado 100% a elaboração dessa dissertação.

Aos meus amigos: Eng. Bruno Corrêa, Eng. Endriu Jr, Eng. Atila e Eng. Erick Sombra, a qual tive a oportunidade de ter sido companheiro de classe. Amizades a qual sempre irei compartilhar experiências profissionais e acadêmicas.

Aos meus amigos: Pastor Rainer Brasil, Pastor Thiago Martins e Aguinaldo Junior, por acompanharem minha trajetória há décadas.

Agradeço à CAPES e à FAPEAM (POSGRAD) pelo suporte financeiro.

O meu agradecimento a todos que ajudaram na elaboração dessa dissertação e disponibilizaram o apoio necessário!

Deus é minha confiança

"Não temas, pois eu sou contigo;
não te assombres, porque eu sou teu Deus;
Eu te fortaleço, e te ajudo, e te sustento
com a destra da minha justiça."

Isaías 41:10

RESUMO

O revestimento asfáltico constitui-se fator de grande importância no enfoque social e econômico das cidades. Para aferir o nível de qualidade dessa camada, faz-se necessário compreender a sua funcionalidade, concebida, em regra, segundo duas particularidades: Avaliação do desempenho funcional e a Avaliação do desempenho estrutural. A premissa do desempenho funcional proporciona ao condutor segurança e conforto. Contudo, para que essa funcionalidade tenha eficiência, também é necessária uma constante manutenção dos veículos. No tocante a pesquisa em pauta, avaliaram-se o desempenho funcional de revestimentos urbanos, do tipo Concreto asfáltico (CA), por meio análise do Índice de irregularidade, Macrotextura e Densidade *in situ*. Ressalta-se que, em grande parte da literatura e normas, tais considerações são realizadas em pavimentos de rodovias federais e estaduais. No trabalho em questão, investigaram-se avenidas e ruas do perímetro urbano da capital do Estado do Amazonas, concebendo uma inédita contribuição ao controle tecnológico desses revestimentos asfálticos. Os resultados mostraram que tais vias atenderam a citada funcionalidade, de acordo com a exigências dos órgãos governamentais e da literatura.

Palavras-chaves: Concreto Asfáltico, Desempenho Funcional, Índice de Irregularidade, Macrotextura e Densidade *In Situ*.

ABSTRACT

Asphalt coating is a factor of great importance in the social and economic focus of cities. To compare the quality level of this layer, it is necessary to understand its functionality, conceived, as a rule, according to two particularities: Assessment of functional performance and Assessment of structural performance. The performance of functional performance provides the driver with safety and comfort. However, for this functionality to be efficient, constant maintenance of the vehicles is also necessary. Regarding the research in question, the functional performance of urban coverings, of the Asphalt Concrete (AC) type, was evaluated through analysis of the Irregularity Index, Macrotexture and Density in situ. It is noteworthy that, in much of the literature and standards, such considerations are made on federal and state highway pavements. In the work in question, we investigated avenues and streets in the urban perimeter of the capital of the State of Amazonas, conceiving an unprecedented contribution to the technological control of these asphalt coatings. The results showed that these pathways met the functionality, in accordance with the requirements of government agencies and the literature.

Keywords: asphalt concrete, functional performance, roughness, macrotexture and in situ density.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação IRI em função do pavimento 21
Figura 2 - Categoria das texturas do pavimento 23
Figura 3– Equipamento MERLIN 29
Figura 4 - Exemplo de histograma de frequência 31
Figura 5 - Ensaio Mancha de Areia 33
Figura 6 – Execução do ensaio Mancha de Areia 33
Figura 7 - Execução da medição da Densidade *in situ* 35
Figura 8 – Curvas Granulométricas dos materiais minerais 38
Figura 9 – Curva Granulométrica da Massa Asfáltica 40
Figura 10– Valores do IRI 44
Figura 11– Mancha de Areia DNIT 47
Figura 12 – Mancha de Areia DNIT 48
Figura 13 – Medição do GC pelo Densímetro Eletromagnético 49
Figura 14 – Medição da Densidade pelo Densímetro Eletromagnético. 50
Figura 15 – Aferição da Temperatura pelo Densímetro Eletromagnético 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação IRI. Fonte: DNIT, 2011.....21
Tabela 2 - Estimativa de Rugosidade de Estradas Pavimentadas com Concreto Asfáltico ou Tratamento de Superfície. Fonte: Adaptado. ASTM, 2021.....22
Tabela 3 – Classificação Macrotextura. Fonte: DNIT (2006).....24
Tabela 4 - Diretriz DNIT. Fonte: Norma DNIT 031 (2006), adaptado.....28
Tabela 5 – Exemplo de 200 leituras. Fonte: Própria 30
Tabela 6 – Caracterização do CAP. Fonte: REMAN. 37
Tabela 7 – Coeficientes de Uniformidade e de Curvatura.....38
Tabela 8 – Composição dos agregados. Fonte: DNIT 2021 (Adaptado pelo Autor) 39
Tabela 9 – Parâmetros volumétricos. Fonte: Ardo Construtora. 39
Tabela 10 – Porcentagem de betume da Massa Asfáltica. Fonte: Ardo Construtora. 39
Tabela 11 – Composição do concreto asfáltico. Fonte: DNIT 2006 (Adaptado pelo Autor)...40
Tabela 12 – Porcentagens dos integrantes da mistura asfáltica estudada. Fonte: Autor 40
Tabela 13 – Parâmetros volumétricos. Fonte: Ardo Construtora. 41
Tabela 14 – Ruas avaliadas na cidade de Manaus. Fonte: Própria.....41
Tabela 15 – Valores do Indice de Irregularidade Internacional – IRI. Fonte. Própria 42
Tabela 16 – Classificação IRC. Fonte: Adaptado, IRC 2006.....46
Tabela 17– Ruas avaliadas pelo Ensaio da Mancha de Areia. Fonte: Própria. 46
Tabela 18 – Ruas avaliadas ao Ensaio de Densidade In Situ. Fonte Própria.....48
Tabela 19 – Resultados da Densidade *in situ*, GC, temperatura e desvios padrão. Fonte: O autor.....51

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
AASHOT	American Association of State Highway and Transportation Officials
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANP	Agência Nacional de Petróleo
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ASAC	Agregado Sinterizado de Argila Calcinada
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estrada de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
Gmb	Massa específica aparente
Gmm	Massa específica máxima medida
Gsa	Massa específica real
Gsb	Massa específica aparente
IRI	Índice de Irregularidade Internacional
IRRE	International Road Roughness Experiment
RBV	Relação Betume Vazio
REMAN	Refinaria Isaac Sabbá
TRRL	Transportation Research Laboratory
VAM	Volume de Vazios do Agregado Mineral
Vv	Volume de Vazios

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 15
1. INTRODUÇÃO 15
1.1 Objetivos 18
1.1.1 Geral 18
1.1.2 Específicos 18
CAPÍTULO 2 19
2. REVISÃO DA LITERATURA 19
2.1 Índice de irregularidade 19
2.2 Macrotextura 22
2.3 Densidade *in situ* 24
CAPÍTULO 3 26
3. MATERIAIS E MÉTODOS 26
3.1 Caracterização Tecnológica Tradicional dos Materiais Constituintes na Mistura Asfáltica do Tipo CA. 26
3.2 Composição Asfáltica 27
3.3 Avaliação do desempenho funcional 28
3.3.1 Avaliação da rugosidade da pista 28
3.3.2 Avaliação da Macrotextura 32
3.3.3 Densidade *In Situ* 34
CAPÍTULO 4 37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 37
4.1 Caracterização Dos Materiais 37
4.1.1 Agregados Minerais 37
4.1.2 Dosagem da Mistura Asfáltica 39
4.2 Avaliação Do Desempenho Funcional 41
4.2.1 Índice de Irregularidade Internacional (IRI) 43
4.2.2 Macrotextura Superficial do Revestimento Asfáltico 46
4.2.3 Densidade *in situ* do pavimento compactado 48
CAPÍTULO 5 53
5. CONCLUSÃO 53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 54

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A pavimentação asfáltica evidencia-se como essencialidade para o desenvolvimento urbano. A técnica para construção dos pavimentos rodoviários e aeroportuários são especificas e normatizadas nacional ou/e internacionalmente.

You Zhan et al (2023) definem pavimentação como sendo um elemento vital na construção de estradas e componente essencial para desenvolvimento das cidades.

Medina e Motta (2015) definem pavimento como uma estrutura construída após a terraplenagem, com a função de resistir aos esforços verticais produzidos pelo tráfego, melhorar a condição de rolamento para garantir segurança, e resistir aos esforços horizontais para tornar a superfície mais durável.

O asfalto, comumente conhecido como betume na Europa, é usado principalmente para pavimentação de estradas devido às suas propriedades coesivas. A mistura asfáltica é uma combinação desse aglutinante (cimento asfáltico de petróleo) e agregados minerais. O CAP influencia a mistura asfáltica na resistência ao envelhecimento/enrijecimento, na adesão dos agregados, na suscetibilidade térmica, no desempenho físico e mecânico (GERMIN-AIZAC, 2023).

Os pavimentos asfálticos beneficiam a sociedade provendo renda para famílias (Zhang, 2023), além de servir como meio de destinação final para resíduos sólidos, tais como a mistura asfáltica a quente (HMA) modificada com borracha triturada (CRM), o que contribui para uma engenharia sustentável (TAN *et al*., 2022).

Consoante ao rolamento para garantia de segurança, NIETSCHE *et al.* (2014) evidenciam que um dos principais fatores responsáveis por tal condição são as percepções dos usuários durante o percurso veicular, com referência a suavidade da pista (sugerindo a ausência de irregularidade), o alinhamento da estrutura, vibrações sonoras oriundas do ruido no veículo, e a má condição de luminosidade.

A avaliação da condição superficial do pavimento, com detecção dos defeitos em sua fase inicial e acompanhamento de sua evolução, é uma das técnicas que auxiliam na mensuração da saúde estrutural desse tipo de construção, cujas técnicas podem ser as citadas, por exemplo, pelas normas: DNIT 442/2023, DNIT 440/2023 e DNIT 433/2021.

O desempenho do revestimento asfáltico, em regra, avalia-se segundo três condições: funcional, estrutural e quanto a segurança. Para cada condição, o Manual do DNIT (2006),

indica as técnicas necessárias para realização das avaliações. O Departamento de Infraestrutura de Transportes DNIT (2011) cita que o desempenho funcional de um pavimento se distingue como a característica que mais afeta o julgamento dos usuários. Carvalho (2019) define desempenho funcional como sendo a disposição do pavimento em atender sua principal função, ou seja, fornecer uma superfície com serventia adequada. XIAO *et al* (2023) citam a funcionalidade como uma alternativa de fonte de dados para a criação de uma metodologia preventiva na manutenção do pavimento.

No Brasil e de acordo com a Confederação Nacional do Transporte CNT (2021) avaliação funcional por meio da macrotextura e microtextura são vantajosas, porquanto proporcionam métodos de prever os serviços de manutenção das pistas e garantir a qualidade da malha rodoviária. Também conforme a CNT (2019), algum dos problemas presente nos pavimentos, prejudiciais ao desempenho funcional e a segurança viária, atrela-se ao não atendimento das especificações construtivas, bem como, quanto a qualidade dos materiais empregados no revestimento, vulnerabilizando o pavimento, e acarretando o precoce surgimento das deformações.

Relativo à verificação do desempenho funcional, pode ser realizada por meio de técnicas simples (Antunes et al., 2021) ou mais complexas, tais como: o Índice de Irregularidade Internacional (Bueno, 2019), análise da Macrotextura (Becker e Els, 2022) e Densidade *in situ* (Wang et al, 2022).

No que tange ao Índice de Irregularidade Internacional, em função da frequência de acidentes de trânsito, tem-se a citação de Egor Golov (2022). Os autores avaliaram a possibilidade de obter um melhor nível de segurança rodoviária em uma cidade da Rússia, e os riscos de acidentes nas estradas. No caso de pesquisadores asiáticos, com base nos dados dos Índices de Irregularidade, estudaram as condições do pavimento asfáltico de uma ponte, e, posteriormente, chegaram a opções com vistas ao tipo de reabilitação que seria mais apropriada para a manutenção da via (Sangyum Lee, 2022).

Referente a técnica da macrotextura, autores definem a importância da avaliação textural do revestimento asfáltico na promoção da segurança viária decorrente do atrito pneu/pavimento, além de possibilitar a caracterização das condições do pneu do veículo, já que, tal equipamento em boas condições acarretará um adequado atrito (Carl Becker, 2022). Outro fator importante, é a hidroplanagem ou aquaplanagem, decorrente da perda do contato do pneu veicular com o pavimento, devido à presença de um filme de água não rompido pelos pneus ou pela textura da pista (DNIT, 2011).

Outra circunstância que pode estar relacionada a perda do atrito pneu/pavimento, consiste na ocorrência de patologias na pista, como a presença de rachaduras e buracos altamente expandidos (PRASAD et al. 2013). Baseado nesse contexto, Bridgelall et al (2016), também citam outros fatores, tais como: frenagem abrupta, rápida aceleração e a velocidade nas curvas.

Relativo à determinação da Densidade *in situ*, Wang et al (2022) recomendam tal ensaio como indicador do grau de compactação (razão entre a densidade máxima teórica obtida em laboratório pela densidade máxima teórica *in situ*), por meio do qual pode-se garantir a qualidade do pavimento e evitar deteriorações prematuras, propiciando uma performance adequada do revestimento.

Allen et al. (2003) recomendam a utilização de medidores de densidade, como instrumentos de controle de qualidade para misturas quentes. Leng et al. (2018) sugerem o densímetro eletromagnético, como ferramenta que possibilitará uma resposta complementar para o julgamento dos danos apresentados na estrutura do pavimento durante a execução da obra, devido a aferição imediata do grau de compactação.

Nesse cenário, o presente estudo avaliou obras de pavimentação, em especial, a construção do concreto asfáltico (CA), em diversos bairros de Manaus/AM, segundo o processo da confecção da mistura asfáltica, a sua execução e após a conclusão da etapa construtiva. Realizou-se a investigação por meio de três técnicas de desempenho funcional do revestimento asfáltico, quais sejam: a determinação do Índice de Irregularidade, da Densidade *in situ*, do Grau de compactação e da temperatura, bem como a realização do ensaio de Macrotextura. Registra-se que o presente trabalho é uma inédita contribuição para construção dos pavimentos urbanos de Manaus/AM.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Avaliar o desempenho funcional, a qualidade e a segurança viária de trechos urbanos recém-construídos na capital do Estado do Amazonas, do tipo concreto asfáltico, por meio da densidade, rugosidade e macrotextura.

1.1.2 Específicos

a) Determinar o Índice de Irregularidade (IRI);
b) Avaliar a Macrotextura; e
c) Determinar a Densidade *in situ*.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO DA LITERATURA

O capítulo em apreço versa sobre os conceitos da funcionalidade de um pavimento, consoante aos estudos da irregularidade, macrotextura e densidade, visando o controle da execução em campo de uma mistura asfáltica.

2.1 Índice de irregularidade

A definição do desempenho funcional refere-se à capacidade do pavimento de satisfazer sua função principal, qual seja, proporcionar aos usuários uma superfície com serventia adequada em termos de qualidade de rolamento de forma rápida, segura e confortável, resultado da interação entre a condição de superfície e a dinâmica do veículo (DNIT, 2006).

Conforme Carvalho (2019), os métodos de quantificar as características funcionais consideram o levantamento de defeitos, a irregularidade da superfície nos perfis longitudinal e transversal, e a ocorrência de deformações plásticas em trilha de roda. Tal análise compreende a listagem dos aspectos que afetam mais diretamente aos usuários, na forma de conforto ao rolamento (relacionado aos custos operacionais dos veículos), tempo de viagem (que também pode ter um custo associado) e segurança (custo referente aos acidentes).

Hveem (1960) menciona o surgimento dos primeiros equipamentos medidores de irregularidades por volta do ano 1900, conhecido por Viagraph. Tratava-se de um dispositivo bastante rudimentar, que tentava medir essa condição, por meio do registro escrito contínuo, e do desvio no ponto central de uma régua de madeira apoiada e arrastada longitudinalmente sobre o pavimento. Gillespie (1992) exemplifica que em meados de 1920, os engenheiros rodoviários dos EUA admitiam a importância da irregularidade dos pavimentos como causa da vibração nos veículos motorizados. Posteriormente a observância de tal fato, concebeu-se o equipamento percursor de todos os medidores de rugosidade, obtendo-se a variação da suspensão de um veículo de passeio durante seu deslocamento.

Após os primeiros registros dos equipamentos medidores surgiram vários dispositivos, dentre os quais: *BPR Roughometer* da AASHOT Road Test, Integrador de Irregularidade Longitudinal da IPR/USP, Maysmeter (DNER-PRO 182/94), e Road Test Profilometer (AASHOT).

Em outra vertente, pertinente aos estudos da irregularidade da superfície, conforme Soncim (2011), em meados dos anos 70, a instituição financeira internacional Banco Mundial

custeou pesquisas rodoviárias em países considerados em desenvolvimento, cujo objetivo fundamental era uma investigação detalhada sobre a composição dos custos totais do transporte rodoviário, em função dos custos de construção, de manutenção e de utilização das estradas. Com base nas informações levantadas os pesquisadores identificaram que a irregularidade é o principal fator envolvendo a qualidade de rolamento e os custos de operação.

O Banco Mundial, em 1982, conduziu uma pesquisa no Brasil conhecida como International Road Roughness Experiment (IRRE), cujo finalidade era possibilitar uma correlação e um padrão de calibração para medidas de irregularidade em pavimentos (SAYERS *et al.* 1984). O índice resultante desses estudos passou a ser chamado de Índice de Irregularidade Internacional ou International Roughness Index ((IRI).

Um dos precursores nesse contexto, SAYER *et al* (1986), relacionaram a medição aos sinais obtidos por equipamentos do tipo resposta, também conhecido como RTRRMS (Road Roughness Measurement Techniques), com a unidade de medida em metros por quilômetros (m/km).

As normas norte-americanas ASTM E1364 (1995) e ASTM E1926 (1998), mencionam a possibilidade do uso de algoritmos para o cálculo e a classificação do IRI. Entretanto, não apresentam exemplos de sua resolução, tampouco demonstram as fórmulas citadas nos referidos documentos (Barrela, 2008).

Com o avanço da ciência e da tecnologia foi desenvolvido um equipamento pelo *Transportation Research Laboratory* TRRL da Inglaterra, conhecido como *MERLIN*, similar a *Machine for Evaluating Roughness using Low-cost Instrumentation.* Surge, assim, uma nova alternativa de medição de irregularidade de baixo custo e simples de manuseio. Cundill (1996) revela que apesar de toda bibliografia pesquisada, não se sabe exatamente quando o *MERLIN* foi desenvolvido, mas, levando-se em conta que o primeiro trabalho publicado sobre ele se registrou em 1991 (Barella, 2008), estima-se que o equipamento não tenha sido concebido muito antes desse ano. Sua funcionalidade objetiva ser um equipamento não complexo, passível de ser construído em qualquer parte do mundo, visando possibilitar a medição da irregularidade longitudinal.

Classificado pelo DNIT (2006), o *MERLIN* é um equipamento do tipo sistema de medida indireta do perfil. Conforme exposto por ANTT (2017) consiste em um instrumental de observância indireta de classe III do tipo resposta. A citada norma cita, no item “Inspeção”, seu emprego na verificação do produto acabado, ou seja, da superfície do pavimento por meio de uma classificação.

Com o registro histórico de aproximadamente 30 anos do seu surgimento, o *MERLIN* é um equipamento que vem sendo utilizado com resultados bastantes significativos. Golov (2022) examinou as atividades destinadas a melhorar o nível de segurança rodoviária na Rússia e reduzir os acidentes nas estradas, por meio do exame da rugosidade do pavimento, em função da frequência de acidentes de trânsito. Prasad *et al.* (2013) utilizou também o Merlin como um parâmetro de calibração para avaliação da rugosidade. Bueno (2019) obteve como conclusão em seu trabalho, após a elaboração de uma previsão empírico-mecanicista da irregularidade longitudinal com o *MERLIN*, uma projeção de economia, em termos monetários de R$82.000/km/ano nos custos operacionais dos veículos utilizados pelos usuários de rodovias, e em cenários de longo prazo 30 anos, tal quantitativo poderia chegar a aproximados R$2.768.000/km/ano.

No Brasil o DNIT (2011) definiu classificações relacionados às condições superficiais, mais especificamente relacionado ao IRI, independente da forma de obtenção dos valores, que são indicados na Tabela 1.

Conceito	IRI (m/Km)
Bom	< 3, 0
Regular	3,0 < IRI < 4,0
Ruim	4,0 < IRI < 5,5
Péssimo	> 5,5

Tabela 1 - Classificação IRI. Fonte: DNIT, 2011

As definições que mostram o estado de irregularidade na pista, isto é, quando não há elevada rugosidade, representam uma colocação do conforto e da segurança da trafegabilidade. A Figura 1 exibe os tipos de pavimentos em função do IRI.

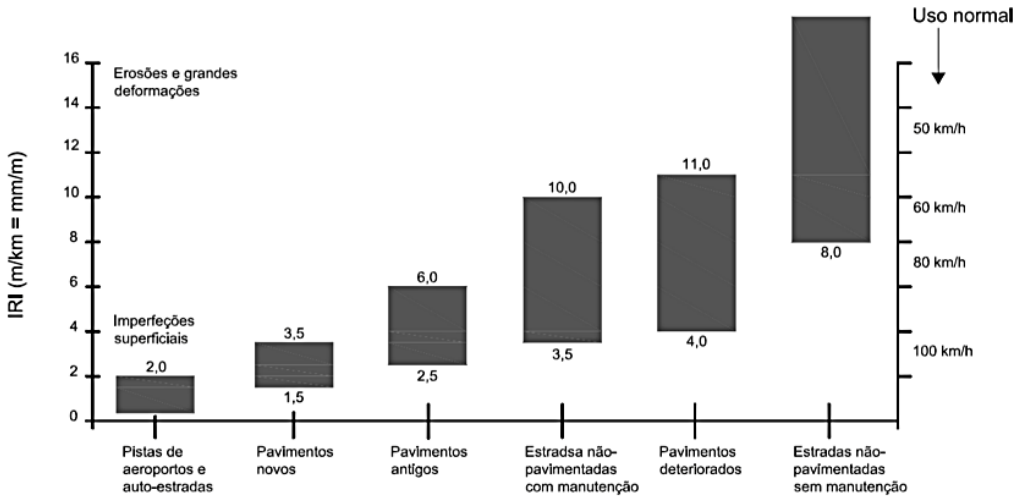

Figura 1 - Classificação IRI em função do pavimento. Fonte: DNIT, 2011

Nessa temática, a norma ASTM E1926 − 08 (2021) tipifica os valores do IRI em função da velocidade, da percepção de possíveis patologias presente na pista e condição de trafegabilidade, podendo-se observar na Tabela 2.

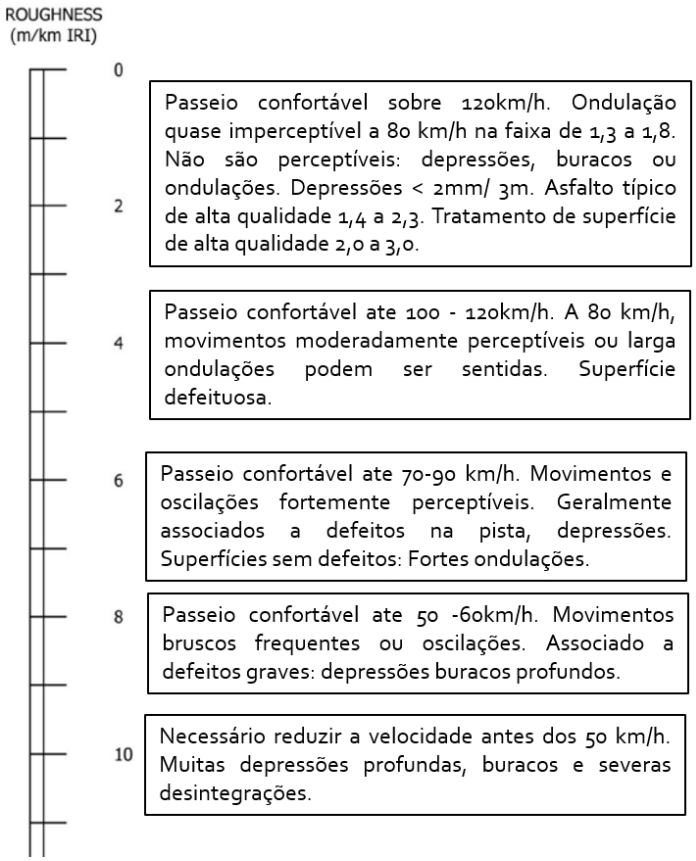

Tabela 2 - Estimativa de Rugosidade de Estradas Pavimentadas com Concreto Asfáltico ou Tratamento de Superfície. Fonte: Adaptado. ASTM, 2021

2.2 Macrotextura

O revestimento asfáltico é dimensionado, dentre outros fatores, pelo tipo de esforço aplicado ao pavimento. Embora tal carga seja diferente comparando as pistas de aeroportos relativas às vias urbanas, faz-se necessário a avaliação da macrotextura dessas estruturas. Por exemplo, a resolução RA 236 (ANAC, 2012) recomenda sua medição constante, como forma de prevenção de risco a segurança operacional.

De acordo com Sandberg (1998), a textura superficial é a mais importante peculiaridade do revestimento, afetando os processos de interação pneu/estrada, como o atrito, desgaste dos pneus, emissão de ruído externo e interno do veículo, reflexão da luz e resistência ao rolamento. O autor cita vários tipos de categorias da textura superficial, conforme ilustra a Figura 2.

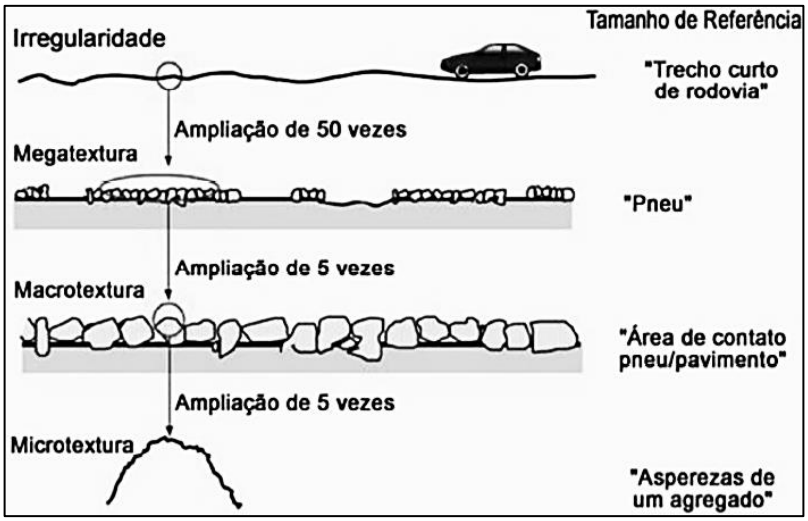

Figura 2 - Categoria das texturas do pavimento. Fonte: Sandberg, 1997 (Adaptado pelo autor)

De acordo com Sousa (2019) a macrotextura é um parâmetro da aderência pneu-pavimento. Apesar de ser uma importante caracterização dentro da segurança viária, sua avaliação não é comumente realizada no Brasil. Além disso, os procedimentos recomendados para sua mensuração ainda são constituídos por ensaios tradicionais, que envolvem a interrupção de tráfego por longos períodos.

O DNIT (2005) designa a macrotextura como indicação de rugosidade geométrica média do revestimento e, por consequência, permite estimar a sua capacidade de drenagem da água superficial, podendo ser avaliada pelo chamado ensaio de Mancha de Areia.

A ASTM (2019) considera a macrotextura do pavimento como desvios da superfície a partir de uma superfície verdadeiramente plana, com características e dimensões de comprimento de onda e amplitude de 0,5 mm até o momento que não afete mais a interação do pneu-pavimento.

A análise da macrotextura permite a caracterização da superfície do pavimento quanto a sua capacidade de drenar a água confinada entre o pneu e o pavimento, e quantifica a densidade, ou seja, a distância média entre grânulos individuais de agregados aflorados na superfície do pavimento (DNIT, 2006). O Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2006) tipifica a macrotextura de acordo com a Tabela 3.

O método mais usual para essa determinação é o da Mancha de Areia. Indicativo a ela tem-se as normas ASTM E 965 (2019) e ABNT 16504 (2016), que instruem de forma sucinta o ensaio e a metodologia, brasileira e norte americana, respectivamente.

Por meio do ensaio da Mancha de areia há a possibilidade de caracterizar a macrotextura, em duas principais vertentes, textura aberta ou fechada. A macrotextura fechada concede um menor ponto de contato na interação pneu-pavimento, e o oposto a macrotextura

aberta que possibilita um melhor ponto de contato. Esta posição indica o atrito da relação pneu – revestimento asfáltico, e consequentemente, quanto maior o atrito entre o pneu e o asfalto, maior poderá ser a segurança.

Mattos (2009) enfatiza o fenômeno da hidroplanagem, enfatizando a perda total do contato do pneu do veículo com a superfície do pavimento. Tal condição causa insegurança ao condutor.

AVALIAÇÃO DA MACROTEXTURA / MÉTODO DA ALTURA DE AREIA	
Profundidade Média (mm)	Textura Superficial
HS < 0,20 mm	Muito Fina ou Muito Fechada
0,20 mm < 0,40 mm	Fina ou Fechada
0,40 mm < HS < 0,80 mm	Média
0,50 mm < HS < 1,20 mm	Grosseira ou Aberta
Limites Sugeridos: HS Profundidade Média 0,6 mm < HS < 1,2 mm Textura Superficial Média a Grosseira	

Tabela 3 – Classificação Macrotextura. Fonte: DNIT (2006).

Apesar da macrotextura ter uma tipificação, algum outros fatores podem comprometer a perda da interação do pneu-asfalto, como por exemplo a rugosidade do componente do pneu (borracha) e os materiais constituintes da mistura asfáltica. Destaca-se que os agregados devem preservar uma rugosidade mínima durante a vida útil do pavimento, para ter-se um desempenho adequado em relação ao atrito (PEREIRA *et al*, 2012).

Conforme Becker *et al*. (2022) a avaliação textural do revestimento também promove a possibilidade da caracterização das condições do pneu, isto é, pneus em boas condições apresentam um melhor atrito. Vásquez *et al* (2020), concluíram que a profundidade da macrotextura de uma mistura asfáltica contribuiu para seu desempenho acústico em baixas frequências, bem como o ruído gerado pela relação pneu/estrada pode ser explicado, parcialmente, do ponto de vista da macrotextura.

2.3 Densidade *in situ*

Uma das formas de controle da execução de um pavimento consiste na determinação do número de passadas dos maquinários compactadores, para monitoramento do grau de compactação. Leng *et al* (2012) qualificaram um revestimento asfáltico, por meio da densidade *in situ*, em que identificaram a presença de problemas oriundos de uma super compactação.

O DNIT (2006) orienta que o grau de compactação do revestimento asfáltico, deve estar na faixa de 97% a 100%. O seu controle pode ser realizado medindo-se a densidade aparente de corpos-de-prova extraídos da mistura espalhada e compactada na pista, por meio de brocas rotativas, e comparando-se tais valores com os obtidos provenientes do projeto da composição.

Com o avanço da modernização, sugiram equipamentos que possibilitam a medição do grau de compactação, sem a necessidade da extração do corpo de prova. Essa remoção vulnerabiliza o revestimento, por conta da abertura de orifícios, e consequentemente propicia irregularidade na pista.

No Brasil o DNIT (2020) explicita uma diretriz para avaliação da densidade *in situ* com o uso do densímetro não nuclear. Consiste no uso de um mecanismo que emite ondas eletromagnéticas, aferição de temperatura e densidade. A metodologia para avaliação da densidade *in situ* não nuclear é descrita pelas normas brasileira e norte americana DNIT 431 (2020) e ASTM D7113 (2018), respectivamente. No mercado existem diversos instrumentos, que possibilitam a execução do citado ensaio, dentre os quais: TransTech Systems, Indiana Avantech Engineering Consortium Pvt. Ltd, Italiana Matest e Chinesa TinPeng.

Cyrille *et al* (2013) pesquisaram a compactação de uma mistura asfáltica a quente, usando métodos eletromagnéticos de alta frequência. O trabalho revelou que é possível quantificar a grau de compactação relativo a porcentagens do valor referência laboratorial. O uso do densímetro eletromagnético, de acordo com Wang *et al* (2022), segue os métodos de teste não destrutivo (NDT), sendo preferidos pela obtenção das medições de densidade de forma rápida, precisa e em grande escala.

CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O capítulo discute os materiais constituintes da mistura asfáltica, o processo de confecção do asfalto, e as técnicas de avaliação de desempenho funcional.

3.1 Caracterização Tecnológica Tradicional dos Materiais Constituintes na Mistura Asfáltica do Tipo CA.

A confecção do concreto asfáltico seguiu as especificações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), conforme as diretrizes da norma DNIT 031/2006. Constituíram a mencionada composição os seguintes materiais: cimento asfáltico de petróleo (CAP), na condição de ligante betuminoso; areia, na função de agregado miúdo; pó de brita, como material de enchimento (fíller); e brita, participando como agregado graúdo.

Participou como ligante asfáltico o comercializado na região pela Refinaria Isaac Sabbá (REMAN). A sua tradicional caracterização tecnológica realizou-se pelo fabricante, de acordo com os seguintes experimentos da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), em sua resolução de N° 19 (ANP, 2005): Penetração, Viscosidade, Ponto de Amolecimento, Ductilidade, Ponto de Fulgor, Solubilidade no Tricloroetileno, Índice de Suscetibilidade, Ductilidade e Variação de Massa.

O agregado miúdo, areia, proveniente da cidade de Manaus, analisou-se pelo ensaio de peneiramento (ASTM C136, 2014 e DNIT 412/2009), e pela determinação da Densidade real (Gsa), Densidade aparente (Gsb) e Absorção, todos expostos pela norma norte americana ASTM C128 (2015) e brasileira DNIT (411/2021).

O material pó de brita, participante como material de enchimento, proveio do comercializado na cidade de Presidente Figueiredo. Obteve-se a caracterização física pelo ensaio de granulometria seguindo a normativa brasileira DNER-EM 367 (1997).

A brita n°0 foi adquirida do comércio de Presidente Figueiredo. Realizaram-se os ensaios de granulometria por peneiramento, normas ASTM C136 (2014) e DNIT 412/2009, bem como determinou-se a Densidade real (Gsb), Densidade aparente (Gsa) e Absorção (DNIT 413, 2021).

3.2 Composição Asfáltica

Pertinente a granulometria da mistura mineral, seguindo a metodologia da dosagem MARSHALL, efetivou-se o enquadramento dos constituintes minerais aos limites estabelecidos pela "FAIXA C'' do DNIT 031 (2006), específico para a camada de rolamento.

Em relação ao teor de projeto alusivo ao ligante asfáltico, seguiram-se as diretrizes da norma DNER-ME 043/95 que determina a confecção de corpos-de-prova, e para enquadramento de parâmetros volumétricos consoante a norma DNIT 031 (2006). Os cálculos dos parâmetros volumétricos, instruídos pela norma DNER (1995), foram:

Densidade Aparente (Gsb) – norma DNIT 413 (2021)

$$Gmb: \frac{\text{Massa seca em estufa}}{\text{Massa saturada, superfície seca ao ar (g)} - \text{Massa saturada imersa em água (g)}} \text{ (Eq. 01)}$$

Densidade Aparente (Gmb) – norma DNIT 428 (2022)

$$Gmb: \frac{Massa\ seca\ (g)}{Massa\ seca\ (g) - Massa\ submersa(g)} \text{ (Eq. 02)}$$

Massa Especifica Aparente (MEa) em g/cm³ - norma DNIT 428 (2022)

$$MEa: 0{,}9971\ x\ Gmb \text{ (Eq. 03)}$$

Volume de Vazio Vv (%) - norma DNIT 428 (2022)

$$VV: \left(1 - \frac{Gmb}{Gmm}\right) x\ 100 \text{ (Eq. 04)}$$

Vazios do Agregado Mineral (VAM)

$$VAM: 100 - \left(\frac{\%\ dos\ Agregados\ x\ Gmb}{Ggb}\right) \text{ (Eq. 05)}$$

Relação Betume Vazio (RBV)

$$RBV: \left(\frac{(Vam - Vv)\ x\ 100}{Vam}\right) \text{ (Eq. 06)}$$

Para determinar o teor de projeto realizaram-se 05 tentativas, acompanhando os seguintes percentuais: 4,00; 4,50; 5,00; 5,40 e 6,00%. O valor de 5,40 % foi o que atendeu as exigências da norma DNER-ME 043/95. A confirmação desse valor era obtida a cada jornada de trabalho na usina de asfalto, seguindo as normativas DNER-ME 053 (2004) e e norma 031

do DNIT (2006), expostos na Tabela 4. Pertinente ao controle tecnológico diário da empresa alusivo a resistência a tração, realizou-se instruído pelas normas DNIT 136/2018 e DNIT 031 (2006), sendo 0,65 MPA o valor mínimo de aceitação de uma mistura asfáltica para fins em uso na camada de rolamento.

Em resumo, a mistura asfáltica resultante apresentou as seguintes proporções: 33,11 % de brita 0; 18,92 % de pó de brita (fíler mineral); 42,57 % de areia e 5,40% de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).

Características	Método de ensaio	Camada de Rolamento
Porcentagem de vazios (%)	DNER-ME 043	3 a 5
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	75-82
Estabilidade, mínima (kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500
Resistencia à Tração por compressão diametral estática a 25° C, mínima, MPa.	DNER-ME 138	0,65

Tabela 4 - Diretriz DNIT. Fonte: Norma DNIT 031 (2006), adaptado.

3.3 Avaliação do desempenho funcional

As técnicas utilizadas no trabalho, relativo ao desempenho funcional, foram baseadas: no Índice de Irregularidade Internacional (IRI) com o uso do equipamento MERLIN, da fabricante SOLOTEST; na macrotextura da pista por meio do ensaio Mancha de Areia, utilizando o equipamento fabricado pela empresa SOLOTEST; e na medição da densidade *in situ* com uso do densímetro eletromagnético, da produtora TransTech Systems.

3.3.1 Avaliação da rugosidade da pista

O Índice de Irregularidade Internacional (IRI) pode ser calculado por várias formas com uso de diversos dispositivos. Nesse trabalho utilizou-se o equipamento MERLIN (Figura 3), pertencente a empresa ARDO CONSTRUTORA e PAVIMENTAÇÃO LTDA. O DNIT (2006) assinala que o MERLIN consiste em um medidor indireto de irregularidades do perfil de um pavimento.

O teste em discussão é regido pelas normas DNIT (2006), ASTM (1998) e ASTM (2012). Também é apresentado nos seguintes manuais: do fabricante do equipamento utilizado nesta pesquisa, SOLOTEST (2018); dos idealizadores do equipamento, RESEARCH REPORT 301 (1996); ARTERIS (2017); e dos percursores no desenvolvimento tecnológico do equipamento, DEL AGUILA (2000). As referidas bibliografias não demonstram a exigência de tolerância na quantidade de medições para execução dos ensaios, porém, o tempo de medição foi citado na faixa de 60 a 70 minutos ininterruptos.

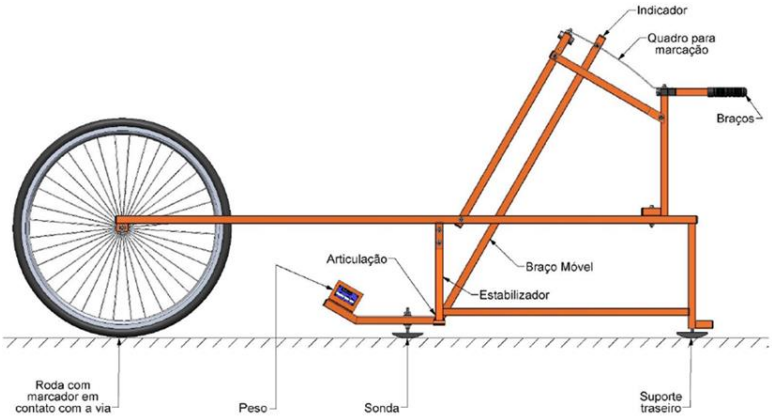

Figura 3– Equipamento MERLIN. Fonte: SOLOTEST, 2018.

Objetivando respostas precisas durante a operação é necessário a calibração do MERLIN antes do início da medição, por meio de um fator de ajuste de correção. No presente estudo usou-se o manual de instrução de operação proposto por Aguila (DEL AGUILA, 2000).

Os órgãos regulamentadores que abordam a diretrizes para avaliação de rugosidade de uma pista com revestimento asfáltico (DNIT, 2006; ASTM E 1926-98; ASTM E 1364-95), não explicitam o procedimento para operação do ensaio com o mencionado dispositivo. A metodologia e o tratamento de dados para cálculo do IRI, cumpriu-se de acordo com fabricante SOLOTEST (2018), o manual de operação (DEL AGUILA, 2000; ARTERIS, 2017) e o manual de operação dos idealizadores do equipamento (TRRL RESEARCH REPORT 301, 1996).

A operacionalidade do experimento consistiu em etapas, delimitadas em:

I. O comprimento da pista deve ser igual ou superior a 200 metros, de forma que as leituras devem ser efetuadas nas trilhas de roda, a fim de se obter 200 medidas;
II. Retirada do MERLIN em estado de repouso, com a remoção do estabilizador;
III. Localização do pneu, perpendicular ao eixo da via com o manuseio do braço, e a locação da válvula de calibração, também perpendicular ao eixo;
IV. Iniciar a medição quando o equipamento sai do repouso, e o operador executa uma revolução completa do pneu, de aproximadamente 2 metros ao longo da extensão;
V. Ao completar a revolução, é necessário certifica-se que a sonda, o pneu e o suporte traseiro estão em atrito com o revestimento asfalto. Neste momento, o operador deve segurar firme o braço do equipamento, parar impedir inclinações, e, consequentemente, impedir erro na leitura;
VI. Ao efetuar uma revolução do pneu e verificar os itens em contato com a camada asfáltica, o operador anota a leitura que o indicador aponta no quadro de dados. Por sua vez, o quadro de dados deve conter 50 linhas com numeração de 00 a 50 e com espessura de 5mm, mostrando a posição da linha com a respectiva numeração. Uma leitura indica um número

dentre 00 a 50. Após 200 leituras, os valores são inseridos em uma tabela 10 x 20, de acordo com a recomendação de DEL AGUILA (2000), e exemplificado na Tabela 1.

VII. Após a ação da etapa VI, em uma frequência de 200 repetições, conclui-se a operação, e obtém-se as medidas necessárias, que geram um histograma de frequência, para o cálculo do IRI. Executa-se, na sequência, o estudo final dos dados, conforme mostra a Tabela 5 e Figura 4.

-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	45	21	29	29	30	30	30	31	34	30
2	35	34	35	29	35	39	35	29	28	28
3	38	27	32	32	36	34	34	20	32	46
4	13	33	35	27	30	33	30	33	31	30
5	27	25	36	29	25	29	26	25	31	29
6	30	31	31	30	30	33	30	30	32	30
7	35	31	27	31	30	31	28	31	34	30
8	28	32	33	29	20	29	36	38	30	29
9	33	44	43	41	35	42	30	30	29	22
10	42	29	32	24	33	34	35	32	35	35
11	32	32	30	33	31	29	32	32	29	30
12	31	30	34	30	29	30	26	29	33	33
13	29	29	32	29	29	32	28	32	26	32
14	32	33	30	31	30	32	31	21	35	23
15	27	38	28	35	34	31	34	36	25	25
16	31	28	34	27	31	33	41	27	26	23
17	33	29	32	29	27	36	30	28	36	25
18	32	26	30	29	31	31	26	34	33	33
19	32	22	32	24	26	42	29	31	31	29
20	33	29	31	25	38	25	35	21	26	40

Tabela 5 – Exemplo de 200 leituras. Fonte: Própria

A Tabela 5 é um exemplo de dados obtidos após um ensaio. Os números com os quadrantes na cor de fundo verde significam a leitura pelo Merlin no intervalo 00 a 50. A numeração inserida nos quadrantes de fundo branco denota as quantidades necessárias de medições, conforme norma e manual, igual a 200 repetições. Posteriormente, tendo os 200 valores, é produzido o histograma de frequência (Figura 4).

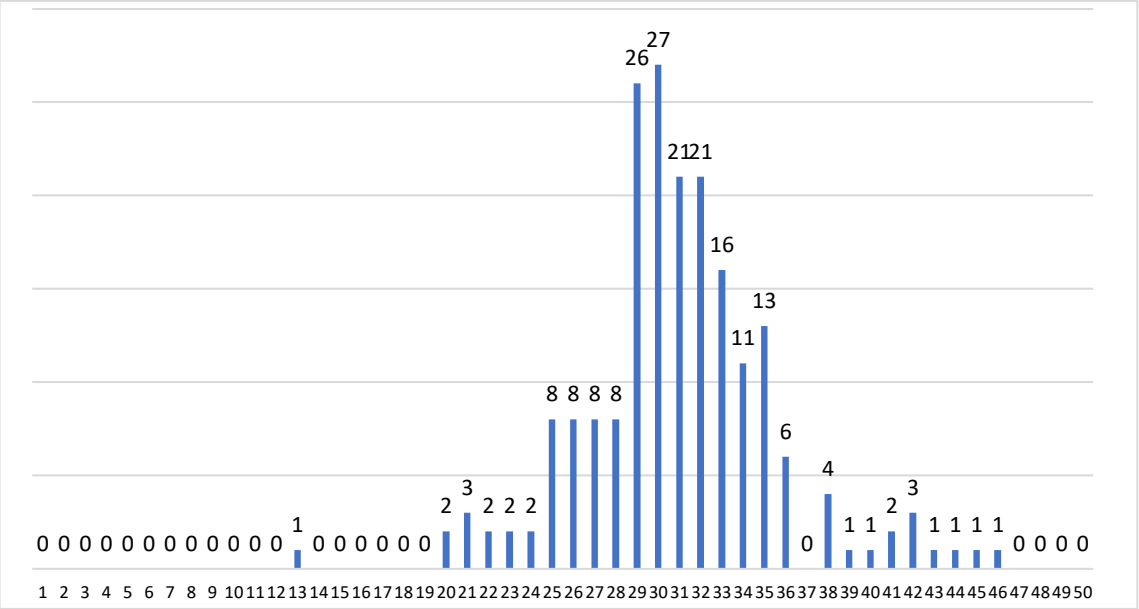

Figura 4 - Exemplo de histograma de frequência. Fonte: Própria

Os valores no eixo da abscissa, de 00 a 50 inseridos no quadro de dados no Merlin, seguem instruções de DEL AGUILA (2000). Os dados no eixo da ordenada representam a quantidade de repetição. Por exemplo, o número 30 do eixo da abcissa surgiu 27 vezes durante a realização das medições, enquanto o número 13 apareceu apenas uma vez.

Em conformidade com as recomendações dos manuais apontados no início desse capítulo realiza-se um descarte de 10% dos valores do eixo da abcissa, para o lado esquerdo e direito do histograma. Com os valores não excluídos tem-se uma soma. No exemplo em questão, os valores não descartados foram iguais a 15, referentes aos números do eixo da ordenada de 24 a 39, registrando as leituras com maior frequência. Tais resultados constam na equação 07.

D = E.H + N + D.H (Eq. 07), sendo:
D = Largura do Histograma,
E.H = Valores descartados do lado esquerdo do histograma,
D.H = Valores descartados do lado direito do histograma,
N = Valores não descartados do histograma.

Para o alcançar uma melhor precisão dos dados da largura do histograma, os manuais descrevem uma última etapa, encontrar a incógnita “D’’pela equação 08.

Dcor = FC x D x 05 (Eq. 08), sendo:
Dcor = Largura do Histograma Corrigida,

FC = Fator Correção,
D = Largura do Histograma pela equação 02,
05 = Espessura da linha de 5 mm no quadro de dados, para uma divisão de 50 linhas.

Após a resolução das equações 07 e 08, tem-se o resultado do Índice de Irregularidade, proposta pelo Laboratório de Pesquisa de Transportes (TRRL), e expresso na equação 09.

IRI = 0.593 + 0.0471 x D (Eq. 09), sendo:
IRI = Índice de Irregularidade Internacional (m/km);
D = Largura característica do histograma (mm)

3.3.2 Avaliação da Macrotextura

A técnica do ensaio denominado Mancha de Areia, objetiva a avaliação da macrotextura da superfície do pavimento. Foi realizada de acordo com as normas ASTM E 965 (2019) e ABNT 16504 (2016), e os manuais de ARTERIS E 965 (2016) e da fabricante SOLOTEST (2019). Tais referências não deixam explicito a tolerância mínima e máxima de medições para caracterização da macrotextura do revestimento asfáltico. Contundo, a diretriz da ABNT (2016) orienta para determinar 01 medição, com uma média de 04 medidas do diâmetro da mancha de areia, visando inserção no cálculo da profundidade da macrotextura.

As ruas avaliadas possuíam características e dimensões distintas. As normas e os manuais citados não direcionam o específico local, dentro na área da pista, para realizar o teste. Logo, padronizou-se o experimento em pontos do bordo esquerdo, bordo direito e no centro da seção transversal da pista de rolamento, com um espaçamento aproximado de 33,33% entre os pontos. Também pelo fato das normas e os manuais não instruírem o posicionamento do teste *in situ*, adotou-se como procedimento o comprimento total da pista, e em três locais (bordo esquerdo, bordo direito e centro). Resultou, então, a distância entre eles equivalente a 33,33 % em relação ao comprimento da seção transversal. O experimento aconteceu dentro do perímetro de segurança em um curto período de tempo, com uma média aproximada entre 20 a 25 minutos por medição.

O teste consistiu no espalhamento de um volume conhecido do material granular padronizado, sobre a superfície do pavimento asfáltico, realizando movimentos circulares uniformes do disco espalhador. A Figura 5 expõe o equipamento, o material, o colaborador e a macrotextura do revestimento asfáltico.

Figura 5 - Ensaio Mancha de Areia. Fonte: Acervo fotográfico do autor.

De acordo com ABNT (2016) a área do revestimento asfáltico deve estar seca, homogênea e sem irregularidades visíveis, sendo crucial a verificação da ausência de juntas ou trincas. Com o auxílio de uma trincha, executa-se a remoção de partículas que estejam depositados na superfície do pavimento, a fim de evitar a contaminação da área a ser avaliada. Um outro fator que propicia a obstrução do desempenho do ensaio, é a presença de fortes ventos, para isso faz-se necessário um anteparo na área avaliada, de modo a evitar a remoção da camada de areia.

Concluído a organização da área, prossegue-se com o espalhamento da areia, que cobrirá as pequenas depressões da superfície do pavimento, sempre em movimentos circulares. Essa área circular protegida pelo material granular é calculada pelo diâmetro médio referente a quatro medições, igualmente espaçadas no entorno de sua circunferência (LEOCÁDIO, 2014). A média dessas medições determinará a área do círculo coberto com a areia.

Finalmente, calcula-se a profundidade média (Hs) da macrotextura da superfície do revestimento asfáltico pela relação entre o volume do material granular padrão espalhado e a área do círculo coberta por esse material (ABNT, 2016), sendo expressa pela equação 10, e explicitada na Figura 6.

Figura 6 – Execução do ensaio Mancha de Areia. Fonte: Acervo fotográfico do autor.

$Hs = \frac{4v}{\pi D^2}$ (Eq. 10), sendo:

Hs = profundidade média da macrotextura da superfície do pavimento (mm);

V = volume do material granular espalhado (mm^3);

D = diâmetro médio da área circular coberta pelo material granular (mm).

3.3.3 Densidade *In Situ*

A medição da densidade *in situ* por equipamento eletromagnético, igualmente conhecida por densidade não nuclear, objetiva avaliar o ganho de densidade que a mistura asfáltica adquire no decorrer da compactação mecânica pela passagem do comboio, formado, no caso, por rolo tandem vibratório e rolo de pneu. Mediante a esse parâmetro controla-se a execução da obra, de forma imediata, pelo grau de compactação. Além desse parâmetro o equipamento também possibilita a aferição da temperatura do revestimento asfáltico.

Mediu-se a citada densidade pelo uso de um moderno equipamento que emita ondas eletromagnéticas, acompanhando as diretrizes das normas ASTM D7830/D7830M-14(2021) e DNIT 431 (2020). Tais preceitos instruem a realização de 05 aferições, para obtenção de 01 medição. A locação do equipamento nos pontos do revestimento asfáltico realizou-se em função do comprimento da via pavimentada, com as medições nos trechos inicial e final, ou seja, no intervalo entre o início e o fim da rua.

O princípio de operação baseia-se na emissão de um campo de ondas elétricas toroidais, mediante a uma chapa plana posicionada na superfície da camada asfáltica, a qual contém um transmissor e receptor dessas ondas elétricas. Registra-se a resposta do campo elétrico às variações de impedância da matriz (mistura asfáltica), que dependem da resistência elétrica específica, da constante dielétrica dos materiais constituintes (ligante asfáltico, agregados minerais) e da porcentagem de vazios, sendo também influenciada pela composição química. Na Figura 7 tem-se o equipamento da fabricante TransTech, e a execução de uma aferição após a passagem do rolo compactador.

Figura 7 - Execução da medição da Densidade *in situ*. Fonte: Acervo fotográfico do autor.

Uma das principais características do teste é ser rápido e não-destrutivo, além de sua execução mostrar-se muito simples. Em conformidade com as diretrizes do DNIT (2020), os procedimentos de operação do experimento seguiram as seguintes etapas:

I. Liga-se o aparelho, visando a sua estabilização, antes de iniciar as leituras;
II. Faz-se a limpeza do perímetro alusivo ao ponto de contato do equipamento com o revestimento asfáltico, e a verificação da presença de campos de força eletromagnéticos que possam interferir na leitura do dispositivo. Exemplifica-se, consoante a norma DNIT (2020), as linhas de alta tensão e grandes objetos de metal, tais como veículos de grande porte. Não foram presenciados esses campos de força;
III. Escolha de um trecho com 03 m de comprimento e 01 m de largura, alinhando-se em 05 partes iguais ao longo do comprimento. Com um marcador (giz), em cada uma das partes divididas, desenha-se uma circunferência de 40 cm para orientação da posição da medição;
IV. Faz-se a medição, em cada uma das circunferências de 40 cm, de 05 leituras;
V. Determinam-se os números de passadas da vibroacabadora, do rolo compactador e do rolo pneumático. Baseado na resposta dessas passadas, efetuou-se o cálculo do valor do grau de compactação e densidade. Quando as medições não mostravam alterações (aumentos ou perdas), significou, portanto, estabilização do grau de compactação.

O resultado do GC depende a inserção, na configuração do menu do equipamento, valores referenciais da densidade relativa máxima medida (Gmm) obtidos em laboratórios. Tais dados laboratoriais seguem a norma DNIT 427/2020

$$\text{Gmm } \frac{\text{amostra seca ao ar (g)}}{\text{amostra seca ao ar (g)} + \text{recipiente,volume completo com água (g)} - \text{recipiente,submerso em água (g)}}$$

(Eq. 11), sendo:

Gmm – densidade relativa máxima medida da mistura (adimensional);

Com a obtenção desse valor em laboratório e com o resultado da medição da densidade *in situ*, tem-se o grau de compactação (DNIT, 2020), dada pela equação 12.

$$\text{Grau de compactação (\%)}: \frac{\text{Densidade de campo (kg/m}^3\text{)}}{\text{Densidade de laboratorio (kg/m}^3\text{)}} \quad \text{(Eq. 12)}$$

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo consta a discussão dos resultados referentes à caracterização dos materiais, a dosagem da composição asfáltica, bem como a avaliação do desempenho funcional do revestimento asfáltico após a conclusão de obras de pavimentação realizadas no Município de Manaus.

4.1 Caracterização Dos Materiais

A análise laboratorial do cimento asfáltico de petróleo (CAP) seguiu as recomendações da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Os dados, que constam na Tabela 6, mostram os valores dentro das faixas recomendadas pela ANP, e classificam o material asfáltico como CAP 50/70. O citado ligante betuminoso é comercializado pela REMAN, na execução das obras de pavimentação da cidade de Manaus.

Ensaio	**Unidade**	**Classificação CAP 50-70 (ANP, 2005)**	**Resultado**	**Método ASTM**
Penetração	0,1 mm	50-70	69	D5
Ponto de Amolecimento	°C	> 46	49,7	D36
Ponto de Fulgor	°C	> 235	318	D92
Solubilidade em Tricloroetileno	% massa	> 99,5	99,5	D2042
Ductilidade	cm	> 60	100	D113
Efeito do Calor e do Ar (RTFOT) a 163°C, 85min				
Variação em massa	% massa	< 0,5	0,04	D2872
Aumento do Ponto de Amolecimento	°C	< 8	7,1	D36
Penetração Retida	%	> 55	63	D5
Viscosidade Saybolt-Furol				
135°C	s	>141	283	E102
150°C	s	>50	140,7	
177 °C	s	30-150	50,8	
Viscosidade Brookfield				
135°C	cP	>274	539	D4402
150°C	cP	>112	279,8	
177 °C	cP	57 a 285	96,8	

Tabela 6 – Caracterização do CAP. Fonte: REMAN.

4.1.1 Agregados Minerais

Os agregados minerais participantes das misturas asfálticas foram: brita n° 0, na condição de agregado graúdo; areia, representando o agregado miúdo; e o pó de pedra, como material de enchimento (fíler). No tocante a textura, são ilustradas na Figura 8 suas curvas granulométricas, cujos resultados classificam tais materiais, respectivamente, como: agregados

graúdos, retido na 4,75 mm (pedregulhos); agregado miúdo, passante na 4,75 mm; e fíler mineral, passante na 0,075 mm.

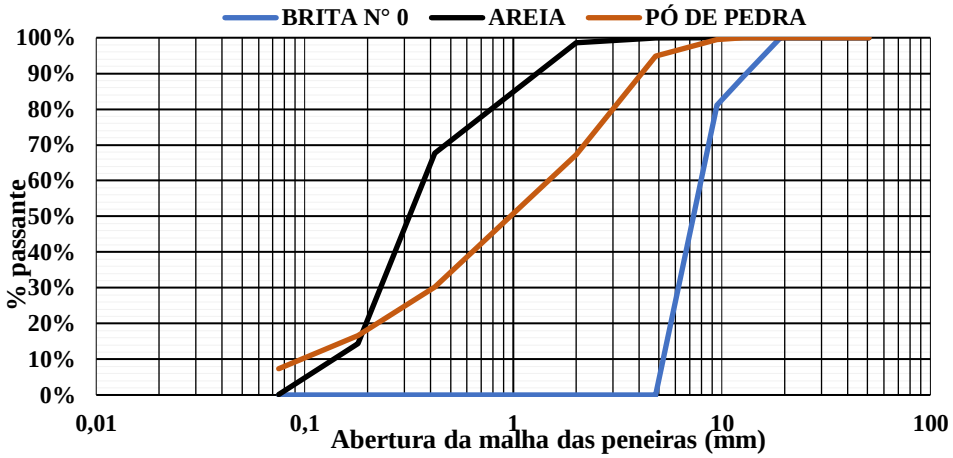

Figura 8 – Curvas Granulométricas dos materiais minerais. Fonte: Ardo Construtora

Considerando o conteúdo das curvas granulométricas, calcularam-se coeficientes de uniformidade (Cu) e de curvatura (Cc). Os resultados na Tabela 7 classificam a brita n° 0 e areia como uniformes, e o pó de pedra como mediamente uniforme (DAS, 2015). Quanto ao coeficiente de curvatura, todos os materiais com resultados inferiores a 3, logo, tem-se uma distribuição granulométrica bem graduada (DAS, 2015).

Materiais	Cu	Cc
Brita n° 0	1,62	0,69
Areia	2,46	0,95
Pó de Pedra	15,00	1,12

Tabela 7 – Coeficientes de Uniformidade e de Curvatura.

Na Tabela 8 apresentam-se os resultados da caracterização física dos agregados minerais. Os valores encontrados para a brita n° 0 foram: densidade relativa real de 2,77 g/cm³ e a densidade relativa aparente igual a 2,75 g/cm³. Não há uma classificação específica para análise desses parâmetros, seja na norma do método de ensaio (DNIT, 2021), bem como na prescrição de serviço (DNIT, 2006). Porém, tais resultados mostram-se aproximados comparando-os a outros trabalhos regionais (Barbosa, 2016; Vasconcelos, 2020). Consoante a absorção, a brita n° 0 mostrou valor menor que 2%, considerado baixo, comparado a outros tipos de materiais, como por exemplo o resíduo de construção e demolição e o agregado sinterizado de argila calcinada (ASAC), iguais a 6,25% e 15%, respectivamente (Barbosa, 2016). Ressalta-se que um baixo valor indica um menor consumo de CAP na mistura, (VASCONCELOS, 2020). Pertinente a densidade relativa real, resultaram 2,52 g/cm³ e 2,70 g/cm³ para a areia e pó de pedra, respectivamente. Ambos os valores se encontram muito próximos aos mencionados pela literatura para fins de caracterização da massa asfáltica (Monteiro, 2020; Vasconcelos, 2020; Barbosa, 2016; SILVA, 2014)

Propriedades	Norma	Resultado
Densidade Relativa Real – brita 0	DNIT 413 (2021)	2,77 g/cm³
Densidade Relativa Aparente – brita 0	DNIT 413 (2021)	2,75 g/cm³
% Absorção – brita 0	DNIT 413 (2021)	0,36%
Densidade Relativa Real – areia	DNIT 411 (2021)	2,52 g/cm³
Densidade Relativa Real – pó de pedra	DNER-ME 085/94	2,70 g/cm³

Tabela 8 – Composição dos agregados. Fonte: DNIT 2021 (Adaptado pelo Autor)

4.1.2 Dosagem da Mistura Asfáltica

Na dosagem dos compósitos asfálticos adotou-se como referencial as diretrizes da norma DNIT 031 (2006). Específico a dosagem mineral, esta resultou: brita 0 = 35%, areia = 45% e pó de pedra = 20%. O teor de projeto igual a 5,40% para o material asfáltico determinou-se pelo método Marshall. Os valores dos parâmetros volumétricos da formulação asfáltica, constantes na Tabela 9, mostram-se em conformidade com a norma DNIT 031/2006.

Parâmetros	Resultados	Especificação DNIT (2006)
Volume de Vazios Vv (%)	3,7	3 – 5
Vazio do agregado mineral VAM (%)	13,5	13 –18
Relação betume/volume de vazios (VCB/VAM) RBV (%)	77,4	75 – 82

Tabela 9 – Parâmetros volumétricos. Fonte: Ardo Construtora.

Durante a produção da massa asfáltica na usina, de forma rotineira, coletavam-se amostras para fins de controle tecnológico, determinado a porcentagem do teor de betume na mistura asfáltica, em conformidade com a norma DNER-ME 053 (2004). Um exemplo desse procedimento é apresentado na Tabela 10.

Concreto Asfáltico - Porcentagem de Betume (DNER-ME 053/94)	
Peso da amostra total (g)	400
Peso após extração de betume (g)	378,76
Porcentagem de betume (%)	5,40

Tabela 10 – Porcentagem de betume da Massa Asfáltica. Fonte: Ardo Construtora.

A Tabela 11 apresenta os requisitos exigidos pela norma DNIT 031, para fins de confecção de mistura asfáltica destinada a construção de camadas de rolamento. Após a extração do betume, em conformidade a norma DNIT 412 (2009), obteve-se a curva granulométrica da massa asfáltica para o teor de CAP de 5,40 %, exposta na Figura 9. Determinado pela norma DNIT 031, a tolerância mínima e máxima da curva granulométrica da faixa C, são representadas pela linha verde. A linha avermelhada exibe a curva granulométrica da massa asfáltica do projeto, que se mostra dentro dos parâmetros exigidos pela mencionada norma. Deste modo, os resultados granulométricos, obtidos após a realização dos ensaios no laboratório da empresa ARDO, enquadraram-se dentro das tolerâncias mínimas e máximas,

bem como quanto a porcentagem de CAP na composição. A Tabela 12 apresenta os quantitativos finais em termos percentuais dos integrantes da mistura asfáltica.

Peneiras		**Percentual em massa passante**	**Percentual do ligante asfáltico**
Série ASTM	Abertura (mm)	Tolerância Faixa C – DNIT (%)	Tolerância Faixa C – DNIT (%)
2 ‘’	50,8	-	5 – 7
1 ½ ‘’	38,1	-	
1’’	25,4	-	
¾ ‘’	19,1	100,00	
½ ‘’	12,7	80 – 100	
3/8 ‘’	9,5	70 – 90	
N° 4	4,8	44 – 72	
N° 10	2	22 – 50	
N° 40	0,42	8 – 26	
N° 80	0,18	4 – 16	
N° 200	0,075	2 – 10	

Tabela 11 – Composição do concreto asfáltico. Fonte: DNIT 2006 (Adaptado pelo Autor).

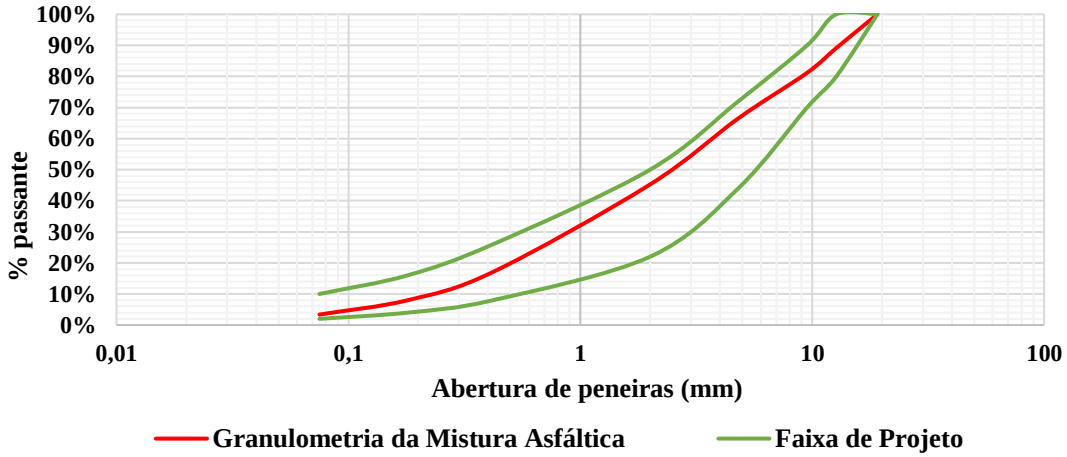

Figura 9 – Curva Granulométrica da Massa Asfáltica. Fonte: Ardo Construtora.

COMPONENTES	**DOSAGEM (%)**
Brita n° 0	33,11 %
Areia	18,92%
Pó de Pedra	42,57%
CAP (50-70)	5,40%

Tabela 12 – Porcentagens dos integrantes da mistura asfáltica estudada. Fonte: Autor

Relativo aos ensaios mecânicos, a Tabela 13 apresenta um exemplo de resultados após a realização dos ensaios de estabilidade Marshall (DNER-ME 043, 1995) e resistência à tração por compressão diametral (DNIT 13, 2018), cujos valores foram, respectivamente, de 1.093,69 kgf e 1,13 MPa, assim sendo, dentro da tolerância citada em norma. O resultado para estabilidade Marshall foi superior 500 kgf, valor mínimo exigido por norma, e para a resistência a tração (RT) também acima do valor mínimo igual a 0,65 MPa. Portanto, tais resultados

atenderam quanto a exigência da norma DNIT 031 (2006), relacionado ao serviço de pavimentação asfáltica.

Ensaio	Norma	Discriminação	Un.	Resultado
Estabilidade Marshall	DNER 043 (1995)	Altura do corpo de prova	cm	6,60
		Estabilidade lida	kgf	1.137,00
		Estabilidade corrigida	kgf	1.093,69
Resistência a Tração por Compressão Diametral	DNIT 136 (2018)	Altura do corpo	cm	6,48
		Diâmetro do corpo de prova	cm	10,18
		Carga de ruptura	N	11.683,71
		Resistência a tração (RT)	MPa	1,13

Tabela 13 – Parâmetros volumétricos. Fonte: Ardo Construtora.

4.2 Avaliação Do Desempenho Funcional

Os ensaios da avaliação do desempenho funcional ─ Índice de Irregularidade Internacional (IRI), Macrotextura Superficial do Revestimento Asfáltico e Densidade *In Situ* do Pavimento Compactado ─ realizaram-se de imediato ao término das obras de pavimentação, com o uso dos equipamentos pertencentes a empresa ARDO Construtora. As ruas analisadas, segundo os mencionados testes, constam na Tabela 14.

RUA	BAIRRO	ZONA	REALIZAÇÃO DO ENSAIO		
			IRI	MACROTEXTURA	DENSIDADE *IN SITU*
CHUVA BRANCA	COROADO	LESTE	X	X	X
MANAUS	COROADO		X	X	X
ABÉLIA	LAGO AZUL	NORTE	X	X	-
BONSAI	LAGO AZUL		X	X	-
ALPINIAS	LAGO AZUL		X	X	-
PINGO DE OURO	LAGO AZUL		X	X	-
CRISANTEMO BRANCO	LAGO AZUL		X	-	-
AMARILIS	LAGO AZUL		X	X	X
MOREIA	LAGO AZUL		-	X	X
PADRE LUIZ	CIDADE NOVA		X	X	X
MAX TEIXEIRA	CIDADE NOVA		X	X	X
NOEL NUTELS	CIDADE NOVA		X	X	X

Tabela 14 – Ruas avaliadas na cidade de Manaus. Fonte: Própria

RUA	BAIRRO	ZONA	REALIZAÇÃO DO ENSAIO		
			IRI	MACROTEXTURA	DENSIDADE *IN SITU*
BOM PASTOR	SANTA ETELVINA		X	X	X
BOM JESUS	SANTA ETELVINA		-	-	X
SÃO JOSÉ	SANTA ETELVINA		X	X	-
SAGRADO CORAÇÃO DE JESUS	SANTA ETELVINA		X	-	X
VITORIA REGIA	SANTA ETELVINA		X	-	-
SÃO GABRIEL	SANTA ETELVINA		X	-	-
CARANA	SANTA ETELVINA	NORTE	X	-	-
IBITIRAMA	SANTA ETELVINA		X	-	X
PEDRO TEIXEIRA	SANTA ETELVINA		-	-	X
SÃO BARTOLOMEU	SANTA ETELVINA		-	-	X
AKITA	PARQUE 10 DE NOVEMBRO		X	X	-
YOKOHAMA	PARQUE 10 DE NOVEMBRO		X	-	X
KOBE	PARQUE 10 DE NOVEMBRO		X	X	X
AI. B	PARQUE 10 DE NOVEMBRO		-	X	-
SAGA	PARQUE 10 DE NOVEMBRO	CENTRO SUL	X	X	-
NACHANG	PARQUE 10 DE NOVEMBRO		-	X	-
VI	PARQUE 10 DE NOVEMBRO		-	X	X
TOYHASHI	PARQUE 10 DE NOVEMBRO		-	X	X
NATORI	PARQUE 10 DE NOVEMBRO		-	X	-
SALDANHA MARINHO	CENTRO		X	X	X
DOUTOR MACHADO	CENTRO		X	-	X
LUIZ ANTONY	CENTRO	SUL	X	X	X
NATAL	CENTRO		-	X	X
24 DE MAIO	CENTRO		X	X	X

Tabela 14 (Continuação) – Ruas avaliadas na cidade de Manaus. Fonte: Própria

Executaram-se os citados testes de acordo com a demanda de serviço da empresa ARDO. Destaca-se que, as obras de pavimentação possuem a peculiaridade da necessidade imediata da liberação da faixa de rolamento ao término do serviço, buscando evitar o congestionamento no fluxo dos veículos. Salienta-se, igualmente, que após a conclusão efetivaram-se os experimentos sempre no interior de um perímetro de segurança, em um curto período, não comprometendo a segurança dos operadores e nem a geração de congestionamento na via.

4.2.1 Índice de Irregularidade Internacional (IRI)

Os resultados indicados na Tabela 15 são provenientes do ensaio de irregularidade (IRI) com o uso do equipamento MERLIN, usando a metodologia proposta por DEL AGUILA (2020) e os cálculos indicado por CUNDILL (1996).

IDENTIFICAÇÃO DA RUA	NOME DA RUA	VALOR DO ÍNDICE DE IRREGULARIDADE (M/KM)
1	ABÉLIA	3,961
2	BONSAI	4,118
3	ALPINIAS	4,091
4	PINGO DE OURO	4,118
5	CRISANTEMO BRANCO	3,147
6	AMARILIS	4,244
7	PADRE LUIZ	3,295
8	MAX TEIXEIRA	1,399
9	NOEL NUTELS	1,398
10	BOM PASTOR	3,319
11	SÃO JOSE	3,037
12	SAGRADO CORACAO DE JESUS	3,551
13	VITORIA REGIA	6,589
14	SÃO GABRIEL	3,225
15	CARANA	2,7785
16	IBITIRAMA	3,178
17	CHUVA BRANCA	3,01
18	MANAUS	2,933
19	AKITA	3,919
20	YOKOHAMA	2,546
21	KOBE	2,726
22	SAGA	1,436
23	SALDANHA MARINHO	3,170
24	DOUTOR MACHADO	3,380
25	24 DE MAIO	3,160
26	LUIZ ANTONY	1,331

Tabela 15– Valores do Índice de Irregularidade Internacional - IRI. Fonte: Própria.

Na Figura 9 observam-se os valores finais, em função da classificação pelo manual DNIT (2006). As medições, em torno de aproximadamente 85 %, mostraram-se dentro dos limites recomendados pelo órgão e resultaram na classificação regular a excelente. Na Figura 10 verificam-se os valores do IRI em função do limite máximo de trafegabilidade, proporcionando ao condutor uma direção mais segura e confortável, de acordo com as diretrizes da norma ASTM.

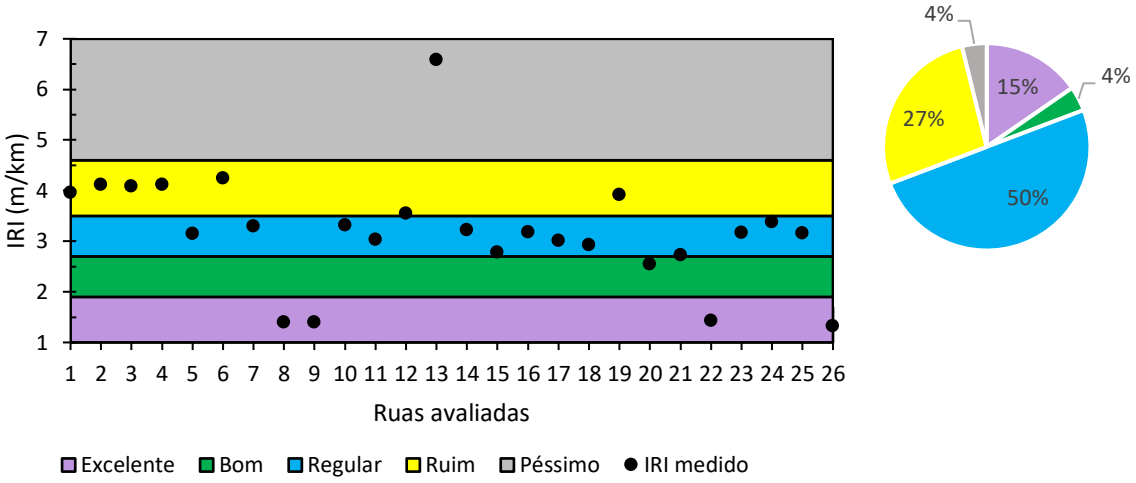

Figura 9 – Valores do IRI. Fonte: Própria.

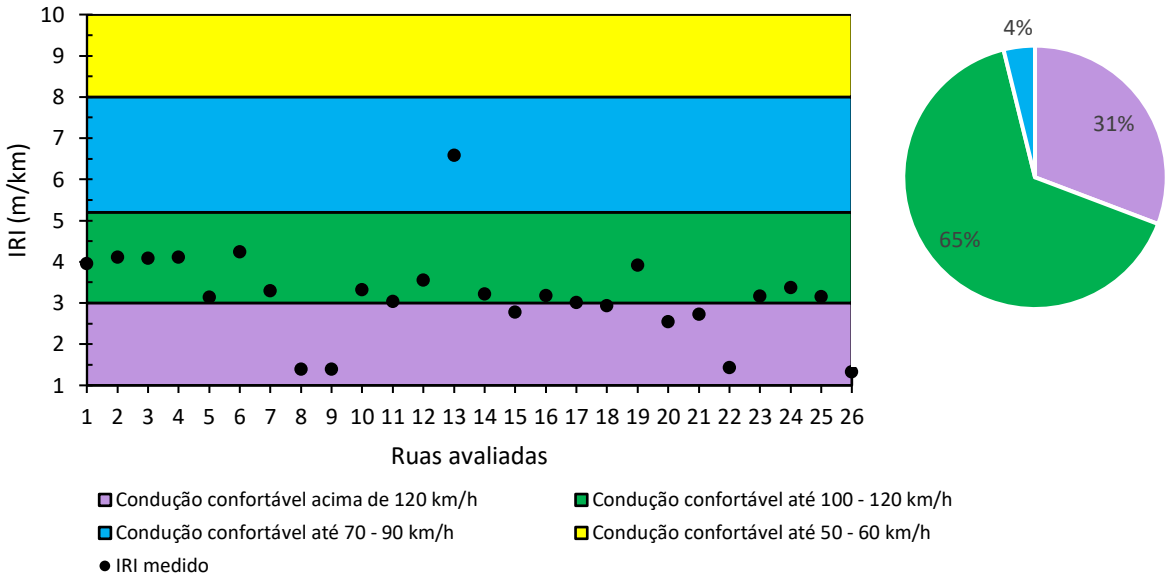

Figura 10– Valores do IRI. Fonte: Própria.

Conforme Figura 10 e de acordo com a classificação ASTM (2021) posterior a realização do teste com o uso do MERLIN, tem-se os seguintes valores:

a) Para 65 % a condução veicular é segura e confortável, dentro do limite máximo de tráfego em até 120 km/h;

b) Para 31 % condução veicular é segura e confortável em um limite de tráfego superior a 120 km/h; e

c) Para 4 % a condução veicular é segura e confortável em um limite de tráfego máximo em até 90 km/h.

Em conformidade ainda com o conteúdo da Tabela 10, e analisando o desempenho da funcionalidade atrelado as exigências de limite máximo de condução do CTB (1997) e as diretrizes da norma ASTM (2021), o pavimento betuminoso apresenta condições satisfatórias e funcionais ao condutor.

Sandhya (2020) encontrou um índice de condição do pavimento (PCI) baseado no uso do MERLIN, sendo uma medida estática que requeria inspeção manual/visual e levantamento das estradas. Baseando-se no estudo de Asphalt Institute, o pesquisador, realizou a medição da extensão longitudinal de uma via, para condições não recém-construída, e avaliou a quantidade de patologias presentes ao longo do trecho, e por extensão.

Os valores determinados nas 26 ruas avaliadas na cidade de Manaus, após a elaboração de uma média aritmética do IRI, resultaram em 3,19 m/km e um desvio padrão (DP) de 1,10. Por ser uma via recém pavimentada, a presença de patologias foi quase nula. Contudo, vários fatores devem ser mencionados:

a) Todas as ruas avaliadas, possuíam extensão, largura e forma geométrica diferentes, e nem todas foram construídas com revestimentos asfálticos de espessura igual a 5 cm;

b) As ruas do bairro de Santa Etelvina apresentaram uma elevada declividade ao longo da sua extensão longitudinal. Diferente das ruas do Centro e Lago Azul, que mostraram baixas declividades ao longo. Por outro lado, nas ruas do Parque 10 e Cidade Nova, verificaram-se uma configuração próximo a uma superfície plana;

c) As ruas do bairro Coroado (Chuva Branco e Manaus) e do Centro (Luiz Antony) situavam-se em uma curva bastante acentuada;

d) Em algumas partes dos trechos das ruas do bairro Parque 10, aplicaram-se asfalto sobre a camada fresada.

A média dos índices encontrados registraram vias em condições trafegáveis, apoiado na classificação por Sandhya (2020). Portanto, com poucas sugestões de manutenções e reparos.

Penumatsa (2016) avaliou uma via, confeccionada com revestimento asfáltico, tendo 10 km de extensão. A média dos resultados do IRI (Merlin) para medições em cada bordo foram 3,43 m/km e 3,87 m/km, respectivamente, sendo posteriormente classificados em conformidade com Indian Road Congress (IRC 16, 2004). Pelo procedimento do ensaio, os valores ficaram dentro da condição média (IRC 16, 2004).

Na pesquisa em pauta, fundamentado no procedimento de Penumatsa (2016) no que tange a classificação de valores para condição do IRC (2004) e a condição de medição para uma extensão mínima de 10 km, os valores não divergiram. Na Tabela 16 tem-se a classificação pelo Indian Road Congress (IRC 16, 2004).

TIPO DE SUPERFÍCIE	CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO - IRI (m/km)		
	BOM	MÉDIO	RUIM
Tratamento Superficial	< 3,5	3,0 – 4,5	> 4,5
Concreto Asfáltico	< 3,0	3,0 – 4,0	> 4,0

Tabela 16– Classificação IRC. Fonte: Adaptado, IRC 2006.

A média dos resultados, explicitados na Tabela 15, mostra uma média de IRI aproximadamente igual a 3,19 m/km para a cidade de Manaus. De tal modo, tipificando uma condição média de acordo com a Tabela 16, para os revestimentos asfálticos das ruas avaliadas.

4.2.2 Macrotextura Superficial do Revestimento Asfáltico

A partir dos dados oriundos do ensaio de Macrotextura Superficial do Revestimento Asfáltico, e da determinação do desvio padrão tem-se os resultados mostrados na Tabela 17, e na Figura 11 em função da classificação do manual DNIT (2006). Pela quantidade de medições apresentada na Tabela 17 verificam-se variações, ou seja, nem todas as vias foram possíveis de investigação, posto que, a empresa somente permitiu realizar as medições com a devida segurança dos pesquisadores.

N° IDENTIFICAÇÃO DA RUA	**RUA**	**QUANTIDADE DE MEDIÇÕES**	**MÉDIA DA PROFUNDIDADE DA MACROTEXTURA (HS)**	**DESVIO PADRÃO**
1	ABÉLIA	8	0,36	0,08
2	ALPINIAS	8	0,49	0,26
3	BONSAI	8	0,38	0,10
4	PINGO DE OURO	11	0,48	0,19
5	AI. B	8	0,40	0,15
6	BOM PASTOR	11	0,49	0,23
7	SÃO JOSÉ	7	0,43	0,18
8	MOREIA	7	0,43	0,13
9	AMARILIS	10	0,63	0,21
10	NACHANG	5	0,91	0,41
11	KOBE	9	0,84	0,66
12	VI	5	0,30	0,07
13	AKITA	6	0,47	0,23
14	TOYHASHI	6	0,53	0,12
15	SAGA	6	0,84	0,44
16	PADRE LUIZ	10	0,56	0,16
17	NATORI	6	0,49	0,19
18	LUIZ ANTONY	3	0,32	0,01
19	MAX TEIXEIRA	3	0,50	0,03
20	SALDANHA MARINHO	3	0,48	0,10
21	NOEL NUTELS	3	0,42	0,03
22	NATAL	3	0,51	0,06
23	24 DE MAIO	3	0,45	0,14
24	CHUVA BRANCA	3	0,37	0,01

Tabela 17– Ruas avaliadas pelo Ensaio da Mancha de Areia. Fonte: Própria.

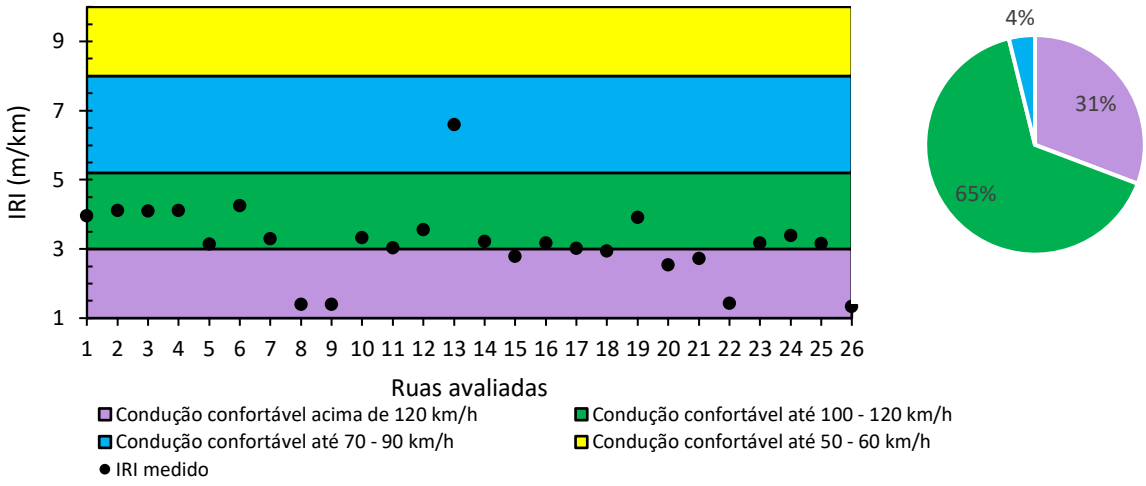

Figura 11– Mancha de Areia DNIT. Fonte: Própria.

Os resultados presentes na Figura 11 indicam: 62,50% das ruas avaliadas no estudo em pauta possuem uma macrotextura média, classificação indicativa para ruas exercerem uma boa funcionalidade em relação a macrotextura (DNIT, 2011); 12,50% uma macrotextura grosseira ou aberta e 25,00 % uma macrotextura muito fina ou muito fechada.

Enfatiza-se que, apesar de todas as vias terem sido construídas com mesma composição asfáltica, o quantitativo igual a 25 %, possivelmente pode retratar as medições próximas as extremidades dos bordos, cujo processo de acabamento com o uso da ferramenta rastelo resultava uma superfície mais aberta. No caso do valor de 12,5%, estas representam as medições realizadas no eixo central da pista, cujo local possui uma maior frequência do número de atividades durante o processo construtivo.

Ferreira (2002) tipificou a profundidade da macrotextura prescrita pelo DNIT (2006) e por Pasquet (1962) em função da condição de trafegabilidade segura do condutor. O pesquisador elaborou um gráfico para classificação da profundidade da macrotextura, associado a condição do limite máximo de trafegabilidade do CTB (1997). Consoante a essa proposta tem-se na Figura 12 os resultados obtidos para as ruas de Manaus, que se enquadram dentro da velocidade permitida para locomoção, e em conformidade ao código de trânsito brasileiro (BRASIL, 1997).

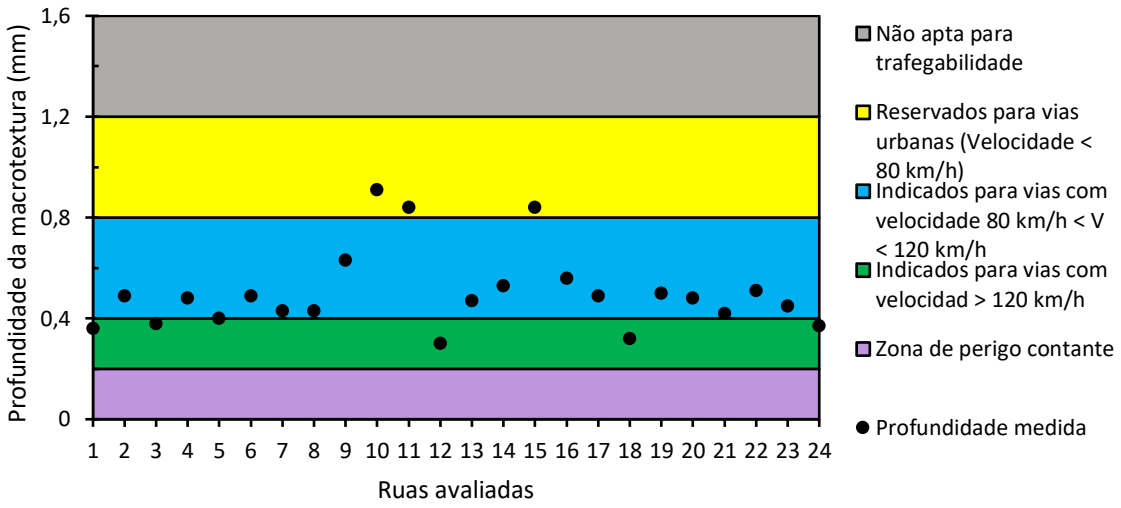

Figura 12 – Mancha de Areia DNIT. Fonte: Adaptado Ferreira 2002

Pressupondo que as vias avaliadas nesta pesquisa, de acordo com o CTB (1997), possuam por lei um limite máximo de trafegabilidade entre 40 km/m a 80 km/h, os valores apresentados na Figura 12 resultam, quanto ao desempenho funcional da macrotextura do revestimento CA: satisfatório para 87 % e mais do que satisfatório para 13% objetivando uma condução veicular com segurança e conforto.

4.2.3 Densidade *in situ* do pavimento compactado

Os resultados das medições com o uso do equipamento eletromagnético da fabricante TransTech, com referência a quantidade de medições e aferições, assim como quanto ao grau de compactação, densidade e temperatura, estão expostos na Tabela 18 e Figuras 13 a 15.

N° IDENTIFICAÇÃO DA RUA	RUA	QUANTIDADE DE MEDIÇÕES	QUANTIDADE DE AFERIÇÕES
1	SAGRADO CORAÇÃO DE JESUS	3	15
2	PEDRO TEIXEIRA	3	15
3	SÃO BARTOLOMEU	3	15
4	IBITIRAMA	3	15
5	BOM JESUS	3	15
6	BOM PASTOR	3	15
7	MANAUS	7	35
8	VI	7	35

Tabela 18 – Ruas Avaliadas ao Ensaio de Densidade *In situ*. Fonte: Própria.

N° IDENTIFICAÇÃO DA RUA	RUA	QUANTIDADE DE MEDIÇÕES	QUANTIDADE DE AFERIÇÕES
9	KOBE	6	30
10	YOKOHAMA	5	25
11	TOYASHI	4	20
12	MOREIA	8	40
13	AMARILIS	6	30
14	PADRE LUIZ	5	25
15	LUIZ ANTONY	3	15
16	MAX TEIXEIRA	4	20
17	SALDANHA MARINHO	3	15
18	RUA NATAL	3	15
19	NOEL NUTELS	3	15
20	DOUTOR MACHADO	3	15
21	24 DE MAIO	3	15
21	CHUVA BRANCA	5	25

Tabela 18 (Continuação) – Ruas Avaliadas ao Ensaio de Densidade *In situ*. Fonte: Própria.

A Figura 13 demonstra que 47 % e 53 % das medições resultaram no grau de compactação próximo ao mínimo e dentro dos parâmetros exigidos pelo DNIT, respectivamente. A Figura 14 mostra os valores da Densidade *in situ* das 21 ruas pesquisadas, cuja média resultou igual a 2348,82 kg/m³. Na Figura 15 são registrados os satisfatórios valores de temperatura, com uma média de 49,95 °C. Ressalta-se que, para realização do serviço de pavimentação, a temperatura ambiente deve ser superior a 10°C e inferior a 177°C, devido ao comportamento reológico do CAP (DNIT 031, 2006).

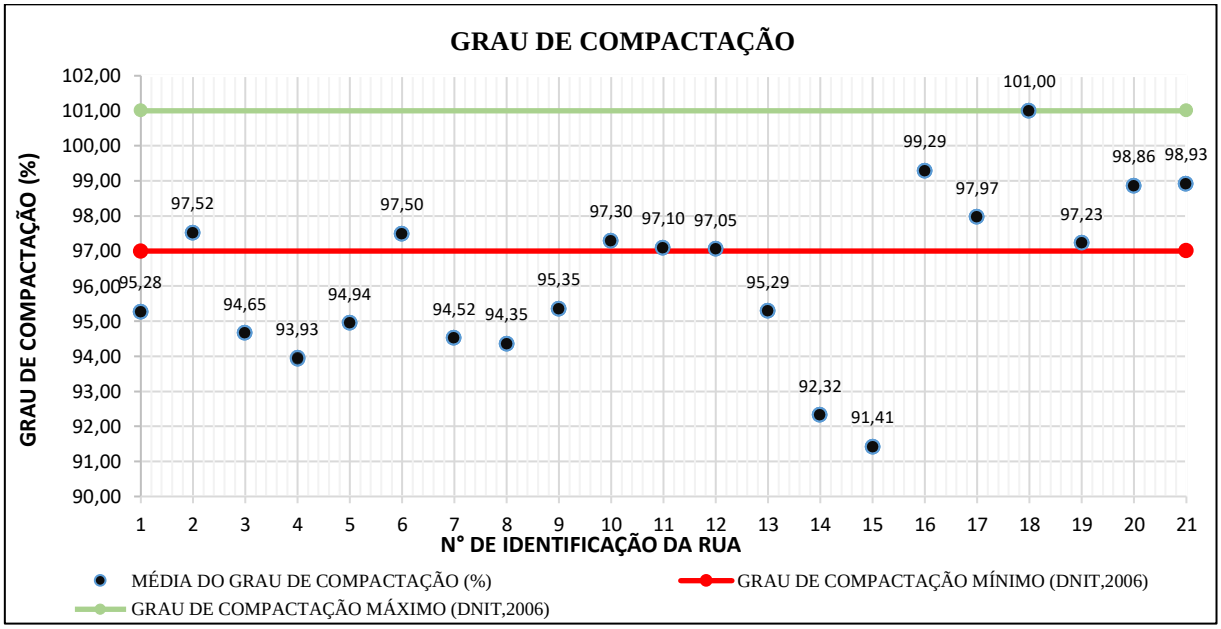

Figura 13 – Medição do GC pelo Densímetro Eletromagnético. Fonte: Própria.

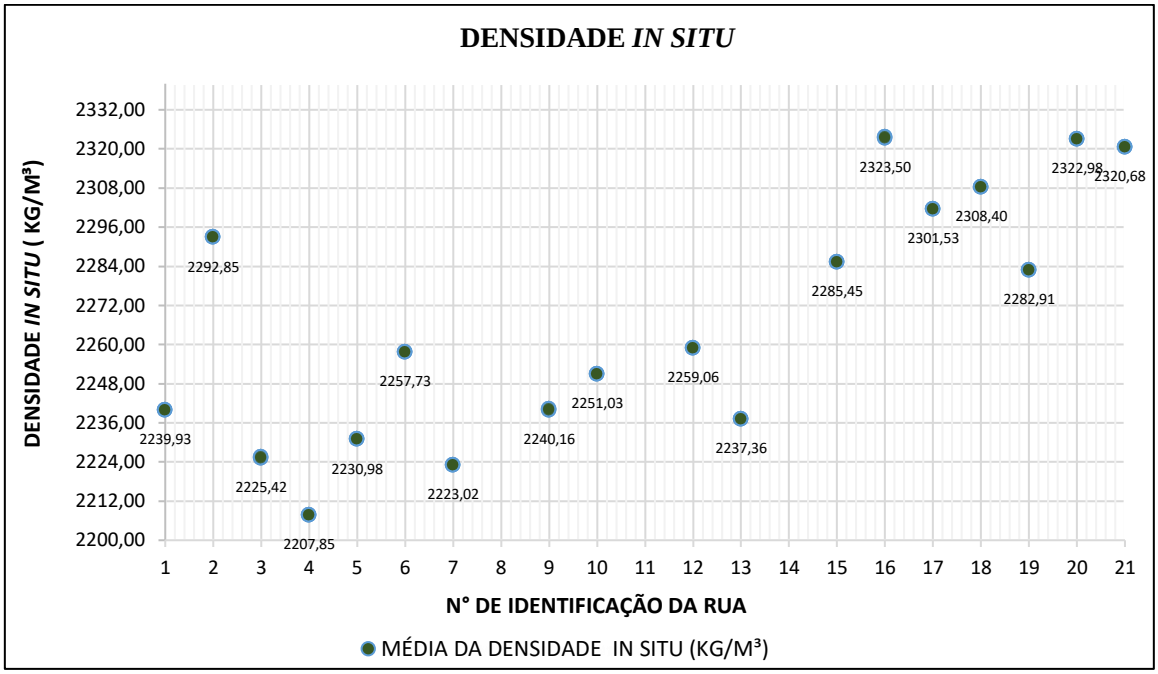

Figura 14 – Medição da Densidade pelo Densímetro Eletromagnético. Fonte: Própria.

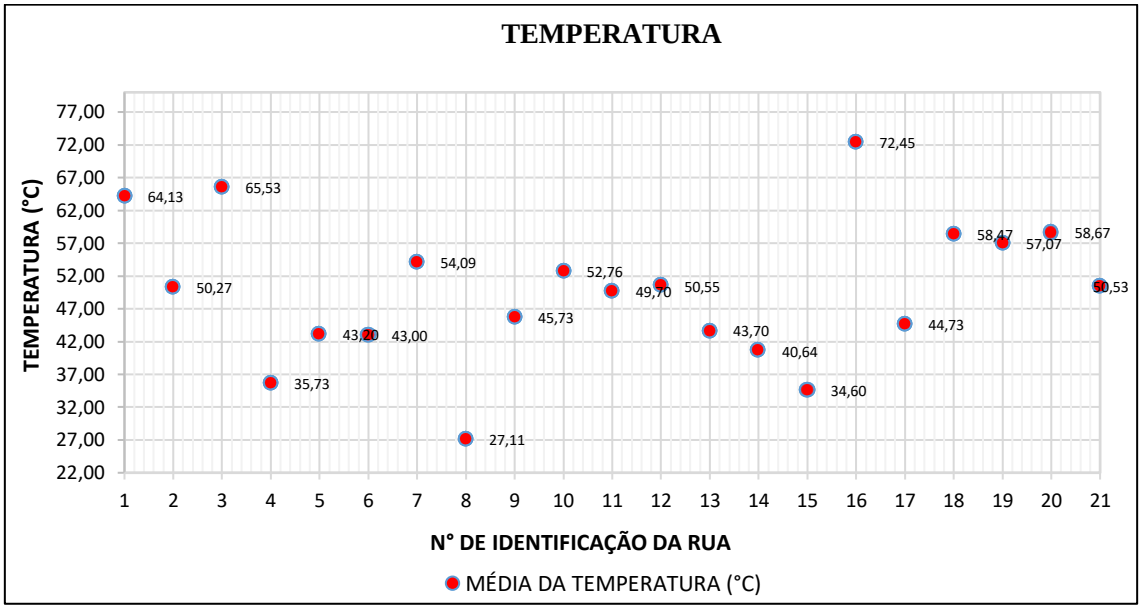

Figura 15 – Aferição da Temperatura pelo Densímetro Eletromagnético. Fonte: Própria.

A partir dos dados constantes na Tabela 19 obteve-se o desvio padrão, grau de compactação (GC) e as temperaturas. Aqueles alusivos ao GC, cuja exigência do DNIT (2006) cita a faixa entre 97% a 101%, registraram-se satisfatórios e igual a 55%, oriundos da média das 21 vias avaliadas, no qual contemplou as ruas: Bom pastor (97,50 %), Yokohama (97,30%), Toyashi (97,10%), Moreia (97,04%), Max Teixeira (99,29%), Saldanha Marinho (97,97%), Rua Natal (101,00%), Noel Nutels (97,23%), Dr. Machado (98,86%), Vinte e Quatro de Maio (98,93%) e Chuva Branca (98,78%). No que se refere a Densidade *in situ*, as ruas estudadas

apresentam 2207,85 kg/m³ a 2323,50 kg/m³; e por fim, no que tange a medição da temperatura resultou na faixa 27°C a 72°C. Destaca-se que, as temperaturas compreendidas entre 27°C a 40°C foram atingidas durante o trabalho noturno.

RUA	MÉDIA DA DENSIDADE *IN SITU* (kg/m³)	Desvio Padrão	MÉDIA DO GRAU DE COMPACTAÇÃO (%)	Desvio Padrão	MÉDIA DA TEMPERATURA (°C)	Desvio Padrão
SAGRADO CORAÇÃO DE JESUS	2239,93	17,36	95,28	0,79	64,13	2,75
PEDRO TEIXEIRA	2292,85	49,40	97,52	0,92	50,27	5,31
SÃO BARTOLOMEU	2225,42	12,70	94,65	0,61	65,53	8,81
IBITIRAMA	2207,85	36,15	93,93	1,52	35,73	7,76
AMARILIS	2237,36	41,47	95,29	1,80	43,70	2,56
PADRE LUIZ	2469,38	1416,89	92,32	1,63	40,64	5,28
LUIZ ANTONY	2285,45	28,53	91,41	1,17	34,60	2,10
MAX TEIXEIRA	2323,50	39,94	99,29	1,11	72,45	12,91
SALDANHA MARINHO	2301,53	16,24	97,97	0,70	44,73	8,28
RUA NATAL	2308,40	31,89	101,00	167,67	58,47	18,95
NOEL NUTELS	2282,91	20,72	97,23	0,85	57,07	19,50
DOUTOR MACHADO	2322,98	34,33	98,86	1,37	58,67	9,93
24 DE MAIO	2320,68	29,21	98,93	1,37	50,53	8,88
CHUVA BRANCA	2318,96	29,51	98,78	1,29	48,18	8,96
MANAUS	2223,02	37,84	94,52	1,65	54,09	5,09
VI	2735,65	3427,01	94,35	1,28	27,11	2,88
KOBE	2240,16	20,25	95,35	0,93	45,73	1,76
YOKOHAMA	2251,03	24,67	97,30	1,06	52,76	8,66
TOYASHI	3309,42	4632,70	97,10	1,40	49,70	8,80
MOREIA	2259,06	36,47	97,05	1,54	50,55	3,92
BOM PASTOR	2257,73	38,03	97,50	1,57	43,00	1,31
BOM JESUS	2230,98	22,92	94,94	0,98	43,20	0,56

Tabela 19 – Resultados da Densidade *in situ*, GC, temperatura e desvios padrão. Fonte: O autor.

Realça-se que a associação da Densidade *in situ* e o grau de compactação não podem ser sugeridas, como analogias diretamente proporcionais. Por exemplo, dentre a as vias apresentadas na Tabela 14, a rua Ibitirama apresentou menor valor da Densidade *in situ* (2207,85 kg/m³) para um grau de compactação de 93,93%, enquanto a avenida Max Texeira evidenciou o maior resultado da Densidade *in situ* (2323,50 kg/m³) para um grau de compactação de 99,29%. Por outro lado, a rua Natal explicitou o maior grau de compactação com 101,00%, e um valor da Densidade *in situ* de 2308,40 kg/m³ e, por fim, a rua Luiz Antony mostrou menor valor do grau de compactação de 91,41 %, e um valor de Densidade *in situ* igual a 2285,45 kg/m³.

Os valores da temperatura da via compactada (Tabela 15) não evidenciaram uma padronização, possivelmente devido as diferentes condições climáticas do turno em que foram realizados os ensaios, e pelas características reológicas do CAP. As temperaturas mais elevadas, com valores de 72,45 °C e 65,53°C, resultaram medições efetivadas no período vespertino, enquanto as temperaturas menos elevadas, de 34,60°C e 27,11°C, foram aferidas no período noturno.

Nota-se que o cimento asfáltico de petróleo possui suas características reológicas susceptíveis a temperatura. Quando exposto a altas temperaturas o ligante comporta-se como fluido viscoso e, a baixas temperaturas, a parcela de influência viscosa diminui e mostra-se como sólido elástico. Portanto, de suma importância a determinação da temperatura. Outrossim, de acordo com Silva (2014), no caso específico de Manaus, as vias urbanas expressam deterioração prematura por diversas causas, dentre elas, enfatiza a incompatibilidade do ligante às temperaturas locais. O CAP 50/70, utilizado como material betuminoso na composição das misturas asfálticas regionais, não se mostra como o mais recomendado, em decorrência das elevadas temperaturas ocorrentes na capital do Estado do Amazonas.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÃO

O trabalho em pauta acompanhou o processo de confecção das misturas do tipo Concreto Asfáltico na usina da ARDO CONSTRUTORA e PAVIMENTAÇÃO LTDA, a execução dos serviços de pavimentação em vias da cidade de Manaus-AM realizados pela mencionada empresa, bem como a materialização dos ensaios técnicos de avaliação do desempenho funcional, objeto maior da presente investigação.

O desenvolvimento do estudo permitiu concluir os seguintes pontos:

a) O grau de compactação das 21 ruas analisadas, por meio da Densidade *in situ*, igual a 46% enquadraram-se na exigência mínima da norma DNIT 031(2006), cujo valor mínimo é de 97%.;

b) O Índice de Irregularidade alcançou um valor em torno de 81,00 % concernente as 26 ruas avaliadas, logo, de acordo com a classificação do DNIT, mostraram condições de trafegabilidades boas e regulares. Pertinente a classificação ASTM, o percentual registrou valor de 85,00 %, que tipificou a trafegabilidade como segura e confortável, até um limite de velocidade média de 120,00 km/h;

c) O ensaio da Mancha de Areia evidenciou valor igual a 62,50% do total das 23 ruas examinadas, indicando-as com uma boa funcionalidade, em conformidade com a classificação DNIT. Relativo ao estudo de Ferreira (2002), o valor alterou para 82,00 %, demonstrando condições seguras e trafegáveis;

d) As medições de temperatura, por meio do densímetro eletromagnético, registraram temperaturas elevadas, com valores de 72,45 °C e 65,53°C no período vespertino, ao passo que a noite alcançaram menores valores iguais a 34,60°C e 27,11°C;

e) Pelo exposto, os resultados das aferições do desempenho funcional do revestimento do tipo CA das ruas da cidade de Manaus -AM, evidenciaram, em regra, satisfatórios, de acordo com as tipificações das normativas brasileiras e internacionais, e as demais referências citadas na literatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução No. 19, de 11 de julho de 2005.** ANP, Rio de Janeiro, 2005;
2. ANTUNES, M. A. G.; GUIMARÃES, A. C. R.; ROCHA, M. L. Desempenho funcional, estrutural e de segurança viária de um pavimento rodoviário construído com resíduos reciclados de ardósia ao longo de três anos. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais,** v.12, n.4, p.364-381, janeiro de 2021. DOI: http://doi.org/10.6008/CBPC2179- 6858.2021.004.0029. Acesso em: 10 de abril de 2023. Acesso em 01 de abril de 2023;
3. AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **C136/C136M**: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Estados Unidos da América: ASTM, 2014;
4. AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **C128**: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. Estados Unidos da América: ASTM, 2015;
5. AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **E1926 − 08**: Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements1. Estados Unidos da América: ASTM, 2021;
6. AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **D7830/D7830M-14**: Standard Test Method for In-Place Density (Unit Weight) and Water Content of Soil Using an Electromagnetic Soil Density Gauge Estados Unidos da América: ASTM, 2021;
7. AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **E965 − 15:** Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique1 Estados Unidos da América: ASTM, 2019;
8. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, ANAC. Estabelece requisitos de aderência para pistas de pouso e decolagem. **Resolução nº 236 de 5 de junho de 2012.** Diário Oficial da União, p. 6, 12 de junho de 2012;
9. AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES, ANTT. **Relatório final do recurso de desenvolvimento tecnológico rdt: irregularidade longitudinal de pavimentos: correlação entre qi e iri e comparação de equipamentos**. Nova Lima, Mg: agosto de 2017. 358 páginas.
10. ARTERIS. **Determinação Da Densidade De Pavimentos Asfálticos Com O Densímetro Elétrico.** São Paulo: novembro, 2019, 7 Páginas;

11. ARTERIS. **Medição da Irregularidade Longitudinal De Pavimentos Com Equipamento Merlin**. São Paulo: abril, 2017, 8 Páginas;
12. ARTERIS. **Medição da profundidade da macrotextura de pavimentos utilizando técnica volumétrica**. São Paulo: fevereiro, 2016, 6 Páginas;
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16504** - Misturas asfálticas - Determinação da profundidade média da macrotextura superficial de pavimentos asfálticos por volumetria - Método da mancha de areia. Rio de Janeiro: ABNT, 2016;
14. Allen, David L.; Schultz, David B. Jr.; and Willett, David Allen, "Evaluation of Non-Nuclear Density Gauges". **Kentucky Transportation Center Research Report**. V. 224, agosto. 2003. Disponível em: http://dx.doi.org/10.13023/KTC.RR.2003.24. Acesso em: 23 de setembro de 2022.
15. BARBOSA, CLÁUDIA ÁVILA. **Misturas do tipo stone matrix asphalt (sma) com agregados alternativos, fibra do curauá e nanomaterial.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, p. 148. 2016
16. BARELLA, R. M. **Contribuição para a Avaliação da Irregularidade Longitudinal dos Pavimentos com Perfilômetros Inerciais**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2008;
17. Bernucci, L.B.; Motta, L.M.G; Ceratti, J.A.P.; Soares, J.B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2° edição. Rio de Janeiro. Petrobras e Abeda. 2022;
18. Bueno, Lucas Dotto. **Contribuição para a previsão empírico-mecanicista da irregularidade longitudinal e seus desdobramentos econômicos em pavimentos asfálticos.** Tese (Doutorado em Engenharia civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul. p. 388;
19. BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Transporte e da Mobilidade Urbana. **Plano de Mobilidade Urbana de Manaus** (Volume 01). 2015;
20. BRASIL. Ministério Dos Transportes – Mt. Lei Nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Dispõe sobre código de trânsito brasileiro. Brasília, Df: Diário oficial da união, 1997.
21. BRIDGELALL, R. M.; RAHMAN, M. T.; TOLLIVER, D.D.; DALEIDEN, J. F. Use of Connected Vehicles to Characterize Ride Quality. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. Washington D. C., Estados Unidos da América, 2016;

22. Carl Becker; Schalk Els. Effect of surface roughness on tyre characteristics. **Journal of Terramechanics.** V. 102, P. 27 – 48. janeiro, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jterra.2022.04.003. Acesso em: 25 de setembro de 2022;
23. Cláudia Azevedo Pereira; Jorge Barbosa Soares; Ivaldo Dário da Silva Pontes Filho; Verônica Teixeira Franco Castelo Branco. Análise da aderência pneu-pavimento em pontos de ocorrência de acidentes. **Revista Transportes.** v. 20, n. 2. janeiro, 2012. Disponível em: DOI:10.4237/transportes. v20i2.525. Acesso em: 21 de setembro de 2022;
24. Carvalho, Carlos Fabio Cortesão. **Avaliação do Desempenho de pavimentos flexíveis restaurados com revestimento asfáltico para região do URUCU (Coari-AM).** Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Amazonas, Amazonas. p. 105. 21 de junho de 2019;
25. Cyrille Faucharda; Bo Li; Laurent Laguerrec; Bernard Héritierd; Nabil Benjelloune; Moncef Kadi. Determination of the compaction of hot mix asphalt using high-frequency electromagnetic methods. **NDT & E International.** V. 60, P 40-51. dezembro, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.07.004. Acesso em: 25 de setembro de 2022;
26. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **CNT**: Pesquisa CNT de Rodovias. Brasília: CNT, 2021, 4. ed., Brasília Distrito Federal. Disponível em: https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2021/. Acesso em 01 de janeiro de 2023;
27. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **CNT**: Pesquisa CNT de Rodovias. Brasília: CNT, 2019, 3. ed., Brasília Distrito Federal. Disponível em: https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2019/. Acesso em 01 de janeiro de 2023;
28. CUNDILL, M. A. The MERLIN Road roughness machine: User Guide. **TRRL REPORT 229,** 1996;
29. DAS, B.M. Fundamentos de engenharia geotécnica. Cengage Learning, 2015
30. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 367**: Material de enchimento para misturas betuminosas. Rio de Janeiro: DNER, 1997.
31. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 054**: Misturas betuminosas - percentagem de betume. Rio de Janeiro: DNER, 1994;
32. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 043**: Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall. Rio de Janeiro: DNER, 1995;
33. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 084**: Agregado miúdo - determinação da densidade real. Rio de Janeiro: DNER, 1994;

34. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 411/2021**: Pavimentação – Misturas asfálticas – massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas. Rio de Janeiro, 2020;
35. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 413/2021**: Pavimentação – Misturas asfálticas – massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas. Rio de Janeiro, 2020;
36. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 431/2020**: Pavimentação – Misturas asfálticas – Densidade *in situ* usando densímetro não nuclear – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020;
37. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031/2006.** Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico – especificação do serviço. Rio de Janeiro: DNER, 2006;
38. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 428/2022:** Pavimentação – Misturas asfálticas - Determinação Da Densidade Relativa Aparente e Da Massa Específica Aparente De Corpos De Prova Compactados – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022;
39. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Conservação Rodoviária.** Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro. 2005;
40. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro. 2006;
41. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Gerência de Pavimentos.** Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro. 2011;
42. DEL AGUILA, PABLO. **Metodología Para La Determinación De Rugosidad De Los Pavimentos. Lima.** Perú, 2000;
43. Egor Golov; Stanislav Evtyukova; Marina Protsutoa Sergey; Evtyukova; Elena Sorokinaa. **Influence of the road surface roughness (according to the International Roughness Index) on road safety.** Transportation Research Procedia. Vol.63. p 999-1006, janeiro 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.099. Acesso em: 20 de setembro de 2022;
44. ENG Hie Tan, Elsaid M.M. Zahran , Soon Jiann Tan. The optimal use of crumb rubber in hot-mix asphalt by dry process: **A laboratory investigation using Marshall mix design.**

Transportation Engineering. Vol. 10. dezembro de 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100145. Acesso em: 07 de abril de 2023;

45. FERREIRA, Patrícia Nunes. **Avaliação da macrotextura de trechos pavimentados de rodovias estaduais situadas na região insular do município de Florianópolis**. 2002. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/83763. Acesso em: 02 de Janeiro de 2023;
46. GILLESPIE, T. D. **Everything You Always Wanted to Know about the IRI, but Were Afraid to Ask!** In: Road Profiler User Group Meeting. Lincoln, 1992;
47. GERMIN-AIZAC, Julie; Anne Maitre; Franck Balducci; Sarah Montlevier; Marie Marques; Justine Tribouiller; Christine Demeilliers; Renaud Persoons. Bitumen fumes and PAHs in asphalt road paving: Emission characteristics, determinants of exposure and environmental impact. **Environmental Research.** Vol. 228. Julho de 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115824. Acesso em: 10 de abril de 2023;
48. HONG ZHANG; Wenbing Dong; Xian Fang. Road construction and rural household income: Empirical evidence from village road paving in China. Finance Research Letters. Vol. 51. janeiro de 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.frl.2022.103460. Acesso em: 05 de abril de 2023;
49. ENG Hie Tan, Elsaid M.M. Zahran , Soon Jiann Tan. The optimal use of crumb rubber in hot-mix asphalt by dry process: A laboratory investigation using Marshall mix design. Transportation Engineering. Vol. 10. dezembro de 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100145. Acesso em: 07 de abril de 2023;
50. HVEEM, F. N. Devices for Recording and evaluating pavement roughness. **Highway Research Board**. HRB Bulletin 264, 1960;
51. HONG ZHANG; Wenbing Dong; Xian Fang. Road construction and rural household income: Empirical evidence from village road paving in China. **Finance Research Letters.** Vol. 51. janeiro de 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.frl.2022.103460. Acesso em: 05 de abril de 2023;
52. J. Rajendra Prasad; Shalini Kanuganti Pooja; N.Bhanegaonkar Ashoke; Kumar Sarkar. Development of Relationship between Roughness (IRI) and Visible Surface Distresses: A Study on PMGSY Roads. **Procedia - Social and Behavioral Sciences.** V. 104. p. 322-331, dezembro. 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.125. Acesso em: 20 de setembro de 2022;

53. Junfeng Gao; Hainian Wang; Yin Bu; Zhanping You. Influence of Coarse-Aggregate Angularity on Asphalt Mixture Macroperformance: Skid Resistance, High-Temperature, and Compaction Performance. **Journal of Materials in Civil Engineering.** Pag. 32. maio de 2020. Disponível em: <10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003125> Acesso em 01 de Janeiro de 2023;
54. LEOCÁDIO, Alexandre da Silva. **Avaliação da pista de pouso e decolagem do Aeroporto Internacional de Manaus.** Dissertação de Mestrado. Manaus: 77 Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, 2014;
55. XIAO, Manzhe; LUO, Rong; YU, Xiaohe.Assessment of asphalt pavement overall performance condition using functional indexes and FWD deflection basin parameters. **Construction and Building Materials.** Vol. 341. 25 de julho de 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127872. Acesso em: 15 de abril de 2023;
56. MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Mecânica dos Pavimentos.** 3 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015. 640 p.
57. NIETSCHE, P.; GEEM, C. V.; STÜTZ, R.; MOCANU, I.; SJÖGREN, L. Monitoring Ride Quality on Roads With Existing Sensors in Passenger Cars. **26th ARRB Conference.** Sydney, Austrália, 2014;
58. PASQUET, A. (1968); Campangne Nationale de Glissance 1967 em France, in **Colloque International sur la Glissance et la Circulation sur Routes Mouillés**, Berlin, pp 717-732;
59. PEREIRA, Maria Teresa Teixeira Quiroga. **Avaliação da resistência à derrapagem de pavimentos asfálticos urbanos.** Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós- Graduação e Pesquisa em Engenharia, 1998.
60. Sandberg, U. **Influence of road surface texture on traffic characteristics related to environment, economy and safety: A state-of-the-art study regarding measures and measuring methods**. Swedish National Road Administration. Estocomo: Suécia, 1997;
61. Sandhya.M; Divya, Sreekala; Haritha, Purnachand;, Kishor. PERFORMANCE EVALUATION OF PAVEMENT ROUGHNESS- A CASE STUDY. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**. Vol. 07. Capítulo 09. Página 1857-1860. Setembro, 2020. Disponível em < https://www.irjet.net/volume7-issue09 >. Acesso em 05 de janeiro de 2023;

62. SAYERS, M. W.; GILLESPIE, T. D.; QUEIROZ, A. V. **International experiment to establish correlation and standard calibration methods for road roughness.** World Bank Technical Paper 46. The World Bank, Washington D.C., 1984.
63. SAYERS, Michael W.; GILLESPIE Thomas D.; QUEIROZ Cesar A. V. **The International Road Roughness Experiment Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements**. The World Bank. Washington D. C. Estados Unidos da América, 1986;
64. Sangyum Lee; Han Jin Oh; Byoung Hooi Cho. Decision-making process for maintenance of concrete bridge deck with asphalt overlays using automated digital road scanner. **Developments in the Built Environment,** Vol. 12. dezembro de 2022. Disponivel em: https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100103. Acesso em 03 de abril de 2023;
65. SILVA, Antônio Cleiton Lopes. **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS ASFÁLTICOS COM ARGILA CALCINADA SOB FLEXÃO A QUATRO PONTOS**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, p. 129. 2014;
66. SOLOTEST. **Manual de instrução de uso: Medidor de Irregularidades tipo Merlin.** São Paulo: março, 2018. 22 Páginas.
67. SOLOTEST. **Ensaio para Mancha de Areia.** São Paulo: setembro, 2022. 27 Páginas.
68. SONCIM, S. P. **Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de pavimentos asfálticos com base em dados da rede de rodovias do Estado da Bahia.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo. 2011. 241p;
69. Sousa, E. da S., & Oliveira, F. H. L. de. Verificação do parâmetro de macrotextura de pavimentos em serviço por meio da análise digital de imagens. **Revista Tecnologia**. Ceara, Brasil. Vol. 40, n. 1, junho. 2019. Disponível em: https://doi.org/10.5020/23180730.2019.8595. Acesso em: 22 de setembro de 2022;
70. TRANSTECH. **Pavement Quality Indicator, PQI T 380.** Nova York, Estados Unidos: dezembro, 2021. 44 páginas;
71. Trinadh Varma Penumatsa1; M. Jagapathi Raju; C.N.V.S. Reddy. Functional Evaluation of Canal Bank Roads Using Merlin. **International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES).** Vol. 04. Capítulo 10. Páginas 08-12. outubro de 2016. Disponível em << https://www.irjet.net/volume4-issue10 >. Acesso em 02 de janeiro de 2023;
72. Vasconcelos, Leandra Libório Costa. **MISTURA ASFÁLTICA COM RESÍDUOS DE PEAD.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Programa de Pós-

graduação em Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, p. 77. 2020.

73. VF Vázquez; M.E. Hidalgo; A.M. García-Hoz; A. Camara; F. Terán; A.M. Ruiz-Teran; S.E. Paje. Tire/road noise, texture, and vertical accelerations: Surface assessment of an urban road. **Applied Acoustics.** V. 160. Março, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107153. Acesso em: 25 de setembro de 2022;
74. You Zhan; Yurong Zhang; Zilong Nie; hiwei Luo; Shi Qiu; Jin Wang; Allen A. Zhang; Changfa Ai; Xiong Tang; Chaoyang Tan. Intelligent paving and compaction technologies for asphalt pavement. **Automation in Construction.** Volume 156, December 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105081. Acesso em: 05 de setembro de 2023.
75. Wang, Siqi; Xin Sui Zhen; Leng Jiwang; Jiang Guoyang Lu. Asphalt pavement density measurement using non-destructive testing methods: current practices, challenges, and future vision. **Construction and Building Materials**, Hong Kong, Vol. 334, n. 128154, agosto. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128154. Acesso em: 13 de julho de 2022;
76. Z. Leng; Z. Zhang; Y. Zhanf; Y. Wang; H. Yu; T. Ling Avaliação laboratorial de medidores de densidade eletromagnética para medição de densidade de mistura asfáltica a quente. **Construction and Building Materials.** Hong Kong. Vol. 158, P. 1055 - 1064, janeiro. 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.186. Acesso em: 23 de setembro de 2022;
77. Z. Leng; Imad L. Al-Qadi. Field Application of Ground-Penetrating Radar for Measurement of Asphalt Mixture Density: Case Study of Illinois Route 72 Overlay. **Sage Journals**. V. 2304, n 1. janeiro, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.3141/2304-15. Acesso em: 20 de setembro de 2022.