

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LILIANE HAAS DE CARVALHO

**ANÁLISE DA RETRORREFLETIVIDADE NA SINALIZAÇÃO VIÁRIA
DE UM TRECHO URBANO DA AVENIDA CAVERÁ NA CIDADE DE
ALEGRETE-RS**

**Alegrete-RS
2024**

LILIANE HAAS DE CARVALHO

**ANÁLISE DA RETRORREFLETIVIDADE NA SINALIZAÇÃO VIÁRIA
DE UM TRECHO URBANO DA AVENIDA CAVERÁ NA CIDADE DE
ALEGRETE-RS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Civil da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Jacson Weber de Menezes

Alegrete-RS

2024

LILIANE HAAS DE CARVALHO

**ANÁLISE DA RETRORREFLETIVIDADE NA SINALIZAÇÃO VIÁRIA
DE UM TRECHO URBANO DA AVENIDA CAVERÁ NA CIDADE DE
ALEGRETE-RS**

Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade
Federal do Pampa, como requisito
parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 02 de Dezembro
de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. JASCON WEBER DE MENEZES – UNIPAMPA – Orientador

Prof. Dr. MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS - UNIPAMPA

Prof. Dr. RENAN GUSTAVO SCHERER - FURG



Assinado eletronicamente por **JACSON WEBER DE MENEZES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/12/2024, às 12:37, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/12/2024, às 15:07, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Renan Gustavo Scherer, Usuário Externo**, em 13/12/2024, às 14:44, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site
https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1620579** e o código CRC **324584A7**.

Dedico este trabalho aos meus pais e à minha irmã, que sempre me apoiaram e continuam a apoiar nos meus sonhos e escolhas.

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar, agradeço a Deus e a Nossa Senhora Aparecida, que, com toda a fé depositada neles, me deram forças para seguir em frente. Agradeço também aos meus pais, Elane Haas de Carvalho e Daniel dos Santos Carvalho, e à minha irmã, Andrieli Haas de Carvalho, que sempre me motivaram com palavras de incentivo e demonstrações de admiração, servindo como minha maior inspiração para continuar.

Minha gratidão especial vai para a família da dona Marisa Gonçalves, que me acolheu como um membro da família. Nos momentos de solidão, sua casa se tornou meu refúgio, e dona Marisa foi como uma segunda mãe para mim. Os inúmeros finais de tarde ao lado da família Gonçalves foram essenciais para minha jornada, e eu jamais teria alcançado este sonho sem o apoio de vocês. Não posso deixar de mencionar a dona Catarina e o senhor Luiz, que também foram como pais para mim, oferecendo sempre seu carinho e suporte.

Agradeço à família Jardim – Eliane, Gabrieli e Gilberto –, que me fizeram sentir parte de sua convivência e sempre estiveram ao meu lado. Meu agradecimento especial vai para meu namorado Matheus Jardim, que, com sua dedicação e constante apoio, foi fundamental para que este trabalho saísse do papel. Não há palavras suficientes para expressar o quanto sua motivação e auxílio fizeram a diferença.

Durante a graduação, não contei apenas com minha família de sangue, mas também com uma grande família em Alegrete, que tornou meu caminho mais leve. Minha gratidão eterna a todos vocês!

Caroline Bremm merece um destaque especial, pois, graças a um inusitado tombo na escada, nossa amizade começou. Desde então, você se tornou minha parceira de caminhada e conselheira, ouvindo longos áudios e sempre pronta a ajudar.

Este trabalho não teria sido possível sem a ajuda de Acsiel Budny, Caroline Bremm e Matheus Jardim, que me acompanharam nas medições, limpavam a sinalização e, quando precisei me ausentar, realizaram medições em meu lugar. Vocês foram compreensivos, dedicados e fundamentais para que este sonho se tornasse realidade.

Aos meus professores, que sempre estavam dispostos a sanar minhas dúvidas, meu muito obrigado. Em especial, agradeço aos professores Dr. Ederli Marangon e Dr. Jaelson Budny, que me acolheram calorosamente no meu primeiro dia de aula, um dos mais difíceis da minha trajetória. Ao meu orientador, Prof. Dr. Jacson Weber de Menezes, registro minha gratidão por sua dedicação, paciência e disponibilidade, mesmo em meio a sua agenda apertada.

Por fim, agradeço à Prefeitura Municipal de Alegrete, especialmente à Secretaria Municipal de Infraestrutura, que autorizou a análise do trecho, à Construtora Alegretense, responsável pela revitalização da Avenida Caverá, e à empresa Sinaro Sinalizadora Rodoviária, que contribuiu com a pintura dos trechos analisados.

“Todos os seus sonhos podem se tornar realidade se você tiver coragem para persegui-los”.

Walt Disney

RESUMO

Para que se tenha uma sinalização viária horizontal eficiente, do ponto de vista de visualização para os condutores, microesferas de vidro devem ser aplicadas a demarcação. A utilização das microesferas causa uma amplificação da luz refletida pela sinalização (pintura na rodovia) de volta aos olhos do motorista devido ao efeito da retrorrefletividade, resultando em uma melhor percepção dos condutores, conseqüentemente, uma diminuição da quantidade de acidentes nas rodovias. Neste sentido, este trabalho consistiu em realizar o monitoramento da retrorrefletividade durante o período de um ano da sinalização horizontal em um trecho urbano da Avenida Caverá, localizado em Alegrete, RS. O objetivo foi avaliar como a visibilidade é afetada ao longo do tempo considerando diferentes espessuras de tinta, tipos e densidades de microesferas. O monitoramento foi realizado com um retrorrefletômetro horizontal para as geometrias de 15 e 30 metros. Para o período de um ano, os resultados não mostraram grandes alterações das medidas de retrorrefletividade entre o primeiro e o último dia de avaliação, porém existe uma tendência de maior durabilidade (tempo até que a sinalização seja refeita) para sinalizações com maior quantidade de microesferas e maior espessura da tinta. Por outro lado, pensando do ponto de vista de custo benefício, os resultados mostraram que a amostra com menor espessura de tinta (0,3 mm) contendo 200 g/l de microesferas Tipo-IB e 400 g/m² de microesferas Tipo-IIA se mostrou mais vantajosa comparado com as outras amostras avaliadas, uma vez que o modelo teórico utilizado revelou uma durabilidade semelhante ao melhor caso (maior quantidade de microesferas (densidade) e maior espessura da tinta), porém com um custo bem inferior. Comparando a amostra de melhor custo benefício com a amostra comumente utilizada nas rodovias (espessura de tinta de 0,5 mm contendo 200 g/l de microesferas Tipo-IB e 400 g/m² de microesferas Tipo-IIA), a durabilidade, conforme o modelo utilizado, aumenta em 40% enquanto que o custo por quilômetro diminui em 30%. Um monitoramento contínuo por um período maior permitirá, com maior precisão, determinar o momento ideal de repintura, contribuindo para a redução de custos e o aumento da segurança no trânsito.

Palavras-Chave :Retrorrefletividade, sinalização horizontal, manutenção de vias, microesferas, segurança viária.

ABSTRACT

In order to have an efficient horizontal signage, glass microspheres must be applied to the demarcation. The use of microspheres causes an amplification of the light reflected by the signage back to the driver's eyes due to the retroreflectivity effect, resulting in a better perception for drivers, consequently, a reduction in the number of accidents on the highways. In this sense, this work consisted of monitoring the retroreflectivity during a period of one year in an urban section of the Caverá Avenue, located in Alegrete, RS. The objective was to evaluate how the visibility is affected over time considering different paint thicknesses, types and densities of microspheres. Monitoring was carried out with a horizontal retroreflectometer for the 15- and 30-meter geometries. For a period of one year, the results did not show major changes in retroreflectivity measurements between the first and last day of evaluation, however there is a tendency towards greater durability (time until the signage is redone) for signs with a greater quantity of microspheres and greater paint thickness. On the other hand, thinking from a cost-benefit point of view, the results showed that the sample with the smallest paint thickness (0.3 mm) containing 200 g/l of Type-IB microspheres and 400 g/m² of Type-IIA microspheres proved to be more advantageous compared to the other samples evaluated, since the theoretical model used revealed a durability similar to the best case (greater quantity of microspheres (density) and greater paint thickness), but at a much lower cost. Comparing the best cost-benefit sample with the sample commonly used on highways (paint thickness of 0.5 mm containing 200 g/l of Type-IB microspheres and 400 g/m² of Type-IIA microspheres), the durability, according to model used, increases by 40% while the cost per kilometer decreases by 30%. Continuous monitoring for a longer period will allow, with greater precision, to determine the ideal time for repainting, contributing to cost reduction and increased traffic safety.

Keywords: Retroreflectivity, horizontal road markings, road maintenance, glass beads, road safety.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Comparação de faixas de pedestre com diferente valores de retrorrefletividade | 18 |
| Figura 2– Representação da reflexão especular..... | 21 |
| Figura 3– Reflexão difusa..... | 22 |
| Figura 4– Retrorreflexão | 22 |
| Figura 5– Linha de eixo esquerda sem material retrorrefletivo e direita equipada com material retrorrefletivo..... | 23 |
| Figura 6 – Ângulos e distância referência | 24 |
| Figura 7 – Ângulo de observação para visão de diferentes veículos | 24 |
| Figura 8– Geometria de 15 metros..... | 25 |
| Figura 9– Geometria de 30 metros | 26 |
| Figura 10 – Exemplos de Retrorrefletômetros: (a) manual e (b) dinâmico | 27 |
| Figura 11 – Aspessor com as microesferas do Tipo IIA e aspessor da tinta que pode conter ou não as microesferas do tipo IB | 33 |
| Figura 12– Ancoragem ideal para microesfera..... | 34 |
| Figura 13 – Fluxograma do acompanhamento do trecho monitorado..... | 41 |
| Figura 14 – Localização da via recuperada..... | 42 |
| Figura 15 – Localização das amostras..... | 43 |
| Figura 16– Execução da marcação..... | 44 |
| Figura 17 – Imagem representando a verificação de: (a) espessura da película de tinta e (b) alinhamento de pistolas..... | 45 |
| Figura 18 – Pintura da tinta branca com microesferas do Tipo-IB e sem a deposição das microesferas do Tipo-IIA | 46 |
| Figura 19– Duas passadas de tinta branca com microesferas do Tipo-IB, sem a deposição das microesferas do Tipo-IIA | 47 |
| Figura 20 – Exemplo de camada com a deposição das microesferas do Tipo-IIA | 48 |
| Figura 21 – Imagem mostrando a segunda pintura da tinta branca com a deposição das microesferas do Tipo-IIA | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 22 – Nomenclatura e combinações avaliadas..... | 50 |
| Figura 23– Retrorrefletômetro e monitor do equipamento..... | 51 |
| Figura 24– Trecho antes da limpeza | 53 |
| Figura 25 – Limpeza de parte do trecho..... | 53 |
| Figura 26 – Posicionamento do equipamento | 54 |
| Figura 27– Localização entre o trecho de estudo e estação pluviométrica | 54 |
| Figura 28– Retrorrefletividade das amostras da demarcação ao longo do tempo – Geometria de 15m..... | 57 |
| Figura 29 – Retrorrefletividade das amostras da demarcação ao longo do tempo – Geometria de 30m..... | 58 |
| Figura 30 – Análise das amostras 04 e 08 com relação a cor para a geometria de 15m | 60 |
| Figura 31 – Retrorrefletividade média da amostra 01 com valores mínimos pelo DNIT – Geometria de 15 e 30m | 62 |
| Figura 32 – Retrorrefletividade média da amostra 02 com valores mínimos pelo DNIT – Geometria de 15 e 30m | 62 |
| Figura 33 – Retrorrefletividade média da amostra 03 com valores mínimos pelo DNIT – Geometria de 15 e 30m | 63 |
| Figura 34 – Retrorrefletividade média da amostra 04 com valores mínimos pelo DNIT – Geometria de 15 e 30m | 64 |
| Figura 35 – Retrorrefletividade média da amostra 05 com valores mínimos pelo DNIT – Geometria de 15 e 30m | 65 |
| Figura 36 – Retrorrefletividade média da amostra 06 com valores mínimos pelo DNIT – Geometria de 15 e 30m | 66 |
| Figura 37 – Retrorrefletividade média da amostra 07 com valores mínimos pelo DNIT – Geometria de 15 e 30m | 67 |
| Figura 38 – Retrorrefletividade média da amostra 08 com valores mínimos pelo DNIT – Geometria de 15 e 30m | 68 |
| Figura 39 – Geometria de 15m: retrorrefletividade média para todos os trechos em função do tempo considerando a precipitação acumulada | 69 |
| Figura 40 – Geometria de 30m: retrorrefletividade média para todos os trechos em função do tempo considerando a precipitação acumulada | 69 |
| Figura 41 – Degradação anual das amostras avaliadas | 71 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Valores mínimos de retrorrefletividade inicial e residual (Definitiva mínima) para as geometrias de 15 m e 30m | 27 |
| Tabela 2 – Normativas que regulamentam o uso de tintas para sinalização horizontal..... | 30 |
| Tabela 3 – Faixas granulométricas das esferas e microesferas de vidro | 31 |
| Tabela 4 – Retrorrefletividade média das amostras ao longo do tempo para a geometria de 15m | 55 |
| Tabela 5 – Retrorrefletividade média das amostras ao longo do tempo para a geometria de 30m | 57 |
| Tabela 6 – Análise do custo-benefício entre as amostras | 72 |

LISTA DE ABREVIATURAS

°C – graus célsius

% – porcentagem

cm – centímetro

g – grama

h – hora

km – quilômetro

l – litro

lux – intensidade luminosa por unidade de área

m – metro

m² – metro quadrado

mm – milímetro

mcd – milicandelas

µm – micrômetro

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres

BR – Brasil

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito

CNT – Confederação Nacional do Transporte

DETRAN-RS – Departamento Estadual de Trânsito do Rio Grande do Sul

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

NBR – Norma Brasileira

SINARO – Sinalizadora Rodoviária LTDA

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 1.1 Objetivo Geral | 19 |
| 1.2 Objetivos Específicos..... | 19 |
| 1.3 Justificativa | 19 |
| 1.4 Estrutura do trabalho..... | 20 |
| 2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA..... | 21 |
| 2.1 Formas de reflexão da luz..... | 21 |
| 2.1.1 Reflexão especular | 21 |
| 2.1.2 Reflexão difusa..... | 21 |
| 2.1.3 Retrorreflexão | 22 |
| 2.2 Geometrias de avaliação da Retrorrefletividade | 23 |
| 2.2.1 Geometria de 15 metros | 25 |
| 2.2.2 Geometria de 30 metros | 25 |
| 2.3 Retrorrefletividade inicial e residual e equipamentos utilizados para medição..... | 26 |
| 2.4 Materiais aglutinantes da sinalização viária..... | 28 |
| 2.5 Esferas e microesferas de vidro..... | 31 |
| 2.6 Modelos de previsão do comportamento da retrorrefletividade | 34 |
| 2.6.1 Modelo desenvolvido por Thamizharasan et al. (2002) | 35 |
| 2.6.2 Modelo desenvolvido por Rasdorf et al. (2009)..... | 35 |
| 2.6.3 Modelo desenvolvido por Hummer et al. (2011)..... | 36 |
| 2.6.4 Modelo desenvolvido por Ozelim e Turochy (2014)..... | 37 |
| 2.6.5 Modelo desenvolvido por Zhang et al. (2013)..... | 38 |
| 2.6.6 Modelo desenvolvido por De Salles et al. (2015) | 39 |
| 2.6.7 Modelo desenvolvido por Renz (2018)..... | 40 |
| 3 METODOLOGIA..... | 41 |
| 3.1 Determinação do trecho para monitoramento | 41 |
| 3.2 Pintura do trecho Experimental..... | 43 |

| | |
|--|-----------|
| 3.3 Monitoramento | 50 |
| 4 RESULTADOS | 55 |
| 4.1 Retrorrefletividade média ao longo do tempo para as geometrias de 15 e 30 metros..... | 55 |
| 4.2 Interferência da Precipitação Acumulada..... | 68 |
| 4.3 Degradação da retrorrefletividade ao longo do tempo..... | 70 |
| 4.4 Comparação em termos de Custo-Benefício..... | 71 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 74 |
| 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 75 |
| 7 REFERÊNCIAS..... | 76 |

1 INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, a frota de veículos vem aumentando e, da mesma maneira, vem elevando o número de acidentes. De acordo com o Departamento Estadual de Trânsito do Rio Grande do Sul (DETRAN-RS, 2022), o maior índice de acidentes de trânsito com vítimas fatais dos últimos cinco anos ocorreu em 2022. A maior parte dos acidentes ocorreu no período noturno, com um percentual de 51,8% dos casos. Comparado com o período diurno, no período noturno existe uma redução do volume de veículos nas rodovias, porém o aumento de casos no período noturno ocorre principalmente devido a imprudência no volante, bem como a má visualização da sinalização.

Neste sentido, a infraestrutura rodoviária no Brasil apresenta desafios significativos, como aponta a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2023) em seu relatório geral: dos 1.720.909 km de rodovias brasileiras, somente 12,4% são pavimentadas, o que equivale a aproximadamente 214 mil km. Esse dado tem implicações diretamente na segurança viária, já que estradas não pavimentadas estão mais suscetíveis a acidentes. Destas vias pavimentadas, aproximadamente 12% estão sob gestão de iniciativas privadas e 88% sob administração pública.

Em uma pesquisa realizada pela CNT (CNT, 2023), foram avaliados todo o trecho privado (~26.093km) e 46% do pavimento que estão sob gestão pública (~85.409 km). No que se refere a sinalização viária, cerca de 73,1% das vias sob gestão pública e 31,5% sob gestão privada estão com algum tipo de problema. Mais especificamente, em torno de 28% das vias públicas são consideradas ruins ou péssimas, enquanto para as rodovias sob gestão privada este número cai para 3,5%. Em suma, a situação das rodovias é preocupante, seja devido ao percentual de poucas estradas pavimentadas bem como com relação à sinalização das pavimentadas.

No que se refere aos tipos de sinalização horizontal e vertical, existem dois: a sinalização provisória e a permanente. A sinalização provisória (temporária) consiste num conjunto de sinais e dispositivos com características visuais próprias, tendo como objetivo principal garantir a segurança dos usuários e dos trabalhadores da obra ou serviço, bem como a fluidez do tráfego nas áreas

afetadas por intervenções temporárias na via (CONTRAN, 2022). A sinalização permanente é composta de sinais de trânsito como placas, painéis, dispositivos auxiliares, marcas viárias, etc. Estas sinalizações tem como objetivo regulamentar, advertir, informar e fornece visibilidade diurna e noturna, auxiliando a organização do trânsito de forma a aumentar a segurança do tráfego de pedestres e motoristas (CONTRAN, 2022).

Em geral, a sinalização tem como objetivo transmitir confiança para o usuário, com os sinais e marcações em locais adequados, bem conservados e de fácil visibilidade, onde se consiga ter o tempo hábil para uma tomada de decisão adequada (CONTRAN, 2022). A noite o campo de visibilidade do condutor fica restrito apenas a iluminação do veículo. Se a sinalização viária estiver em más condições, existe um risco maior à segurança do condutor, ainda mais quando as más condições da sinalização se somam a fatores climáticos como chuva, neblina, etc (Moreira, 2019).

De forma mais específica, a demarcação horizontal tem como função ordenar e canalizar o fluxo de veículos de acordo com o traçado da via. A marcação horizontal consiste na aplicação de elementos texturizados na superfície dos pavimentos de modo que seja de fácil visualização os limites da via. Dessa maneira, o condutor consegue se guiar com a sinalização - que são linhas longitudinais e transversais, zebrados, símbolos, setas e as cores - possibilitando a observação de longas distâncias e permitindo um tempo de reação adequado. Estas marcações podem ser feitas a partir de vários materiais; o que vai interferir na escolha é a conservação do pavimento, natureza do tráfego, condições ambientais, valor, disponibilidade e riscos à natureza e ao ser humano, entre outros fatores (CONTRAN, 2022). Os principais materiais são os termoplásticos, resina epóxi, plástico a frio, fita de marcação rodoviária e tintas (à base de solventes e à base de água) (Moreira, 2019).

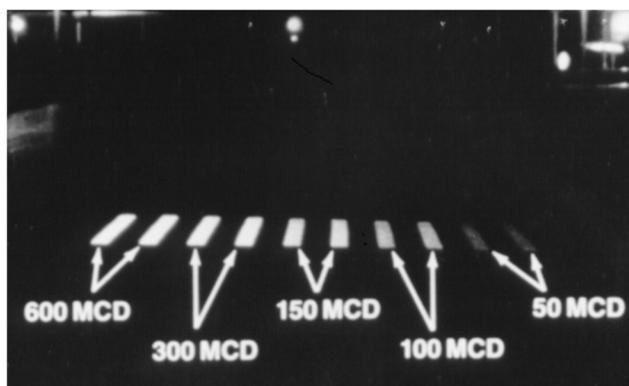
Para melhorar ainda mais a visualização das marcações horizontais, a estes materiais normalmente são colocadas microesferas de vidro, seja por incorporação ou aspersão, o que contribui para amplificação do sinal, principalmente à noite. Estas microesferas amplificam a sinalização devido ao fenômeno da retrorefletividade (ANTT, 2017). Zhang *et al.*, (2009) explica que a

retrorefletividade, dentro de um contexto de sinalização viária, é a capacidade de refletir luz dos faróis de volta para sua fonte de origem.

As microesferas são classificadas em tipos, sendo que a principal diferença entre os tipos está relacionada com o diâmetro (NBR 16184, ABNT 2021). As mais utilizadas são as microesferas do Tipo IB ou premix, que são aquelas com diâmetros entre 63 μ m e 212 μ m, bem como as do Tipo IIA ou Drop-on, que são aquelas com diâmetros entre 300 μ m e 600 μ m. Como os nomes já dizem, as microesferas do tipo Premix são misturadas à tinta antes da aplicação da rodovia, enquanto que as do tipo Drop-on são aplicadas por aspensão após a pintura (DNER - 373, 2000).

De acordo com Moreira e Menegon (2003), quanto maior a granulometria, mais intensa é a retrorefletividade. No entanto, é necessário analisar essa característica em comparação com a espessura da tinta para garantir o angulamento correto. Além disso, quanto maior o grão da microesfera, menor é a vida útil da sinalização devido ao desgaste das microesferas. Na Figura 1 pode-se observar o efeito das microesferas na sinalização horizontal, a uma distância de 15 metros, onde mcd significa milicandela. A faixa à direita é quase impossível de visualizar, enquanto a faixa à esquerda apresenta ótima retrorefletividade, facilitando a visualização do usuário.

Figura 1 – Comparação de faixas de pedestre com diferente valores de retrorefletividade



Fonte: Moreira e Menegon (2003, p. 8)

Neste sentido, este trabalho tem como propósito avaliar a retrorefletividade ao longo do tempo para a sinalização horizontal com

microesferas dos tipos premix (Tipo-IB) e dropon (Tipo-IIA) em um trecho rodoviário, com micro revestimento asfáltico (MRAF), na Avenida Caverá, na cidade de Alegrete, Rio Grande do Sul. Este trecho é considerado como uma via coletora de velocidade máxima permitida de 30km/h. A avaliação foi realizada durante o período de praticamente um ano, utilizando ambos os tipos de microesferas, considerando três espessuras diferentes e seis densidades (massa por metro quadrado) de microesferas do tipo IIA. A tinta utilizada foi do tipo à base de resina acrílica emulsificada em água. A avaliação foi realizada considerando o ambiente natural, ou seja, sujeito às variações climáticas, no decorrer do tempo.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar a retrorrefletividade na sinalização horizontal em via urbana em função do tempo e precipitação, para diferentes espessuras de tinta e densidades de microesferas, visando estimar o momento em que a pintura e a deposição de microesferas devam ser refeitas.

1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a retrorrefletividade em função do tempo para diferentes configurações de espessuras de tinta e densidades das microesferas premix e dropon, utilizando um retrorrefletômetro horizontal;
- Comparar o custo-benefício entre as situações avaliadas.

1.3 Justificativa

A degradação da sinalização horizontal ocorre devido a diversos parâmetros. Neste sentido, o presente trabalho visa extrair algumas conclusões em termos de custo benefício considerando diferentes espessuras de tinta e densidades de microesferas, dentro de um contexto urbano. Os resultados permitirão gerar um banco de dados iniciais visando um modelo que permita estimar o momento em que se deverá refazer a pintura e deposição das

microesferas considerando os mínimos valores de retrorrefletividade admitidos por agências reguladoras, além de buscar uma otimização dos gastos.

1.4 Estrutura do trabalho

A organização deste trabalho nos capítulos subsequentes é delineada da seguinte maneira:

- **Introdução:** Neste capítulo, é apresentada a visão geral do assunto, contextualizando o tema específico e explorando também a motivação e as razões que justificam esta pesquisa.
- **Conceitos Gerais e Revisão da Literatura:** Neste capítulo, são discutidos os conceitos do tema abordado bem como estudos destacados na área, apresentado premissas desenvolvidas para este trabalho, como normas nacionais e os órgãos responsáveis por estradas e transporte nacional.
- **Metodologia:** Neste capítulo, descreve-se a parte experimental realizada para alcançar o objetivo proposto neste estudo. São apresentadas as diversas combinações de materiais utilizados, com a sua aplicação em condições reais e utilizando métodos de pintura em situação rotineira de trabalho, bem como o monitoramento da perda de retrorrefletividade nos diferentes segmentos experimentais.
- **Resultados:** Neste capítulo, são apresentados os resultados do estudo, os valores medidos durante a pesquisa, são exibidos e correlacionados com a literatura existente sobre os processos experimentais descritos.
- **Considerações finais:** Este último capítulo aborda a análise e as considerações finais do trabalho

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

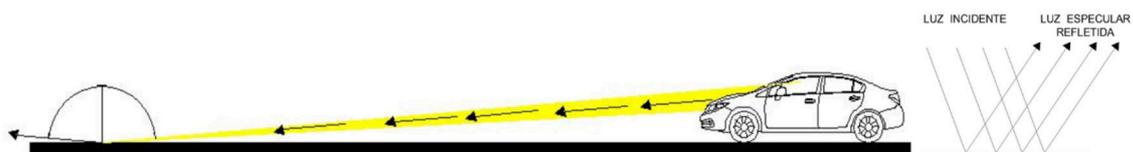
2.1 Formas de reflexão da luz

Segundo Schwab, 1999, basicamente existem três tipos de formas de refletir a luz, dependendo basicamente da forma e da textura da superfície atingida. São elas: reflexão especular, reflexão difusa e retrorreflexão.

2.1.1 Reflexão especular

A reflexão especular ocorre quando a luz atinge superfícies planas e polidas, de forma que o ângulo de reflexão da luz incidente em relação à normal à superfície é igual ao ângulo de incidência da luz (Paiva, 2014). Na Figura 2, é apresentado um esquema de como seria esta reflexão utilizando a incidência dos faróis do automóvel em uma rodovia perfeitamente plana e polida. Do ponto de vista de visualização da sinalização, este tipo de reflexão não permite qualquer amplificação do sinal uma vez que a luz refletida não volta para os olhos do motorista.

Figura 2– Representação da reflexão especular



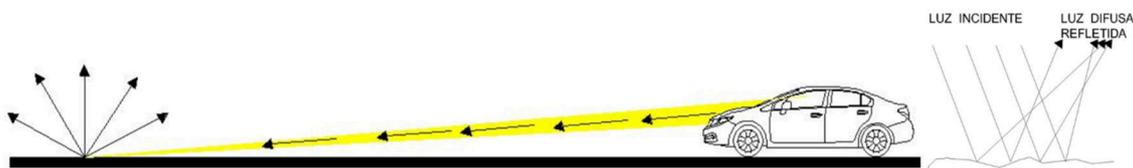
Fonte: Adaptado de Moreira e Menegon (2003) e Paiva (2014)

2.1.2 Reflexão difusa

A reflexão difusa acontece quando a luz incide sobre uma superfície rugosa, resultando no espalhamento dos raios de luz em várias direções devido às irregularidades microscópicas da superfície (Paiva, 2014). Na sinalização de trânsito, este fenômeno é observado quando a marcação na estrada não contém microesferas. O resultado prático deste efeito é que apenas uma parte muito

pequena da luz incidente volta para os olhos do motorista, conforme pode ser observado na Figura 3.

Figura 3– Reflexão difusa



Fonte: Adaptado de Moreira e Menegon (2003) e Paiva (2014)

2.1.3 Retrorreflexão

A retrorreflexão acontece quando um feixe de luz emitido em direção a uma superfície é refletido de volta para sua fonte (Zhang *et al.*, 2009). Esse fenômeno ocorre quando a luz incide sobre um material sólido esférico. Mais especificamente, a luz refrata na esfera e reflete na face de trás desta, retornando assim para a fonte de emissão. Nas rodovias, este efeito permite amplificar a sinalização quando microesferas estão presentes na tinta de demarcação uma vez que a fonte (luz dos faróis) que incide sobre microesferas retornam de volta atingindo os olhos do motorista (Moreira; Menegon, 2003). Na Figura 4 é mostrado a retrorreflexão, enquanto na Figura 5 é apresentado o efeito desse fenômeno à noite. Como pode ser observado na Figura 5, a faixa central é dupla (esquerda e direita) e contínua, onde a faixa à esquerda não possui material retrorreflexivo, ao contrário da faixa à direita, que possui microesferas, amplificando fortemente a sinalização presente na rodovia.

Figura 4– Retrorreflexão



Fonte: Adaptado de Moreira e Menegon (2003)

Figura 5– Linha de eixo esquerda sem material retrorrefletivo e direita equipada com material retrorrefletivo



Fonte: Moreira e Menegon (2003, p. 6)

A unidade utilizada para medir a retrorrefletividade é o coeficiente de Luminância retrorrefletida (RL), dado pela equação 1, e corresponde a razão entre a Luminância (L) de uma superfície retrorrefletiva na direção da observação e a iluminância (E) recebida sobre um plano perpendicular na direção da luz incidente.

$$RL = \frac{L}{E} \left[\frac{mcd}{lux \cdot m^2} \right] (mcd \cdot lux^{-1} \cdot m^{-2}) \quad (1)$$

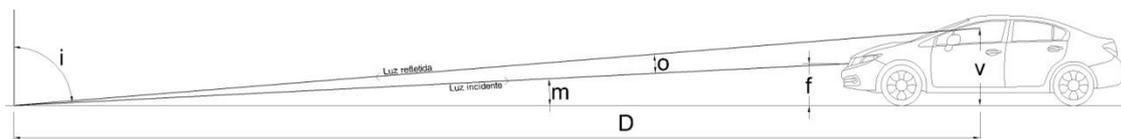
2.2 Geometrias de avaliação da Retrorrefletividade

A geometria angular é um método utilizado para simular a distância e os ângulos entre a posição dos faróis do veículo (fonte luminosa), o ponto na sinalização viária que reflete a luz dos faróis, e os olhos do observador (receptor da luz) (DNIT 409/2017). Na Figura 6 é ilustrado os parâmetros onde:

- Ângulo de incidência (i) – É o ângulo formado pelo raio de luz incidente e a perpendicular (normal) à superfície (rodovia);
- Ângulo de iluminação (m) – É formado pelo raio de luz incidente e a superfície refletiva;
- Ângulo de observação (o) – Ângulo formado pelo raio de luz incidente e o raio de luz refletido que chega até o observador;

- Altura do observador (v) – Refere-se à altura em que o motorista está posicionado.
- Distância de visibilidade (D) – Geometria de 15 ou 30 metros.

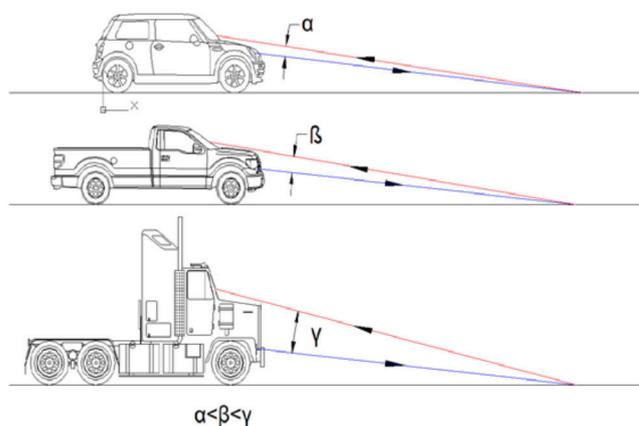
Figura 6 – Ângulos e distância referência



Fonte: Adaptado do DNIT (2017)

Nesse contexto, a distância entre o veículo e o ponto onde ocorre a reflexão é considerada uma variável (DNIT 409/2017). De acordo com Babic, Burghardt e Babic (2015) a retrorrefletividade é mais eficiente quando o motorista está em uma posição mais baixa, pois o ângulo de observação é reduzido como ilustrado na Figura 7, aproximando o observador da fonte de emissão.

Figura 7 – Ângulo de observação para visão de diferentes veículos



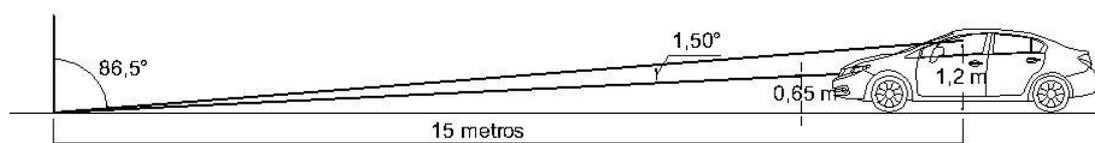
Fonte: Babic, Burghardt e Babic (2015, p. 154)

Atualmente, para um efeito de padronização de medidas e equipamentos, são consideradas duas geometrias principais para avaliação da retrorrefletividade, chamadas de geometrias de 15 metros e 30 metros.

2.2.1 Geometria de 15 metros

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT 409/2017), o valor correspondente a 15 m representa a distância horizontal entre o motorista e o ponto de observação da rodovia. Para esta especificação, devem ser consideradas as seguintes grandezas: ângulo de incidência de $86,5^\circ$, ângulo de observação de $1,5^\circ$, altura dos faróis de 65 cm e altura do observador de 120 cm, conforme mostrado na Figura 8.

Figura 8– Geometria de 15 metros



Fonte: Adaptado de Moreira e Menegon (2003)

A NBR 14723 (ABNT, 2020) estabelece os procedimentos para avaliação da retrorefletividade usando um equipamento manual nessa mesma geometria de 15 metros. Similarmente, a NBR 16410 (ABNT 2016) detalha os procedimentos para avaliação dinâmica nessa geometria. Mazzoni *et al.*, 2019, em seu estudo, concluíram que as medições realizadas com a geometria de 15 metros podem superestimar a qualidade das marcações viárias, o que potencialmente representa um risco para os condutores, uma vez que os resultados tendem a mostrar uma visibilidade mais favorável, porém para esta distância o tempo de reação deve ser menor.

2.2.2 Geometria de 30 metros

Assim como na geometria de 15 m, o valor de 30 m representa a distância horizontal entre o motorista e o ponto de observação da rodovia. Para esta especificação, devem ser consideradas as seguintes grandezas: ângulo de incidência de $88,76^\circ$, ângulo de observação de $1,05^\circ$, altura dos faróis de 65 cm e altura do observador de 120 cm, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9– Geometria de 30 metros



Fonte: Adaptado de Moreira e Menegon (2003)

Essas especificações são adotadas pela NBR 16307 (ABNT, 2020), que define procedimentos para a medição manual da retrorefletividade. A NBR 16410 (ABNT, 2016), por sua vez, detalha os métodos para avaliações dinâmicas nessas mesmas condições. De acordo com Salles et al. (2015), uma norma com requisitos de geometria de 30 metros tende a ser mais eficiente. Esta é a geometria considerada em outros lugares como Estados Unidos e União Europeia.

2.3 Retrorefletividade inicial e residual e equipamentos utilizados para medição

De acordo com a NBR 14723 (ABNT, 2020), a retrorefletividade inicial é definida como o valor avaliado desde o momento da pintura até o 15º dia. Devido ao curto espaço de tempo para a avaliação da retrorefletividade inicial, podem existir microesferas soltas sobre o pavimento, resultando em pouca ancoragem e potencialmente causando leituras equivocadas da marcação. A retrorefletividade residual, por sua vez, é o valor avaliado após um período determinado, normalmente após 15 dias. Conforme o Programa Nacional de Segurança e Sinalização Rodoviária BR-LEGAL (DNIT, 2015), os valores mínimos de retrorefletividade inicial e residual residual (Definitiva mínima) para as geometrias de 15 m e 30 m estão apresentados nas Tabelas 1 e 2 para as cores de tinta branca e amarela.

Tabela 1 – Valores mínimos de retrorrefletividade inicial e residual (Definitiva mínima) para as geometrias de 15 m e 30m

| Retrorrefletividade mcd/lux.m ² | 15 Metros | | 30 Metros | |
|---|------------|-------------|------------|-------------|
| | Cor Branca | Cor Amarela | Cor Branca | Cor Amarela |
| Inicial mínima | 250 | 150 | 175 | 105 |
| Definitiva mínima (Residual) | 100 | 80 | 100 | 80 |

Fonte: Adaptado do DNIT (2021)

Segundo o Programa Nacional de Segurança e Sinalização Rodoviária BR-LEGAL (DNIT, 2015), quando for detectado o fim da vida útil dos materiais, atingindo os valores de retrorrefletividade mínimos, ou, a sinalização aplicada apresentar qualquer tipo de patologia, esta deverá ser refeita considerando os padrões estabelecidos inicialmente.

Os aparelhos utilizados para medição da retrorrefletividade simulam a interação da luz dos faróis, o sistema retrorrefletivo e os olhos do motorista (Moreira; Menegon, 2003). No mercado, existem diversos modelos, tanto dinâmicos quanto manuais, conforme mostrado na Figura 10. Os modelos móveis (dinâmicos) são acoplados a um veículo, permitindo medir a retrorrefletividade da pintura do pavimento continuamente à medida que o veículo se desloca. Em contraste, os modelos portáteis (manuais), são usados para testar pontos específicos da rodovia.

Figura 10 – Exemplos de Retrorrefletômetros: (a) manual e (b) dinâmico



Fonte: Adaptado Easylux Retroreflectometer

2.4 Materiais aglutinantes da sinalização viária

A pintura de sinalização viária é composta por um material aglutinante e microesferas de vidro. O material aglutinante desempenha a função crucial de manter as microesferas de vidro aderidas à superfície da pintura, garantindo visibilidade diurna devido ao contraste gerado com o pavimento circundante (Mazzoni *et al.*, 2021). Conforme mencionado por Moreira (2019), os materiais comumente utilizados para esse tipo de sinalização incluem tintas, termoplásticos, plásticos a frio e películas pré-fabricadas. Entre esses, a tinta emulsionada em água destaca-se como a mais empregada atualmente. Todos esses materiais possuem uma composição básica que inclui um ligante (geralmente uma resina), pigmentos e cargas.

Os termoplásticos utilizados em sinalização viária são compostos por combinações cuidadosamente proporcionadas de ligante, partículas granulares que funcionam como elementos inertes, pigmentos com seus respectivos agentes dispersores e esferas de vidro (Moreira; Menegon, 2003). Esse tipo de material é especialmente indicado para rodovias e vias de tráfego intenso, sendo frequentemente utilizado nas bordas de rodovias para criar uma sonorização perceptível quando os pneus dos veículos passam sobre essas faixas, aumentando a segurança (ANTT, 2017). A aplicação dos termoplásticos pode ser realizada de três formas principais: por extrusão, conforme especificado pela NBR 15543 (ABNT, 2021); por aspersão, conforme determinado pela NBR 13159 (ABNT, 2021); ou por meio de pré-formados, conforme definido pela NBR 16039 (ABNT, 2022). Em todas essas formas de aplicação, o material precisa ser previamente aquecido para garantir sua aderência e desempenho adequado.

O laminado elastoplástico é um produto pré-fabricado composto por filmes, películas ou fitas constituídas de resinas e partículas sólidas (ANTT, 2017). Utilizado na sinalização viária, suas principais aplicações incluem passagens de pedestres, demarcação de estacionamentos e sinalizações específicas. Devido à sua durabilidade e alta visibilidade, é uma escolha eficaz para essas finalidades. A NBR 15741 (ABNT, 2016) estabelece os padrões de qualidade e métodos de instalação para o laminado elastoplástico, garantindo

que atenda às exigências de segurança e desempenho necessárias para a sinalização viária.

O plástico a frio é um composto que pode ser bicomponente ou tricomponente (composto por componentes A, B e C), elaborado a partir de resina metacrílica reativa pura, cargas minerais, pigmentos, aditivos e microesferas de vidro. Sua aplicação em pavimentos inclui a incorporação de um agente endurecedor e pode ser realizada tanto manualmente quanto mecanicamente (ANTT, 2017). Este material é especialmente recomendado para a demarcação de marcas longitudinais e linhas de canalização em vias urbanas e rodovias com tráfego intenso (Indutil, 2024). A norma NBR 15870 (ABNT, 2016), define as especificações para o fornecimento e aplicação de plásticos a base de resinas metacrílicas reativas.

As tintas são composições líquidas formadas por veículos (resina e solventes), partículas sólidas (cargas e pigmentos) e aditivos. Conforme Babic, Burghardt e Babic (2015), todas as tintas são constituídas por resina (atualmente, utilizam-se misturas estireno-acrílicas, acrílico-alquídicas ou 100% acrílicas), pigmentos, cargas, solventes e inúmeros aditivos. A aplicação das tintas é realizada por aspersão, utilizando equipamentos de alta ou baixa pressão, sem a necessidade de aquecimento para pintura. Essas tintas, geralmente, apresentam boa adesão às microesferas de vidro, que podem ser pré-misturadas ou injetadas na película úmida. As tintas são categorizadas de acordo com seu sistema de secagem. Conforme Moreira e Menegon (2003), esses sistemas incluem: oxidação, que é a reação com o oxigênio do ar; evaporação de solvente, onde os solventes evaporam após a aplicação no pavimento, deixando uma camada sólida; coalescência, que ocorre quando a emulsão de solvente/água evapora, fazendo com que as partículas se aglomerem e formem uma película coesa e habitualmente plástica; e reação química, que ocorre com a mistura de um ou mais componentes, resultando na formação de uma camada de pintura.

Existem vários tipos de tintas, regulamentadas por diferentes normas, que são apresentadas na Tabela 2. Todas essas tintas são aplicadas na sinalização horizontal em pavimentos asfálticos e de concreto em estradas, cidades e aeroportos.

Tabela 2 – Normativas que regulamentam o uso de tintas para sinalização horizontal

| Normativas | |
|--|---|
| Tinta acrílica à base de solvente | NBR 11862, ABNT, 2020 |
| Tinta à base de resina livre | NBR 12935, ABNT, 2020 |
| Tinta à base de resina acrílica emulsionada com água | NBR 13699, ABNT, 2021 NBR 13731, ABNT, 2011 |
| Tintas à base de resina acrílica estirenada | NBR 8169, ABNT, 2011 |
| Tinta acrílica à base de epóxi emulsionada em água | NBR 16800, ABNT, 2019 NBR 8169, ABNT, 2011 |

Fonte: Adaptado da ABNT (2024)

Atualmente, a tinta emulsionada em água é a mais utilizada para marcação asfáltica, sendo considerada uma opção mais ecológica em comparação com as tintas à base de solvente (Zhang *et al.*, 2009). Essa tinta oferece benefícios ambientais significativos devido à redução na emissão de compostos orgânicos voláteis (COVs). Quando aplicada, sua espessura deve variar entre 0,3 mm e 0,5 mm para estradas de pavimento asfáltico ou concreto. A norma que especifica esses requisitos é a NBR 13699 (ABNT, 2021), a qual define os critérios para sua aplicação em sinalização viária.

A execução dos serviços de pintura de sinalização viária deve ser realizada sob condições climáticas favoráveis, evitando vento excessivo, poeira, neblina ou qualquer outro material que possa interferir na aderência da pintura (Moreira; Menegon, 2003). Além disso, a NBR 15405 (ABNT, 2016) estabelece uma série de cuidados específicos:

- A superfície deve estar seca e livre de sujeira, óleos, graxas ou qualquer material que possa prejudicar a aderência da pintura ao pavimento;
- A temperatura ambiente deve ser igual ou superior a 10 °C;
- A temperatura ambiente não deve exceder 40 °C;
- A temperatura do pavimento deve ser, pelo menos, 3 °C acima do ponto de orvalho (a temperatura na qual o vapor de água se condensa), para

garantir a correta aplicação do material. A norma NBR 15405 fornece uma tabela para determinar o ponto de orvalho.

2.5 Esferas e microesferas de vidro

Como descrito anteriormente, as esferas e microesferas de vidro são aplicadas a marcação viária, agindo como minúsculas lentes que captam e canalizam os raios de luz que incidem em sua superfície refletindo-os de volta para os olhos do motorista (Moreira; Menegon, 2003). A NBR 16184 (ABNT 2021), especifica as esferas de vidro como sendo as que possuem diâmetro superior a 1000 μm , e as microesferas como sendo aquelas com diâmetro igual ou inferior a 1000 μm . De acordo com esta norma, as microesferas devem ser feitas de vidro sólido incolor do tipo soda-cal-sílica, com o teor de sílica de no mínimo 65% em massa. As microesferas apresentam uma ampla faixa granulométrica sendo classificadas por tipos de acordo com estas faixas. Na Tabela 3 é mostrado todos os tipos de microesferas conforme a faixa granulométrica.

Tabela 3 – Faixas granulométricas das esferas e microesferas de vidro

| Peneiras (conforme as ABNT NBR NM-ISSO 2395, ABNT NBR NM-ISO 3310-1 E ABNT NBR NM-ISSO 3310-2) | | % passando | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------------|-------------------|---|---------|---|-----|-----|-----|----------|---------|---------|---------|----------|--|
| Número | Abertura μm | Tipo I | | Tipo II | | | | | Tipo III | Tipo IV | Tipo V | Tipo VI | Tipo VII | |
| | | A | B | A | B | C | D | E | | | | | | |
| 6 | 3 350 | | | | | | | | | | | | 100 | |
| 8 | 2 360 | | | | | | | | | | 100 | | 95-100 | |
| 10 | 2 000 | | | | | | | | | 100 | 95-100 | | 80-95 | |
| 12 | 1 700 | | | | | | | | 100 | 95-100 | 80-95 | | 10 a 40 | |
| 14 | 1 400 | | | | | | | | 95-100 | 80-95 | 10 a 40 | | 0-5 | |
| 16 | 1 180 | | | | | | | | 80-95 | 10 a 40 | 0-5 | | 0-2 100 | |
| 18 | 1 000 | | | 100 | | 100 | 100 | 100 | 10 a 40 | 0-5 | 0-2 | | | |

Continua...

...continuação.

| | | | | | | | | | | |
|-----|-----|--------|--------|--------|---------|--------|--------|------|-----|--------|
| 20 | 850 | 100 | 98-100 | 100 | 90-100 | 95-100 | 95-100 | 0-5 | 0-2 | 95-100 |
| 25 | 710 | | | | | | | 0-2 | | |
| 30 | 600 | 90-100 | 75-95 | | 10 a 30 | 85-100 | 50-75 | | | 55-75 |
| 40 | 425 | | | 90-100 | | | 15-45 | | | 15-35 |
| 50 | 300 | 18-35 | 100 | 9 a 35 | | 0-5 | 0-10 | 0-10 | | 0-5 |
| 70 | 212 | | 85-100 | | 0-10 | | 0 | | | |
| 80 | 180 | | | 0-5 | | | 0-2 | | | |
| 100 | 150 | 0-10 | 15-55 | | 0-5 | | | | | |
| 140 | 106 | | | | | | | | | |
| 200 | 75 | 0-2 | | | | | | | | |
| 230 | 63 | | 0-10 | | | | | | | |

Fonte: Adaptado NBR 16184 (ABNT, 2021)

Abaixo estão descritas o uso das microesferas de acordo com o tipo:

- Tipo I-A: “Innermix” incorporada no momento da fabricação de massas termoplásticas;
- Tipo I-B: “Premix” incorporado a tinta ou plástico a frio antes da aplicação, permitindo a retrorrefletividade após o descante da pintura;
- Tipo II-A, II-C, II-D e II-E: “Drop-on” aplicadas concomitante com tintas ou termoplástico, o que se diferencia entre ambas é a granulométrica;
- Tipo II-B: “Drop-on” aplicadas concomitante com tintas ou termoplástico, tem formato irregular assim trazendo um efeito de antiderrapante para área sinalizada;
- Tipo III e IV: “Drop-on” são utilizadas em locais sujeitos a condições adversas do clima, aplicados concomitante com tinta ou termoplásticos;
- Tipo V e VI: “Innermix” são incorporadas a massas termoplásticas, para aplicação em locais sujeitos a condições adversas do clima;
- Tipo VII: “Drop-on” são utilizadas especificamente para pistas de aeroportos, aplicados concomitantemente com tinta ou termoplásticos.

Particularmente, como já descrito, as microesferas classificadas como sendo do Tipo IB (premix) e IIA (drop-on) são as mais utilizadas nas rodovias. A

primeira é misturada à tinta apresentando o efeito da retrorrefletividade na medida que a tinta vai desgastando e as microesferas ficam expostas. A segunda é aspergida sobre a tinta tendo o efeito da retrorrefletividade de forma instantânea uma vez que elas já estão expostas a luz externa. A Figura 11 representa uma imagem em que se pode observar as microesferas do tipo IIA sendo depositadas após a realização da pintura. No processo de pintura, as microesferas do tipo IB já estão misturadas na tinta dentro do reservatório. Eventualmente podem ser feitas pinturas sem que seja utilizado as microesferas do Tipo IB.

Figura 11 – Aspersor com as microesferas do Tipo IIA e aspersor da tinta que pode conter ou não as microesferas do tipo IB



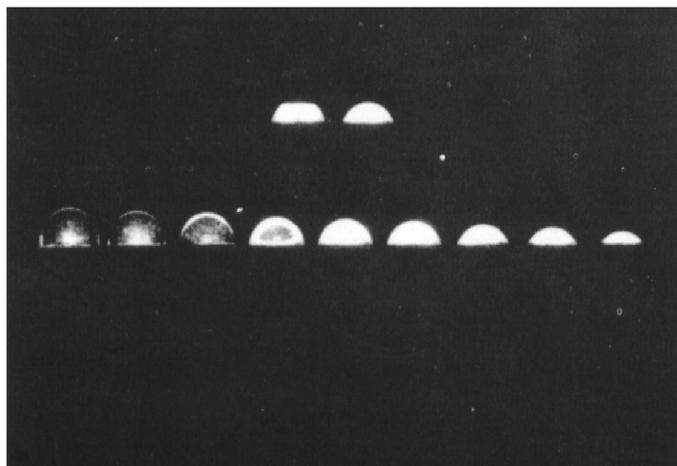
Fonte: Acervo do autor (2024)

A NBR 15405 (ABNT, 2016) estabelece que as microesferas devem ser adicionadas em duas etapas: na primeira etapa, deve-se adicionar o tipo IB com uma razão mínima de 200g/l de tinta; na segunda etapa, deve-se adicionar os tipos IIA, IIB ou IIC, sendo que a norma não estipula um valor específico, mas indica que a razão utilizada deve assegurar a retrorrefletividade especificada pelo contratante.

Segundo Zhang *et al.*, (2009), a qualidade e a quantidade de esferas e microesferas de vidro estão relacionadas aos valores de retrorrefletividade da sinalização. No entanto, para que ocorra a reflexão adequada da luz dos faróis dos veículos, essas esferas não devem estar completamente embutidas na

pintura. A retrorrefletividade ideal é alcançada pela proporção das esferas que fica exposta acima da pintura. A máxima retrorrefletividade ocorre quando 40% das esferas estão expostas acima da marcação, enquanto o restante está ancorado na pintura, conforme ilustrado na Figura 12. Isso é alcançado através do uso de boas técnicas e controle de aplicação. (Moreira; Menegon, 2003).

Figura 12– Ancoragem ideal para microesfera



Fonte: Moreira e Menegon (2003 pág,16)

2.6 Modelos de previsão do comportamento da retrorrefletividade

Diversos estudos têm sido conduzidos para compreender o comportamento da degradação da sinalização horizontal, visando avaliar seu desempenho, identificar pontos críticos e prever sua vida útil. Esses estudos buscam determinar o momento em que a retrorrefletividade atinge o nível mínimo aceitável, de modo a orientar os órgãos responsáveis sobre o momento ideal para substituir o material. Os modelos analisados consideram fatores como idade da marcação, tráfego de veículos, cor, tipo de superfície, e são majoritariamente baseados em modelos de regressão linear. Abaixo estão descritos alguns modelos apresentados na literatura.

2.6.1 Modelo desenvolvido por Thamizharasan *et al.* (2002)

No estudo de Thamizharasan *et al.*, (2002), foi realizada uma análise linear e não linear para determinar o momento ideal de substituição da sinalização viária. A pesquisa enfatiza que o desgaste da marcação não ocorre de forma uniforme e que fatores como o trânsito de veículos e as condições climáticas podem acelerar ou desacelerar esse processo. Constatou-se que, quando as microesferas da pintura ficam expostas, o desgaste da sinalização tende a atingir valores mínimos devido a esses fatores, além de outros, como a cor da pintura, o tipo de superfície e o material utilizado na aplicação. Os autores concluíram que o tráfego de veículos não influencia significativamente a perda de retrorrefletividade. As equações 2 a 5 no estudo apresentam os modelos desenvolvidos para essas análises.

Para termoplásticos brancos:

$$Diff = -0,06 * t - 6,80 \quad \dots(2)$$

Para termoplásticos amarelos:

$$Diff = -0,03 * t - 3,63 \quad \dots(3)$$

Para tinta branca:

$$Diff = -0,16 * t - 1,22 \quad \dots(4)$$

Para tinta amarela:

$$Diff = -0,16 * t - 4,29 \quad \dots(5)$$

Onde:

Diff = Diferença na retrorrefletividade ao longo do tempo em mcd/m²/lux para geometria de 30m;

t =Tempo em dias.

2.6.2 Modelo desenvolvido por Rasdorf *et al.* (2009)

Rasdorf *et al.*, (2009) realizaram um estudo na Carolina do Norte (EUA), identificando fatores nas marcações viárias que influenciam a deterioração da retrorrefletividade, tais como localização lateral, direcional, tempo e tráfego de

veículos. As medições foram feitas com um retrorrefletômetro com geometria de 30 metros. A partir dos estudos, foram determinados modelos para duas situações: quando se conhece o valor inicial da retrorrefletividade e quando esse valor é desconhecido. As equações 6 a 9 apresentam essas situações.

Para bordos brancos à base de água:

$$RL = Ri - 0,205 * t \quad \dots (6)$$

Para eixos amarelos à base de água:

$$RL = Ri - 0,069 * t \quad \dots (7)$$

Caso não existam dados de retrorrefletividade inicial das demarcações:

Para bordos brancos à base de água:

$$RL = 310 - 0,205 * t \quad \dots (8)$$

Para eixos amarelos à base de água:

$$RL = 143 - 0,069 * t \quad \dots (9)$$

Onde:

RL = Valor da retrorrefletividade na data desejada em mcd/m²/lux para geometria de 30m;

Ri = Valor da retrorrefletividade no dia da aplicação em mcd/m²/lux para geometria de 30m;

t = Idade da demarcação em dias.

2.6.3 Modelo desenvolvido por Hummer *et al.* (2011)

O estudo de Hummer *et al.*, (2011) foi conduzido entre 2007 e 2010 em estradas rurais de duas pistas na Carolina do Norte (EUA), totalizando 25 locais de coleta. Todas as medições foram realizadas com um aparelho de geometria de 30 metros. O modelo desenvolvido enfatiza a importância do planejamento da repintura e da manutenção das marcações no pavimento, promovendo visibilidade e segurança ao condutor, além de evitar custos desnecessários. Os modelos podem ser consultados nas equações 10 e 11.

Para demarcações brancas:

$$RL = Ri - 0,178 * t \quad \dots (10)$$

Para demarcações amarelas:

$$RL = Ri - 0,068 * t \quad \dots(11)$$

Onde:

RL = Valor de retrorrefletividade final para geometria de 30m;

Ri = Valor de retrorrefletividade inicial para geometria de 30m;

t = Idade da demarcação em dias.

2.6.4 Modelo desenvolvido por Ozelim e Turochy (2014)

Ozelim e Turochy (2014) conduziram um estudo no estado do Alabama com o objetivo de desenvolver um modelo de desempenho de retrorrefletividade. Com coletas em 15 pontos do estado, criaram um modelo com as condições locais, utilizando o equipamento para geometria de 30m. A idade da marcação e o tráfego diário médio anual (AADT) foram usados como variáveis independentes e que a retrorrefletividade inicial tem pouca influência sobre a retrorrefletividade residual. Assim criaram dois modelos, quando se sabe o valor da retrorrefletividade inicial e quando não possui. As equações 12 a 15 foram desenvolvidas pelos autores.

Quando se possui valores de retrorrefletividade inicial:

Para demarcações brancas:

$$RL = 512,5 - 5,026 * t - 0,006580 * AADT * 0,1833 * Ri \quad \dots (12)$$

Para demarcações amarelas:

$$RL = 349,6 - 4,933 * t - 0,002080 * AADT - 0,1420 * Ri \quad \dots (13)$$

Quando não se possui valores de retrorrefletividade inicial:

Para demarcações brancas:

$$RL = 619,4 - 5,130 * t - 0,006990 * AADT \quad \dots (14)$$

Para demarcações amarelas:

$$RL = 407,3 - 4,969 * t - 0,002170 * AADT \quad \dots (15)$$

Onde:

RL = Retrorrefletividade residual em mcd/m²/lux para geometria de 30m;

t = Idade da demarcação em meses;

$AADT$ = Tráfego diário médio;

Ri = Retrorrefletividade inicial em mcd/m²/lux para geometria de 30m.

2.6.5 Modelo desenvolvido por Zhang *et al.* (2013)

Zhang *et al.* foram os primeiros a estudar a influência da rugosidade do pavimento no desgaste da marcação viária, utilizando um retrorrefletômetro com geometria de 30 m e o Índice de Regularidade Internacional (IRI). Os pesquisadores comprovaram que pavimentos com maior rugosidade exigem repinturas em intervalos menores ou que sejam pintados com uma camada mais espessa de materiais. Cabe salientar que o banco de dados utilizado foi limitado, pois a pesquisa contou apenas com uma campanha de medição em cada ponto, realizada em regiões distintas. Ainda assim, as equações 16 e 19 apresentam uma grande contribuição para o entendimento do desgaste e da retrorrefletividade da marcação viária.

Para pavimentos com CBUQ misturado em usina:

Para linhas de eixo:

$$RL = 164,80 * e^{-3E-04*t} \quad \dots (16)$$

Para linhas de bordo:

$$RL = 0,0016 * dias^2 - 2,4313 * t + 1040,4 \quad \dots(17)$$

Para pavimentos com tratamento superficial:

Para linhas de eixo:

$$RL = 0,0268 * t + 73,76 \quad \dots (18)$$

Para linhas de bordo:

$$RL = 261,02 * e^{-7E-4*t} \quad \dots (19)$$

Onde

RL = Retrorefletividade residual em mcd/m²/lux para geometria de 30m;

t = Idade da demarcação em dias.

2.6.6 Modelo desenvolvido por De Salles *et al.* (2015)

De Salles *et al.*, (2015) realizaram um estudo em dois trechos no estado do Rio Grande do Sul, sendo um em uma rodovia em Júlio de Castilhos e o outro em um trecho urbano em Santa Maria, ao longo de dois anos. Nos trechos urbanos, foi utilizado o retrorefletômetro de dupla geometria, enquanto no trecho rodoviário foi utilizado apenas o de 30 metros. Foram analisados diferentes tipos de materiais em diversos trechos experimentais. Os resultados indicaram que fatores externos, como o acúmulo de sujeira, a ação da chuva e o tráfego de veículos, afetam diretamente a retrorefletividade das marcações viárias. Com base nesses dados, os autores desenvolveram as equações 20 a 23 como modelos de desempenho para a sinalização.

Em trecho urbano:

Para geometria de 15m

$$RL = 387,13 * e^{-0,002*t} \quad \dots(20)$$

Para geometria de 30m

$$RL = 145,70 * e^{-0,002*t} \quad \dots(21)$$

Em trecho rodoviário:

Para bordos

$$RL = 161,23 * e^{-0,002*t} \quad \dots(22)$$

Para o eixo

$$RL = 112,01 * e^{-0,001*t} \quad \dots(23)$$

Onde:

RL = Retrorefletividade inicial em mcd/m²/lux;

I = Idade da demarcação em dias.

2.6.7 Modelo desenvolvido por Renz (2018)

Renz (2018), seguindo a metodologia dos autores anteriormente citados, realizou seu estudo na cidade de Santa Maria, com monitoramento contínuo ao longo de dois anos. Para a coleta de dados, com cinco estações de medição, onde foram realizadas 18 campanhas de medição. O estudo abrangeu as cores branca e amarela de sinalização viária e utilizou um retrorrefletômetro de dupla geometria. O pavimento era de microrrevestimento asfáltico, e a pintura foi realizada com tinta à base de água. A partir desse acompanhamento, foi possível desenvolver os modelos das equações 24 e 27, considerando variáveis como a idade das marcações, a geometria de 15 e 30 metros, e o tempo de aplicação da sinalização.

Para geometria de 15 metros:

Cor branca

$$RL = -49,06 * \ln(t) + 475,93 \quad \dots (24)$$

Cor amarela

$$RL = -36,15 * \ln(t) + 349,21 \quad \dots (25)$$

Para geometria de 30 metros:

Cor branca

$$RL = -24,00 * \ln(t) + 240,38 \quad \dots (26)$$

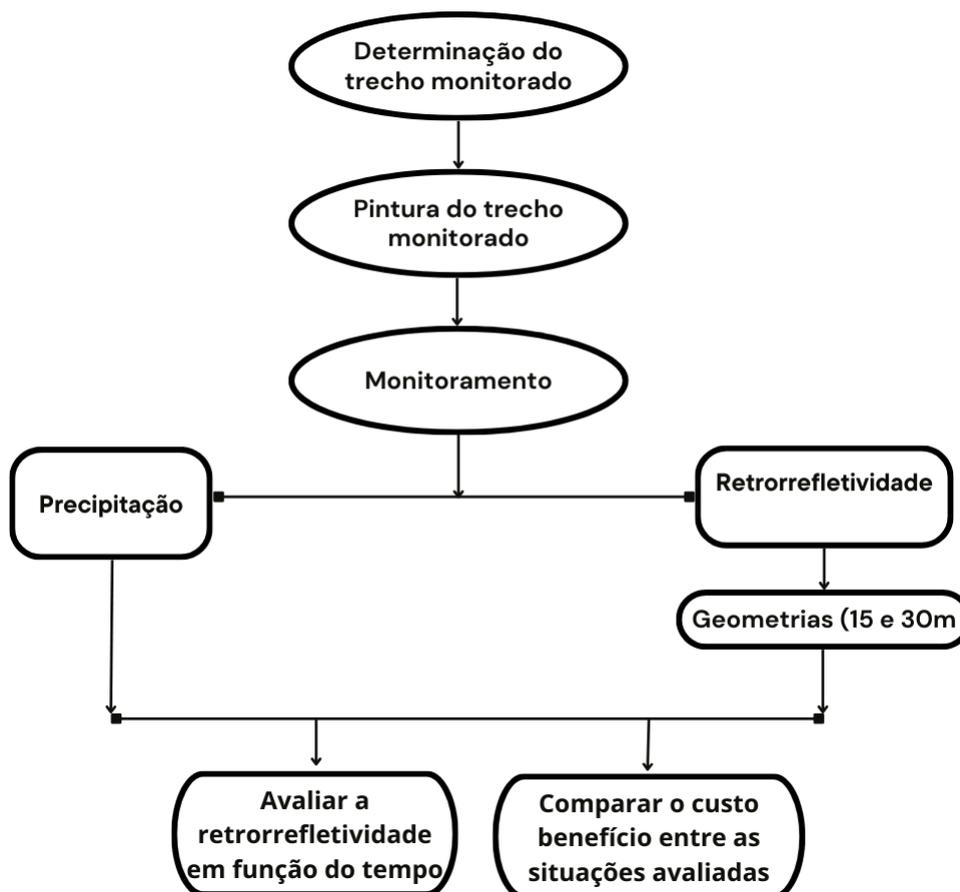
Cor amarela

$$RL = -20,52 * \ln(t) + 191,97 \quad \dots (27)$$

3 METODOLOGIA

Na Figura 13 é apresentado um esquema na forma de fluxograma das etapas envolvidas na realização do estudo. Logo abaixo consta a descrição de cada etapa deste fluxograma.

Figura 13 – Fluxograma do acompanhamento do trecho monitorado



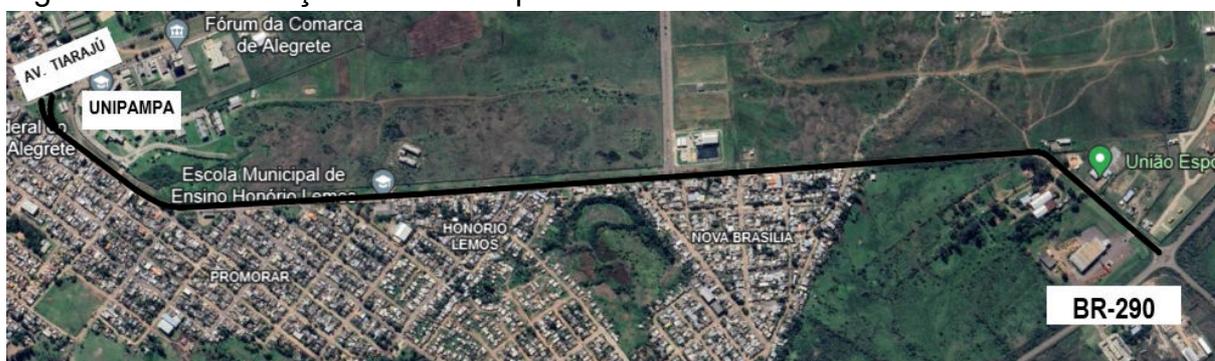
Fonte: Elaborado do autor (2024)

3.1 Determinação do trecho para monitoramento

A Avenida Caverá, situada em Alegrete, Rio Grande do Sul, é uma das principais vias arteriais do município. Ela conecta diversos pontos da cidade, ligando a localidade do balneário Caverá ao centro urbano. Além disso, a avenida serve como acesso à cidade pela BR-290, à Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) e a várias áreas residenciais, destacando-se pela sua importância na infraestrutura viária do município.

Em 2023, a Avenida Caverá foi submetida a um projeto de recuperação que incluiu a duplicação das pistas e o alargamento de parte delas. No total, 2,8 km de pista foram recuperados, dos quais 2,5 km foram ampliados de 8 para 13 metros de largura. Além disso, toda a avenida foi revitalizada horizontalmente. A recuperação do pavimento envolveu a aplicação de um novo microrrevestimento asfáltico a frio (MRAF). A Figura 14 apresenta o segmento da avenida que foi recuperado. Sendo assim, uma parte deste trecho foi utilizado para a avaliação da retrorrefletividade para diferentes densidades de microesferas e espessuras de tinta.

Figura 14 – Localização da via recuperada

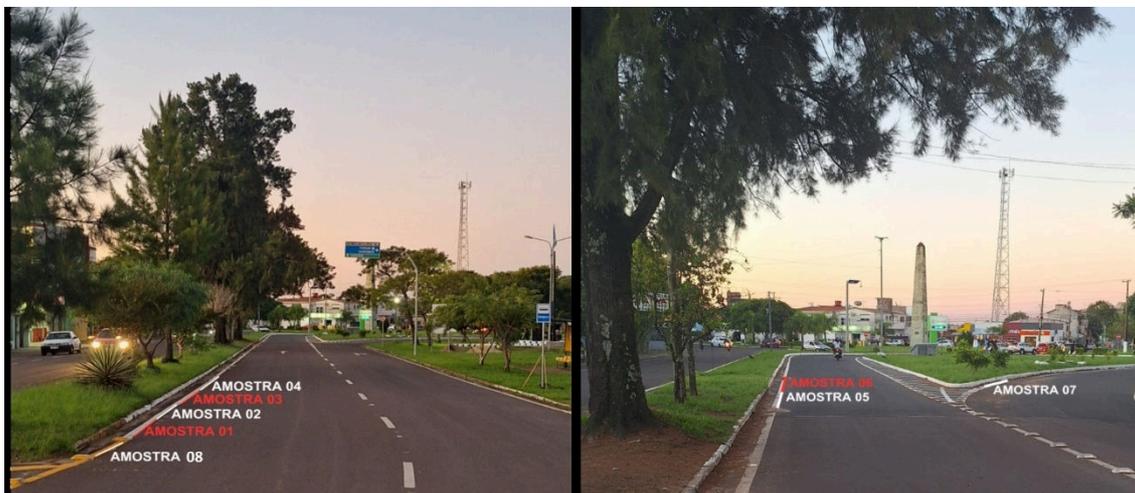


Fonte: Adaptado Google Earth (2024)

O trecho escolhido para monitorar a retrorrefletividade das amostras está localizado em um cruzamento oblíquo à direita com a Avenida Tiarajú, próximo a uma área de frenagem, conforme ilustrado na Figura 15. Este segmento caracteriza-se por ser uma via de mão única com pista dupla, onde a velocidade máxima permitida é de 30 km/h, classificando-se como uma área urbana. A sinalização horizontal neste trecho inclui uma faixa tracejada de 10 cm de largura no eixo da pista, adequada para a velocidade permitida de 30 km/h, e faixas contínuas de 10 cm de largura nas bordas devido à presença de um canteiro central, proporcionando melhor visibilidade, eficácia e segurança. No segmento em análise, há três faixas de pintura: uma no eixo e duas nas bordas, sendo escolhidas para avaliação da retrorrefletividade o eixo (que se torna bordo) e o bordo esquerdo. Na Figura 15 é mostrado também os segmentos específicos em que foram realizadas as pinturas (descrito em mais detalhes no próximo tópico) de diferentes espessuras e densidades, as quais estão representadas com

nomes de “amostras” e vão de 1 a 8, ou seja, 8 trechos foram selecionados para realização do estudo.

Figura 15 – Localização das amostras



Fonte: Acervo do autor (2024)

O trecho foi escolhido para estudo devido à sua recente revitalização, sua proximidade com a universidade, que facilita a coleta de dados, e sua localização em uma avenida importante para o município. Além disso, a escolha foi favorecida pela obtenção da liberação da prefeitura municipal de Alegrete para a análise do trecho e pela disponibilidade da equipe de pintura para a realização do trabalho.

3.2 Pintura do trecho Experimental

No dia 31 de outubro de 2023, foi realizada a pintura da sinalização viária no trecho escolhido. A atividade ocorreu ao final da tarde, sob condições meteorológicas consideradas ideais para pintura e deposição das microesferas, com temperatura média de 25°C e umidade relativa do ar em 60%, conforme dados obtidos da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada em Passo Novo, Alegrete. A empresa responsável pela execução da marcação viária foi a Sinalizadora Rodoviária Ltda (SINARODO). A gestão da via é de responsabilidade do município.

Figura 16 está mostrando a realização da pintura no trecho selecionado.

Figura 16– Execução da marcação



Fonte: Acervo do autor (2024)

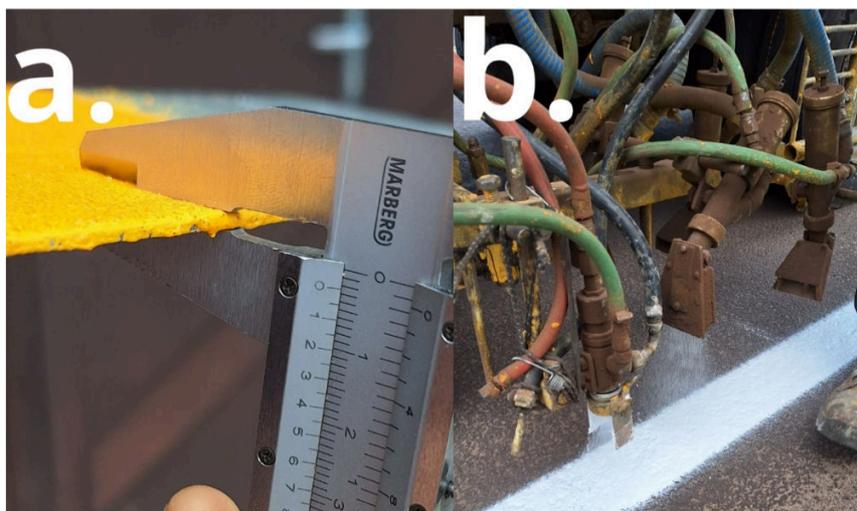
A pintura foi feita com tintas à base de resina acrílica emulsificada em água, seguindo as especificações da NBR 13699 (ABNT, 2021), nas cores branca e amarela. As microesferas utilizadas foram dos tipos IB "premix" e IIA "drop-on", escolhidas por serem as mais comuns na marcação da sinalização, proporcionando melhor comportamento e segurança ao condutor. Tanto a tinta quanto as microesferas foram adquiridas do mesmo fornecedor.

A microesfera Premix (Tipo-IB) foi adicionada à tinta durante o preparo, antes da aplicação, na proporção de 250g/l de acordo com a norma e a recomendação do fornecedor que sugere uma proporção de 200 a 250g/l. As microesferas Drop-on (Tipo-IIA) foram aplicadas na proporção de 400g/m², seguindo a recomendação do fornecedor.

Utilizou-se um caminhão de pintura para a aplicação, o que permitiu um controle mais preciso do processo. Essa abordagem mecânica contribuiu para a redução de possíveis erros e assegurou que a pintura fosse realizada em condições reais de mercado e ambiente, garantindo a validade e a aplicabilidade dos resultados obtidos na pesquisa.

No local, o controle da espessura da película de tinta úmida foi realizado utilizando uma placa metálica colocada no caminho do caminhão e um paquímetro para medir a espessura da película, conforme a imagem na Figura 17a. Mais especificamente, como a espessura da placa é constante, mede-se a espessura da placa com a tinta e a espessura somente da placa. Por diferença obtém-se a espessura da tinta. Além disso, verificou-se o alinhamento entre as pistolas de tinta e as pistolas de microesfera, como ilustrado na Figura 17b, com o objetivo de assegurar a uniformidade da aplicação da tinta e a correta distribuição das microesferas, garantindo a qualidade da pintura viária.

Figura 17 – Imagem representando a verificação de: (a) espessura da película de tinta e (b) alinhamento de pistolas



Fonte: Acervo do autor (2024)

Para alterar a espessura da tinta, bem como a densidade de microesferas, foram empregados quatro métodos distintos, os quais estão descritos abaixo.

a) Método 1: Camada Única

O primeiro método consistiu na aplicação de uma única camada de microesferas do Tipo-IB, misturadas à tinta de cor branca, sem a aplicação das microesferas do Tipo-IIA. Esta amostra (trecho) ficou identificada como sendo a amostra 01. Do ponto de vista prático, a aplicação foi realizada em uma única

passagem do caminhão de pintura, sem que este depositasse as microesferas do Tipo-IIA. A Figura 18 está mostrando esse procedimento.

Figura 18 – Pintura da tinta branca com microesferas do Tipo-IB e sem a deposição das microesferas do Tipo-IIA



Fonte: Acervo do autor (2024)

b) Método 2: Camada Dupla

O segundo método envolveu a aplicação de duas camadas sucessivas de tinta com microesferas do Tipo-IB. Inicialmente, aplica-se uma camada idêntica ao primeiro método e em seguida, uma segunda camada é aplicada diretamente sobre a primeira. Na prática, o caminhão passou no trecho de monitoramento duas vezes. Este método visou aumentar a espessura da tinta, mantendo a densidade de microesferas. Esta amostra foi identificada como 02. A Figura 19 está mostrando o processo de aplicação da camada dupla, onde pode-se observar que o trecho já havia sido pintado com a primeira camada.

Figura 19– Duas passadas de tinta branca com microesferas do Tipo-IB, sem a deposição das microesferas do Tipo-IIA



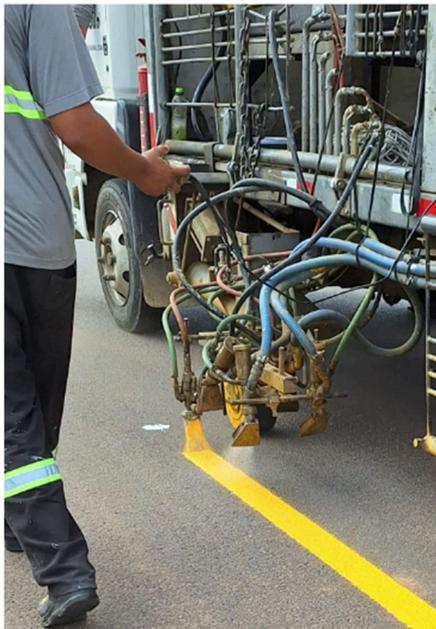
Fonte: Acervo do autor (2024)

c) Método 3: Camada única com Aspersão de Dropon

O terceiro método, denominado camada com aspersão, utiliza microesferas dos tipos IB e IIA, a primeira misturada a tinta e a segunda aspergida após a pintura. Este método foi utilizado em quatro trechos diferentes, representados pelas amostras 04, 05, 07 e 08. A diferença entre as amostras 04 e 08 foi a cor da tinta, branca e amarela, respectivamente. Para estas duas amostras, a espessura da tinta foi de 0,5 mm. Para a amostra 05, a tinta considerada foi a branca, com espessura de 0,5 mm, porém foi realizada uma dupla aspersão das microesferas do Tipo-IIA, visando um aumento da densidade destas microesferas. Já para a amostra 07, a tinta considerada também foi a branca e a espessura da tinta foi diminuída para 0,3 mm. A diminuição da espessura ocorreu com o aumento da velocidade do caminhão. Este método permite uma análise comparativa da retrorrefletividade em diferentes condições de espessura de tinta e coloração. A Figura 20 representa uma imagem em que

se observa a pintura da tinta amarela com a deposição das microesferas do Tipo-IIA.

Figura 20 – Exemplo de camada com a deposição das microesferas do Tipo-IIA



Fonte: Acervo do autor (2024)

d) Método 4: Camada Dupla com Aspersão Variada

O quarto método envolve a aplicação de uma camada dupla de tinta branca contendo as microesferas do Tipo-IB, o que corresponde a uma pintura com espessura de 1 mm, como no método 2, porém variando a densidade de microesferas do Tipo-IIA. Os trechos com as diferentes densidades de microesferas do Tipo-IIA foram chamados de amostra 03 e amostra 06. A diferença entre elas é que a 06 recebeu duas vezes a quantidade de microesferas do Tipo-IIA (duas passadas do caminhão) enquanto a amostra 03 recebeu apenas uma (uma passada do caminhão). A Figura 21 mostra uma imagem em que se observa o caminhão fazendo a segunda pintura da tinta branca com a deposição das microesferas do Tipo-IIA.

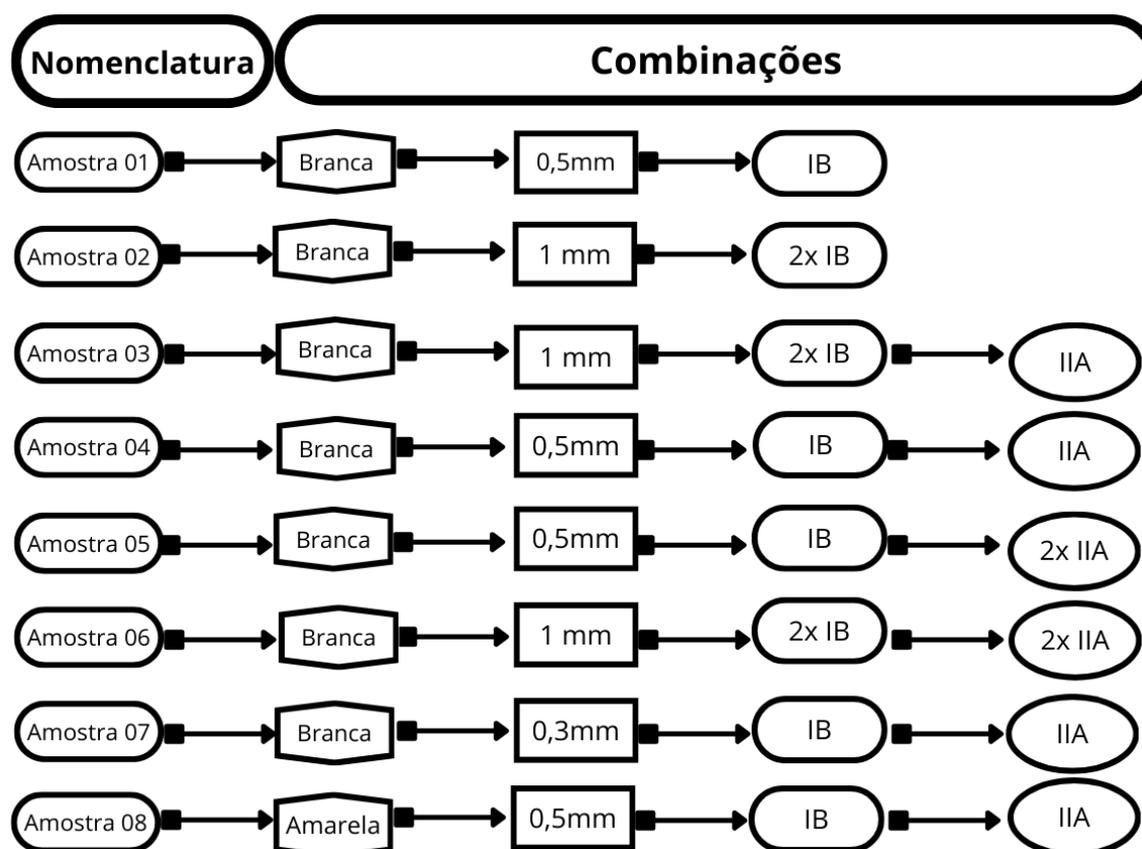
Figura 21 – Imagem mostrando a segunda pintura da tinta branca com a deposição das microesferas do Tipo-IIA



Fonte: Acervo do autor (2024)

Uma avaliação temporal dos diferentes métodos permite tirar conclusões a respeito da retrorefletividade em função da cor e espessura da tinta, presença ou não de microesferas do Tipo-IIA bem como diferentes densidades de microesferas do Tipo-IIA. Um resumo dos métodos, com a nomenclatura e combinações está descrito na Figura 22.

Figura 22 – Nomenclatura e combinações avaliadas



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

3.3 Monitoramento

As medidas foram realizadas seguindo a metodologia descrita na NBR 14723 (ABNT, 2020) e na NBR 16307 (ABNT, 2020). A NBR 14723 (ABNT, 2020), trata da sinalização horizontal viária e da medição de retrorrefletividade utilizando equipamento manual com geometria de 15 m, enquanto a NBR 16307 (ABNT, 2020), aborda a sinalização horizontal viária e a medição de retrorrefletividade utilizando equipamento manual com geometria de 30 m. Ambas as normas exigem que o equipamento seja calibrado antes do uso para garantir a precisão das medições. As medições foram realizadas com o equipamento EasyLux horizontal de dupla geometria (15 e 30m). Este é o instrumento normalmente utilizado para a avaliação da retrorrefletividade das rodovias brasileiras, possui uma área de medição de 133 cm², sendo 7cm de largura e 19cm de comprimento, os ângulos de iluminação e observação são

86,5° e 1,5° para geometria de 15 metros e 88,76° e 1,05° para 30 metros. Este equipamento segue as normas brasileiras e diversas normas internacionais aplicáveis. Ele é projetado com cerdas em sua superfície da base para evitar a entrada de luz direta em contato com o pavimento, proporcionando maior precisão nas medições. Além disso, possui um sistema de calibração instantânea para garantir a precisão dos resultados obtidos. Na Figura 23 é apresentado o equipamento utilizado, mostrando também o monitor utilizado para visualização e registro dos dados durante as operações de medição.

Figura 23– Retrorefletômetro e monitor do equipamento



Fonte: Acervo do autor (2024)

Conforme descrito anteriormente, foram avaliados 8 trechos diferentes. Estes trechos foram marcados com numeração e distância resultando em 8 amostras. Embora a NBR 14723 (ABNT,2020) sugere que sejam realizadas medições em dez pontos de cada estação, com espaçamento mínimo de 50 cm entre eles, devido aos trechos avaliados serem pequenos, foi feita uma adaptação para as medições em cada amostra. Neste sentido, em cada amostra, foram realizadas cinco medições, sem que houvesse a superposição das áreas medidas. Após a coleta de dados, o maior e o menor valor de cada conjunto de medições foram descartados, e a média dos três valores restantes foi calculada para obter um valor representativo de cada trecho de acordo com a equação 2.

$$RL = \frac{x_1+x_2+x_3+x_4+x_5-x_{\max}-x_{\min}}{5-2} \quad \dots(2)$$

onde:

RL = Retrorrefletividade;

$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5$ = Soma das medidas de retrorrefletividade mostradas pelo equipamento;

$x_{m\acute{a}x}$ = Medida que apresenta o maior valor de retrorrefletividade entre as cinco;

$x_{m\grave{i}n}$ = Medida que apresenta o menor valor de retrorrefletividade entre as cinco.

No total, foram obtidos quarenta pontos de medição (oito trechos com cinco medidas em cada trecho). Cada trecho experimental possui aproximadamente três metros de comprimento e estes trechos vem sendo monitorados desde o dia da aplicação da pintura. A maior frequência de monitoramento ocorreu nos primeiros 15 dias (o período de retrorrefletividade inicial), período onde ocorre normalmente maior variação nos valores de retrorrefletividade. A frequência de monitoramento foi a cada três dias nestes primeiros 15 dias. Após esse período, a frequência das medições foi reduzida para uma vez por semana e, após 3 meses de acompanhamento, para uma vez a cada duas semanas, uma vez que as variações nos valores se tornaram menos significativas.

Durante as medições, foi necessário realizar a limpeza das faixas avaliadas devido à constante presença de sujeira no trecho, causado pelo descarte de lixo dos motoristas e pela queda de materiais de caminhões. Além disso, a proximidade de árvores contribuiu para o acúmulo de detritos sobre a faixa de estudo, como evidenciado na Figura 24. A realização de uma limpeza apenas para retirar o excesso de material no pavimento, mostrada na Figura 25, é essencial para garantir a precisão das medições, já que a presença de sujeira pode causar variações significativas nos valores de retrorrefletividade.

Figura 24– Trecho antes da limpeza



Fonte: Acervo do autor (2024)

Figura 25 – Limpeza de parte do trecho



Fonte: Acervo do autor (2024)

Em todas as campanhas de monitoramento, realizadas ao entardecer, os trechos foram avaliados em condições de pista seca. As medições foram conduzidas sempre no sentido do tráfego dos veículos, conforme ilustrado na Figura 26, embora, de acordo com o estudo de Renz (2018), a direção da medição não influencia significativamente nos resultados de retrorrefletividade.

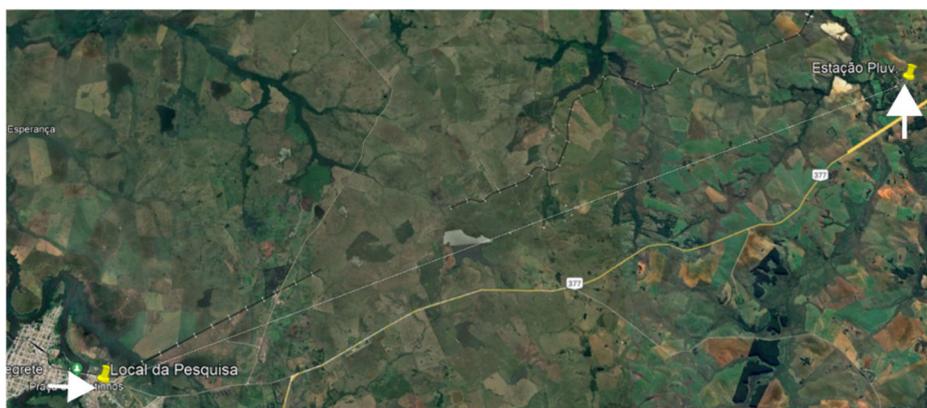
Figura 26 – Posicionamento do equipamento



Fonte: Acervo do autor (2024)

A determinação da precipitação acumulada foi realizada com base nos dados extraídos do site oficial do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Este portal disponibiliza informações detalhadas, tais como temperatura, umidade, pressão atmosférica, radiação solar e quantidade de chuva registrada por hora. A estação meteorológica está localizada na latitude $-29,709167^\circ$ e longitude $-55,525556^\circ$, a uma altitude de 120,88 m, na localidade de Passo Novo, Instituto Federal Farroupilha (IFFar) em Alegrete. A distância entre os pontos é de aproximadamente 26 km, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27– Localização entre o trecho de estudo e estação pluviométrica



Fonte: Adaptado Google Earth (2024)

4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos ao longo da pesquisa, que incluiu um ano de medições em campo para um total de oito amostras. O estudo focou na avaliação da retrorrefletividade para 8 amostras (as características estão descritas na figura 22, página 50), considerando as geometrias de 15 e 30 metros.

4.1 Retrorrefletividade média ao longo do tempo para as geometrias de 15 e 30 metros

Conforme apresentado na metodologia, foi possível realizar 31 campanhas de medição para cada amostra. Os resultados numéricos ao longo do tempo para a geometria de 15m estão apresentados na Tabela 4, enquanto os resultados numéricos para a geometria de 30m estão na Tabela 5. Nessas tabelas, estão os valores médios de retrorrefletividade, de acordo com o procedimento descrito na metodologia para levantamento e avaliação dos dados. As Figura 28 e 29 exibem os mesmos dados das tabelas anteriores, porém na forma de um gráfico temporal.

Tabela 4 – Retrorrefletividade média das amostras ao longo do tempo para a geometria de 15m

| Geometria de 15 metros | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Tempo (dias) | Amostra 01 | Amostra 02 | Amostra 03 | Amostra 04 | Amostra 05 | Amostra 06 | Amostra 07 | Amostra 08 |
| 7 | 85,33 | 72,33 | 356,00 | 306,33 | 390,00 | 403,00 | 336,33 | 145,67 |
| 11 | 72,00 | 66,67 | 299,00 | 279,33 | 335,67 | 342,67 | 298,67 | 133,00 |
| 17 | 61,33 | 58,67 | 268,00 | 224,67 | 229,67 | 245,33 | 191,33 | 112,00 |
| 21 | 56,00 | 47,67 | 183,67 | 191,00 | 220,33 | 225,33 | 176,33 | 106,33 |
| 30 | 59,33 | 51,67 | 243,67 | 230,67 | 291,67 | 300,00 | 215,00 | 120,67 |
| 36 | 68,33 | 55,33 | 330,00 | 286,67 | 326,00 | 363,00 | 248,00 | 157,67 |

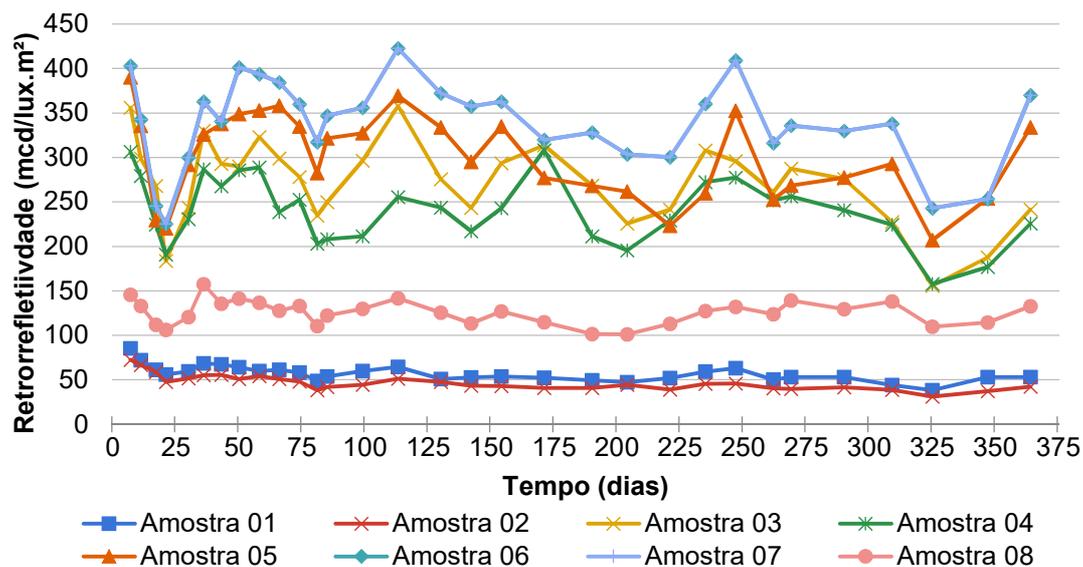
Continua...

...continuação.

| | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 43 | 67,33 | 55,67 | 292,67 | 267,67 | 337,67 | 340,67 | 229,00 | 135,67 |
| 50 | 64,00 | 51,00 | 290,00 | 285,67 | 349,00 | 401,33 | 266,33 | 141,33 |
| 58 | 60,00 | 54,00 | 323,00 | 289,00 | 352,67 | 393,67 | 274,00 | 136,67 |
| 66 | 61,33 | 51,00 | 299,00 | 238,67 | 358,00 | 384,33 | 271,67 | 127,67 |
| 74 | 58,00 | 48,00 | 278,00 | 252,67 | 335,00 | 360,00 | 238,00 | 133,00 |
| 81 | 48,67 | 38,33 | 234,67 | 203,00 | 282,33 | 317,33 | 215,67 | 110,33 |
| 85 | 53,67 | 42,00 | 249,67 | 208,00 | 321,67 | 347,00 | 220,33 | 122,33 |
| 99 | 60,00 | 44,33 | 296,33 | 211,33 | 327,33 | 356,00 | 226,67 | 130,00 |
| 113 | 64,67 | 51,33 | 357,67 | 255,33 | 369,33 | 422,67 | 262,67 | 141,67 |
| 130 | 51,00 | 47,67 | 275,67 | 243,67 | 333,67 | 372,33 | 225,00 | 125,67 |
| 142 | 52,67 | 43,33 | 243,33 | 217,00 | 295,00 | 357,33 | 230,67 | 113,33 |
| 154 | 53,67 | 43,00 | 293,67 | 243,00 | 335,00 | 363,00 | 256,00 | 127,00 |
| 171 | 52,33 | 41,00 | 313,67 | 308,33 | 277,00 | 319,67 | 256,00 | 114,67 |
| 190 | 49,33 | 40,67 | 268,33 | 211,33 | 268,00 | 328,00 | 262,00 | 101,67 |
| 204 | 47,33 | 44,33 | 225,67 | 195,67 | 261,67 | 303,67 | 208,00 | 101,00 |
| 221 | 52,00 | 39,00 | 241,67 | 229,33 | 223,33 | 300,33 | 206,00 | 113,00 |
| 235 | 59,00 | 45,33 | 308,00 | 272,33 | 259,67 | 360,33 | 254,00 | 127,33 |
| 247 | 63,00 | 46,00 | 296,00 | 277,33 | 352,33 | 409,00 | 297,33 | 132,00 |
| 262 | 50,00 | 40,33 | 261,00 | 252,00 | 252,67 | 316,33 | 232,67 | 123,67 |
| 269 | 53,00 | 39,67 | 287,33 | 256,33 | 268,33 | 336,00 | 236,33 | 139,33 |
| 290 | 53,00 | 41,67 | 276,00 | 240,67 | 277,33 | 329,67 | 239,33 | 129,67 |
| 309 | 44,00 | 38,67 | 227,33 | 224,33 | 293,00 | 338,00 | 247,67 | 138,00 |
| 325 | 38,33 | 31,00 | 155,67 | 158,00 | 207,00 | 243,00 | 223,70 | 109,67 |
| 347 | 53,00 | 37,33 | 187,67 | 177,00 | 254,00 | 253,30 | 227,30 | 114,33 |
| 365 | 53,00 | 42,33 | 241,33 | 225,67 | 333,67 | 370,00 | 226,00 | 132,67 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 28– Retrorefletividade das amostras da demarcação ao longo do tempo – Geometria de 15m.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 5 – Retrorefletividade média das amostras ao longo do tempo para a geometria de 30m

| Geometria de 30 metros | | | | | | | | |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Tempo (dias) | Amostra 01 | Amostra 02 | Amostra 03 | Amostra 04 | Amostra 05 | Amostra 06 | Amostra 07 | Amostra 08 |
| 7 | 70,67 | 102,33 | 335,67 | 255,00 | 316,00 | 320,33 | 315,00 | 174,00 |
| 11 | 66,00 | 56,33 | 292,33 | 257,67 | 256,33 | 266,67 | 247,00 | 157,67 |
| 17 | 55,00 | 55,67 | 233,33 | 210,33 | 203,67 | 208,67 | 175,67 | 122,67 |
| 21 | 53,33 | 52,00 | 171,67 | 175,67 | 200,00 | 194,67 | 150,00 | 106,33 |
| 30 | 56,00 | 55,00 | 256,67 | 171,00 | 253,33 | 274,33 | 186,33 | 125,00 |
| 36 | 54,67 | 67,00 | 276,67 | 211,00 | 253,67 | 290,00 | 193,67 | 143,33 |
| 43 | 55,33 | 55,67 | 293,67 | 223,67 | 274,00 | 289,67 | 194,33 | 134,67 |
| 50 | 52,33 | 52,67 | 305,67 | 232,33 | 270,67 | 350,67 | 250,33 | 147,00 |
| 58 | 52,00 | 54,00 | 283,00 | 208,00 | 278,67 | 296,00 | 226,67 | 129,33 |
| 66 | 53,67 | 51,33 | 231,00 | 161,00 | 250,00 | 290,67 | 228,67 | 109,67 |
| 74 | 53,00 | 50,67 | 235,67 | 180,33 | 255,67 | 258,00 | 196,33 | 126,00 |
| 81 | 53,33 | 48,00 | 249,00 | 174,33 | 246,33 | 249,33 | 181,00 | 113,00 |
| 85 | 53,00 | 53,00 | 256,67 | 175,00 | 265,33 | 251,00 | 190,33 | 123,33 |
| 99 | 54,00 | 53,33 | 221,33 | 179,67 | 248,00 | 265,67 | 186,00 | 120,33 |
| 113 | 56,00 | 54,33 | 295,67 | 233,33 | 311,00 | 309,00 | 218,67 | 150,67 |
| 130 | 50,67 | 46,33 | 246,00 | 193,33 | 257,00 | 269,67 | 175,67 | 119,67 |

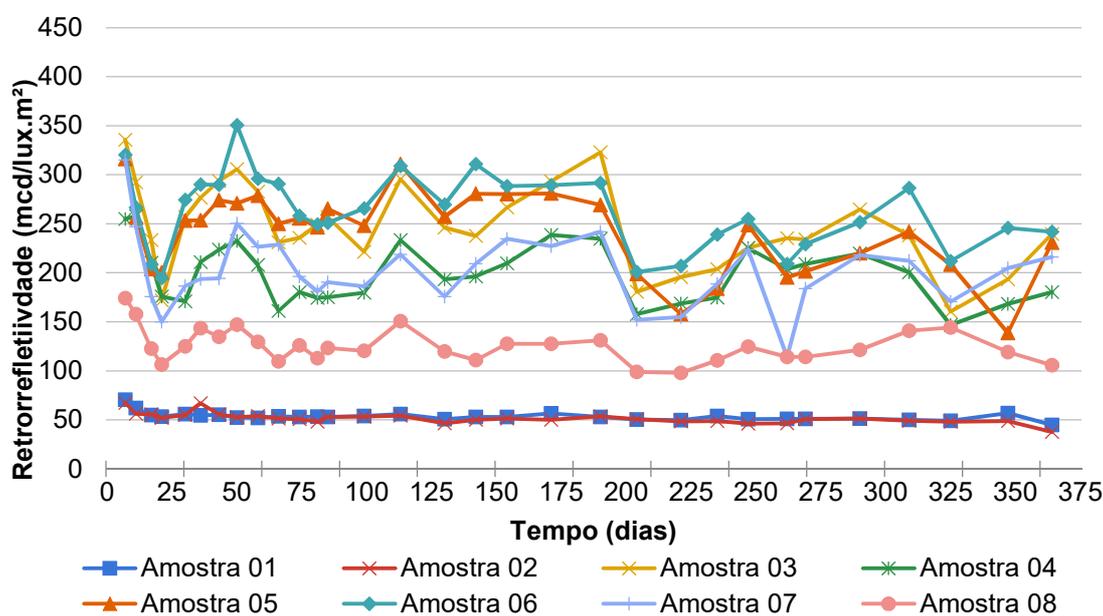
Continua...

...continuação

| | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 142 | 53,00 | 50,00 | 237,67 | 196,33 | 280,67 | 311,00 | 209,33 | 111,00 |
| 154 | 53,00 | 51,33 | 266,67 | 209,67 | 280,33 | 288,33 | 234,67 | 127,67 |
| 171 | 56,67 | 50,00 | 293,33 | 238,67 | 281,00 | 289,33 | 227,33 | 127,67 |
| 190 | 53,00 | 53,67 | 323,00 | 234,67 | 269,33 | 291,67 | 242,00 | 131,00 |
| 204 | 50,33 | 50,67 | 180,67 | 157,67 | 199,00 | 200,67 | 152,00 | 99,00 |
| 221 | 49,67 | 48,33 | 195,67 | 168,67 | 157,67 | 207,00 | 155,00 | 98,00 |
| 235 | 54,00 | 48,67 | 203,67 | 174,67 | 184,00 | 239,00 | 188,67 | 110,67 |
| 247 | 50,67 | 46,00 | 225,67 | 225,33 | 248,67 | 255,00 | 223,67 | 124,67 |
| 262 | 51,00 | 46,33 | 235,33 | 203,67 | 195,33 | 209,00 | 114,33 | 114,33 |
| 269 | 51,00 | 50,67 | 234,00 | 209,00 | 201,33 | 229,00 | 184,00 | 114,33 |
| 290 | 51,33 | 51,33 | 264,67 | 219,67 | 220,00 | 251,67 | 218,00 | 121,33 |
| 309 | 50,00 | 49,00 | 238,33 | 200,33 | 242,00 | 286,33 | 212,33 | 141,00 |
| 325 | 49,00 | 48,00 | 160,33 | 146,67 | 208,33 | 212,00 | 170,67 | 144,00 |
| 347 | 57,00 | 48,67 | 193,33 | 168,33 | 138,67 | 245,67 | 204,67 | 119,00 |
| 365 | 44,67 | 37,67 | 239,67 | 180,33 | 230,67 | 242,00 | 216,00 | 105,67 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 29 – Retrorrefletividade das amostras da demarcação ao longo do tempo – Geometria de 30m.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

De forma geral, considerando os gráficos das figuras 28 e 29, pode-se observar grandes variações das medidas de retrorefletividade (até 50% entre o máximo e mínimo) durante o período de avaliação, porém, se for considerado o

ponto inicial (7º dia) e o ponto final (365º dia), a máxima perda não ultrapassa os 30% (amostra 07). A primeira medição foi realizada após 7 dias da pintura, momento em que os valores registrados foram altos. Após esta primeira medida, de forma geral, houve uma queda da retrorrefletividade até o vigésimo primeiro dia após a pintura. Esse comportamento se deve ao fato de que, nos primeiros dias, o excesso de material ainda está sendo removido e, após os primeiros 15 dias, ainda há microesferas sobre a pintura às quais não estão devidamente ancoradas. Quando essas microesferas se soltam, a retrorrefletividade inicial é prejudicada; contudo, após a retirada, os valores voltam a subir. Em sua pesquisa, Renz, 2018 também observou que, após 30 dias, os valores de retrorrefletividade tendem a aumentar.

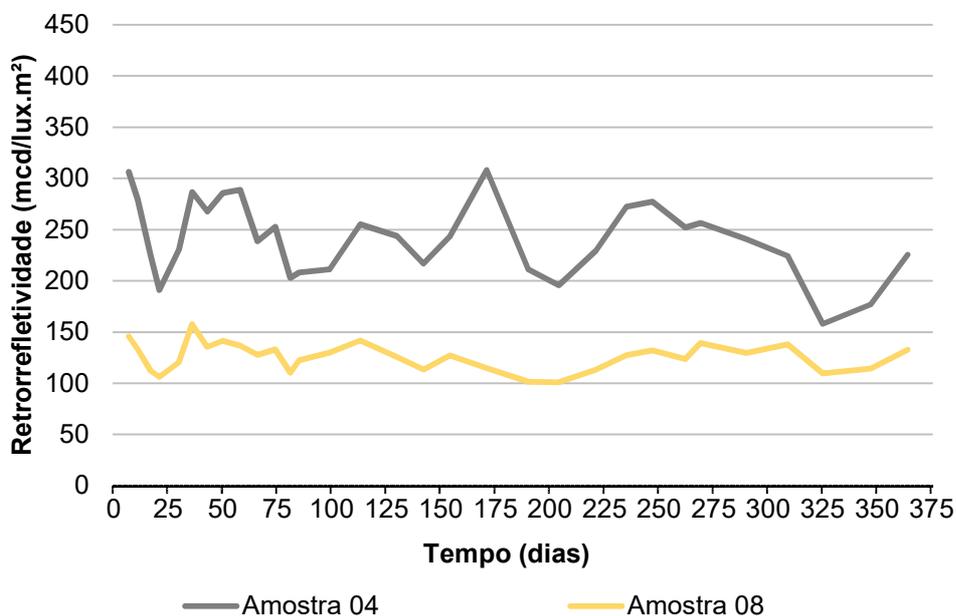
Por outro lado, comparando os gráficos das figuras 28 e 29 e considerando os mesmos trechos avaliados, observa-se que a retrorrefletividade para a geometria de 15 m é sempre maior que para a geometria de 30 m, embora ambas tenham um mesmo comportamento, como observado por outros autores como De Salles *et al.*, (2015) e Renz (2018).

Considerando uma avaliação dos trechos 01 e 02, nos quais a pintura foi realizada somente com as microesferas do Tipo-IB (amostras 1 e 2), observa-se retrorrefletividades bem menores que os trechos com microesferas do TIPO-IIA somadas a IB, para ambas as geometrias. Isso se deve ao fato de que as microesferas do Tipo-IB estão imersas na tinta e, portanto, não retrorrefletem a luz até que a tinta se desgaste, efeito que praticamente não ocorreu durante o tempo de avaliação (1 ano). Por outro lado, a alta retrorrefletividade para as microesferas do Tipo-IIA, quando comparada com o Tipo-IB, se justifica pela sua exposição ao meio externo, consequência do método de deposição por aspersão. Ainda com relação as amostras 1 e 2, as quais se diferem pela espessura da tinta (amostra 2 tem espessura de 1mm enquanto a amostra 1 tem espessura de 0,5mm), observa-se que este fator espessura não é uma variável significativa no que se refere as medidas de retrorrefletividade dentro do período avaliado, uma vez que, para ambas as geometrias, os valores são praticamente os mesmos.

Além disso, as amostras 01 e 02 não satisfazem os limites mínimos de retrorrefletividade dados pelo DNIT, o que sugere que estas sejam aplicadas somente se as microesferas do Tipo-IIA também estiverem presentes na sinalização.

A Figura 30 mostra o comportamento das amostras 04 e 08 para a geometria de 15 metros, onde ambas possuem a mesma espessura de tinta e densidade de microesferas (IB e IIA), sendo a cor da marcação a única variável. Observa-se que a marcação na cor amarela apresenta menor retrorrefletividade em comparação à cor branca, fato este observado por outros autores (Renz, 2018) e que justifica os valores de retrorrefletividade dados pelas agências reguladoras, as quais consideram os limites mínimos menores para a cor amarela quando comparado com a cor branca (DNIT-2021). O mesmo pode ser observado para a geometria de 30m.

Figura 30 – Análise das amostras 04 e 08 com relação a cor para a geometria de 15m



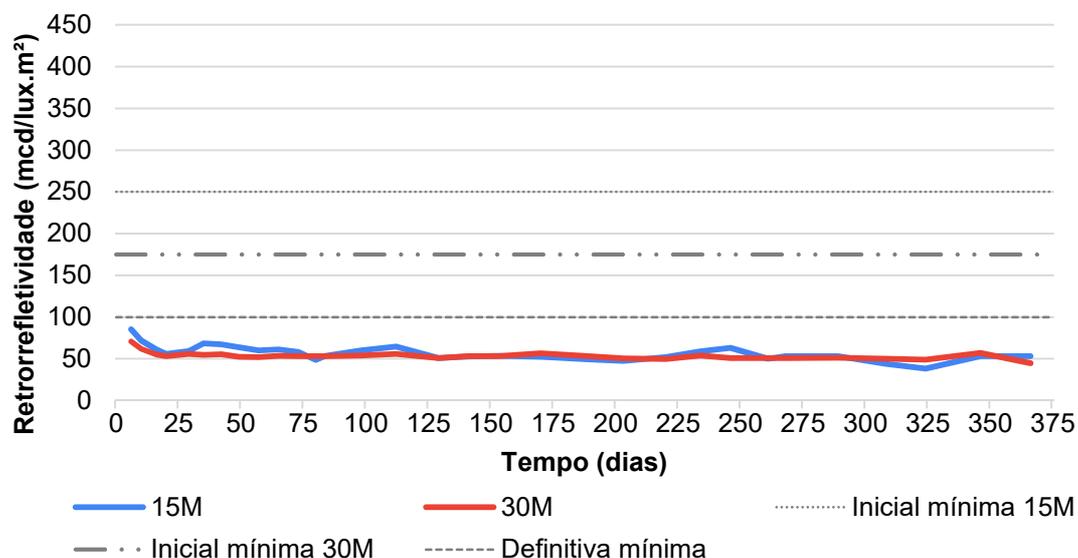
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Neste sentido, visando avaliar o desempenho das amostras, é necessário compará-las com os valores mínimos exigidos pelo Departamento Nacional de

Infraestrutura de Transportes (DNIT). Para a cor branca, o valor mínimo inicial de retrorreflexão para uma geometria de 15 metros é de 250 mcd/lux.m² e, para uma geometria de 30 metros, é de 175 mcd/lux.m². O valor de retrorreflexão residual, independente da geometria, é de 100 mcd/lux.m². Para a cor amarela, o valor mínimo inicial é de 150 mcd/lux.m² para a geometria de 15 metros e de 105 mcd/lux.m² para a geometria de 30 metros, enquanto o valor mínimo residual é o mesmo para ambas as geometrias, sendo de 80 mcd/lux.m². A seguir, é descrito o desempenho de cada uma das amostras avaliadas.

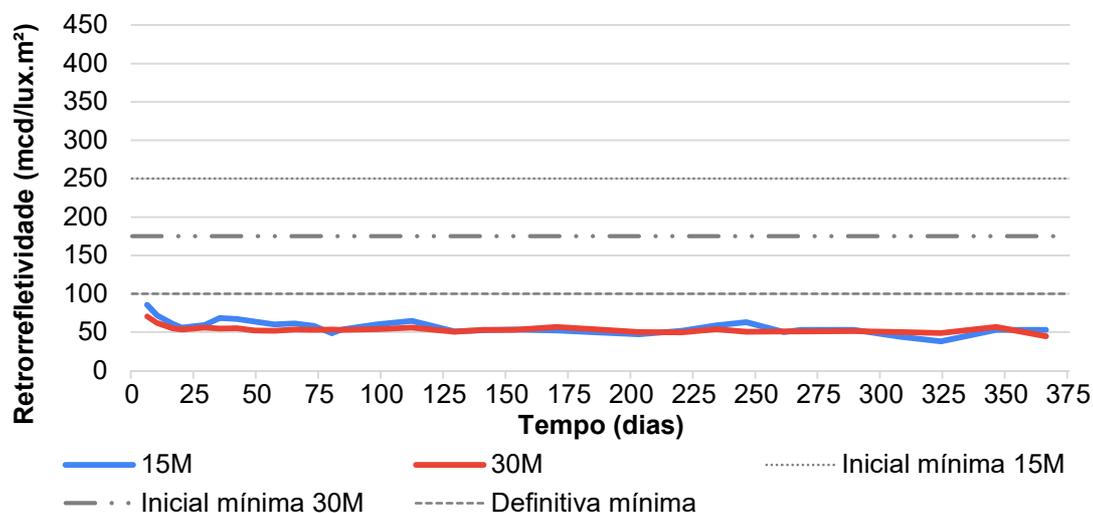
De forma mais específica, nas Figura 31 e 32 são mostradas as medidas de retrorrefletividade das amostras 01 (branca, 0,5mm e IB) e 02 (branca, 1mm e 2xIB), respectivamente, junto com os limites dados pelo DNIT. Lembrando que nas amostras 01 e 02 amostras 01 (branca, 0,5mm e IB) e 02 (branca, 1mm e 2xIB), foram utilizadas somente microesferas do tipo-IB, as medidas mostraram que desde os primeiros dias a retrorrefletividade ficou abaixo do valor mínimo definitivo. Conforme já descrito, isso ocorre porque, para que as microesferas do tipo IB desempenhem sua função adequada, é necessário um desgaste inicial da tinta. No entanto, devido à localização do estudo, realizado no bordo ao lado de um canteiro central com baixo tráfego de veículos, esse desgaste não foi significativo. Como resultado, após um ano de medições, não foi possível observar uma alteração relevante na retrorrefletividade.

Figura 31 – Retrorefletividade média da amostra 01 com valores mínimos pelo DNIT – Geometria de 15 e 30m



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 32 – Retrorefletividade média da amostra 02 com valores mínimos pelo DNIT – Geometria de 15 e 30m

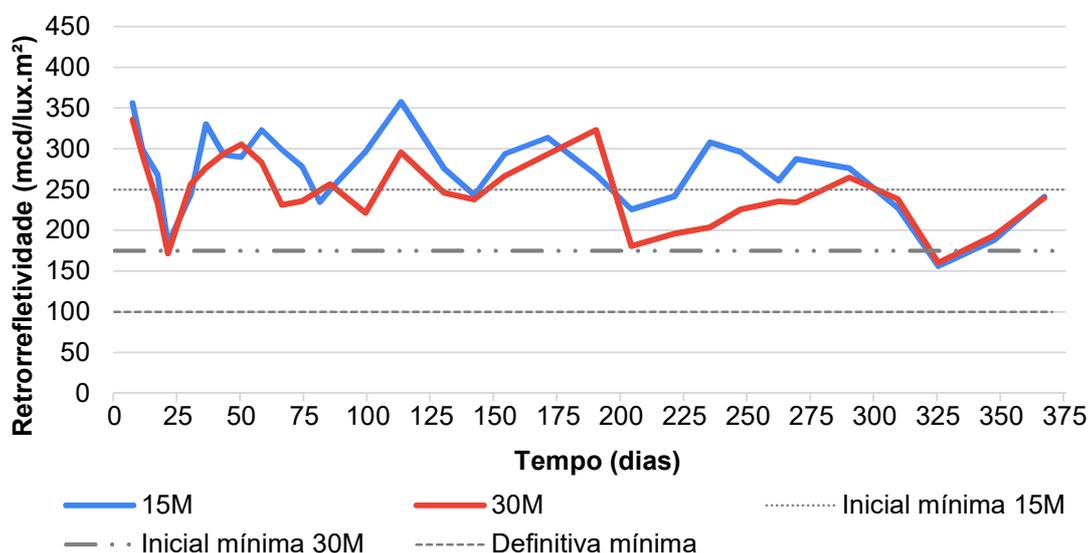


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os resultados de retrorefletividade da amostra 03 (branca, 1mm, 2xIB e IIA), apresentada na Figura 33, embora tenha satisfeito os critérios de retrorefletividade inicial, apresentou uma queda inicial acentuada nos valores de retrorefletividade nos primeiros dias de medição, seguida por uma recuperação gradual. Para a geometria de 15 metros, após 21 dias, os valores de

retrorefletividade mantiveram-se consistentemente acima do limite mínimo inicial, mas após 269 dias houve uma nova queda acentuada. No caso da geometria de 30 metros, os valores permaneceram acima do limite mínimo inicial até os 325 dias, quando a retrorefletividade chegou a 160 mcd/lux.m², antes de voltar a subir. Após um ano de acompanhamento, a amostra apresentou uma tendência de redução na retrorefletividade em ambas as geometrias, no entanto, os resultados ainda demonstram uma boa retrorefletividade, pois os valores permanecem bem acima dos limites mínimos definitivos.

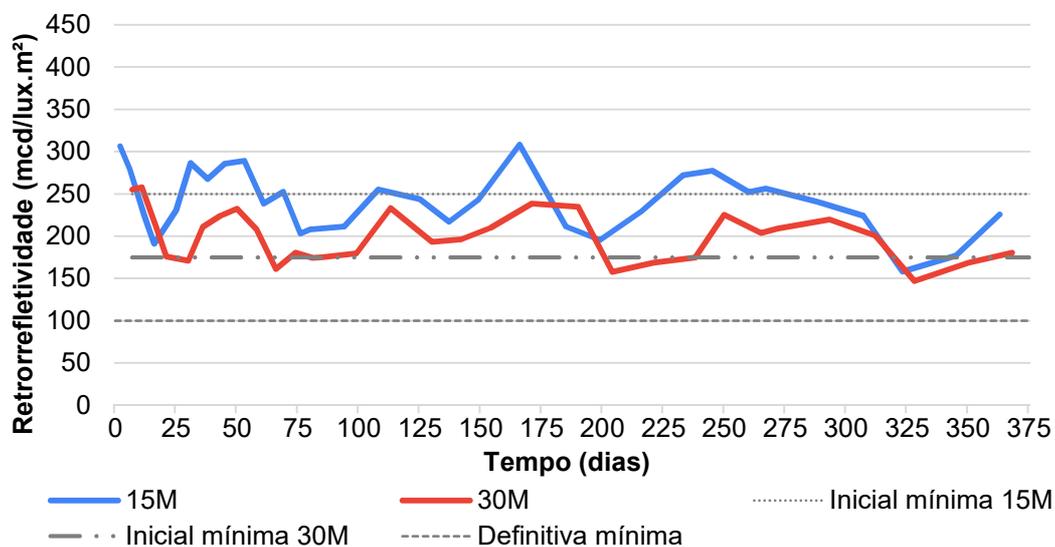
Figura 33 – Retrorefletividade média da amostra 03 com valores mínimos pelo DNIT – Geometria de 15 e 30m



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os resultados de retrorefletividade para a amostra 04 (branca, 0,5mm, IB e IIA), apresentada na Figura 34, apresentou uma queda acentuada nos valores de retrorefletividade nos primeiros dias após a aplicação da pintura. A geometria de 15 metros permaneceu, na maior parte do acompanhamento, abaixo dos valores mínimos iniciais estabelecidos. Em contrapartida, a geometria de 30 metros manteve-se, em grande parte do período de análise, acima dos valores mínimos iniciais. Nos últimos dias de acompanhamento, ambas as geometrias registraram uma redução significativa na retrorefletividade, com valores abaixo de 180 mcd/lux.m². Esse resultado evidencia uma tendência de queda na retrorefletividade ao longo do tempo para ambas as geometrias, embora os valores se mantenham dentro dos padrões aceitáveis estabelecidos pelo DNIT.

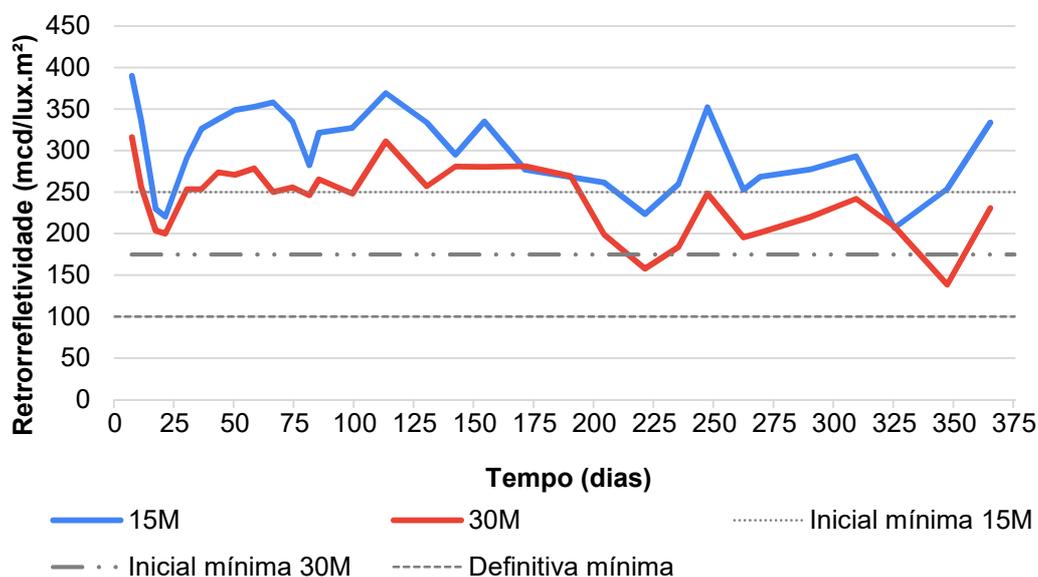
Figura 34 – Retrorefletividade média da amostra 04 com valores mínimos pelo DNIT – Geometria de 15 e 30m



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Na Figura 35 é apresentada os resultados para a amostra 05 (branca, 0,5mm, IB e 2xIIA), que, assim como as demais, mostrou uma queda abrupta na retrorefletividade nos primeiros dias, tanto na geometria de 15m quanto na de 30m, até que o material se estabilizasse. Ambas as geometrias mantiveram um excelente desempenho até 204 dias, momento a partir do qual a retrorefletividade começou a diminuir, mas ainda se mantiveram acima dos valores mínimos estabelecidos para a repintura. Na última medição, observou-se um aumento nos valores de retrorefletividade. Até o momento, o trecho apresenta bom desempenho em termos de retrorefletividade se mantendo dentro dos padrões aceitáveis estabelecidos pelo DNIT.

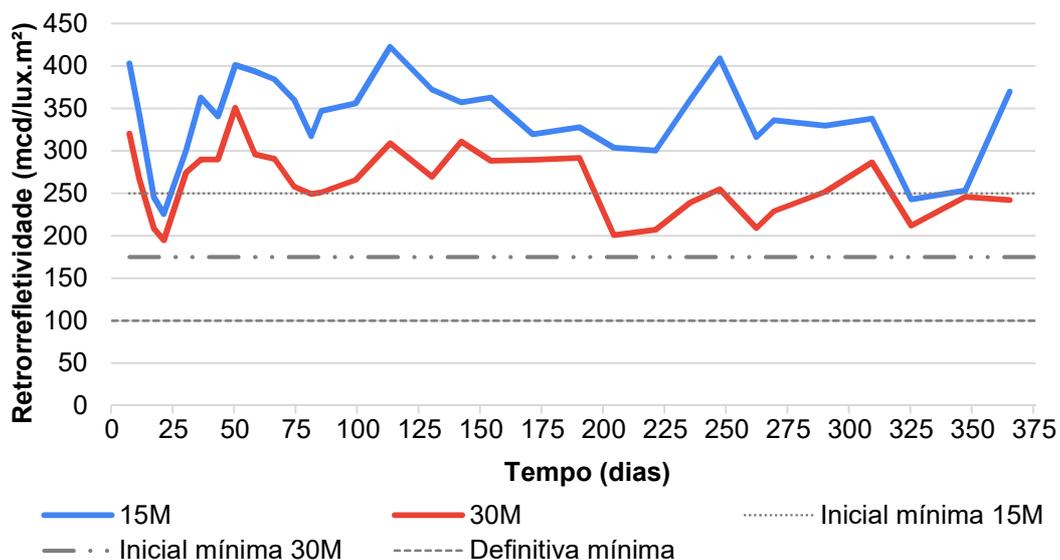
Figura 35 – Retrorefletividade média da amostra 05 com valores mínimos pelo DNIT – Geometria de 15 e 30m



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Na Figura 36 é apresentado os resultados de retrorefletividade da amostra 06 (branca, 1mm, 2xIB e 2xIIA), ao longo de um ano. Nos primeiros dias, ambas as geometrias (15m e 30m) mostraram uma queda na retrorefletividade, provavelmente causada pela perda das microesferas com pouca ancoragem. Porém, entre todas as amostras estudadas, esta foi a que levemente obteve o melhor desempenho em termos de retrorefletividade, também atendendo aos padrões do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

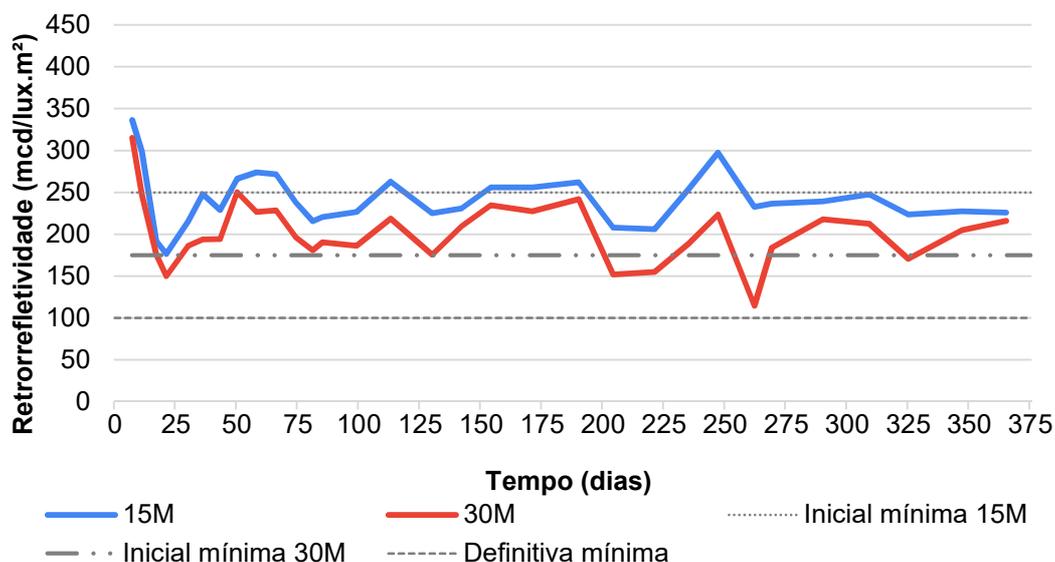
Figura 36 – Retrorefletividade média da amostra 06 com valores mínimos pelo DNIT – Geometria de 15 e 30m



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

No gráfico apresentado na Figura 37, observa-se que a amostra 07 (branca, 0,3mm, IB e IIA), apresenta uma queda inicial acentuada nos valores de retrorefletividade para ambas as geometrias (15m e 30m) nos primeiros dias de acompanhamento, assim como as demais amostras. Após essa fase inicial, os valores oscilaram em torno de um valor médio para ambas as geometrias, mantendo-se dentro dos limites estabelecidos e com boa estabilidade ao longo do tempo.

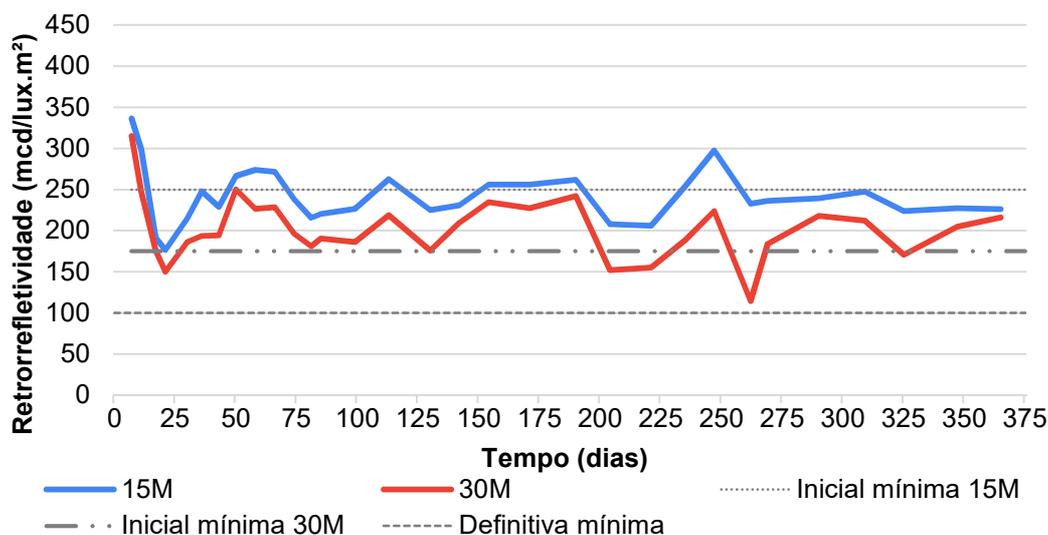
Figura 37 – Retrorrefletividade média da amostra 07 com valores mínimos pelo DNIT – Geometria de 15 e 30m



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Figura 38 mostra os resultados de retrorrefletividade da amostra 08 (amarela, 0,5mm, IB e IIA), que apresentou uma queda acentuada nos primeiros dias, seguida de um aumento após 30 dias. Durante todo o período de medição, os valores da amostra foram encontrados dentro dos limites mínimos iniciais para as geometrias de 15m e 30m. A amostra 08, por ser amarela, apresenta valores de retrorrefletividade inferiores as demais, conforme descrito nas normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

Figura 38 – Retrorrefletividade média da amostra 08 com valores mínimos pelo DNIT – Geometria de 15 e 30m



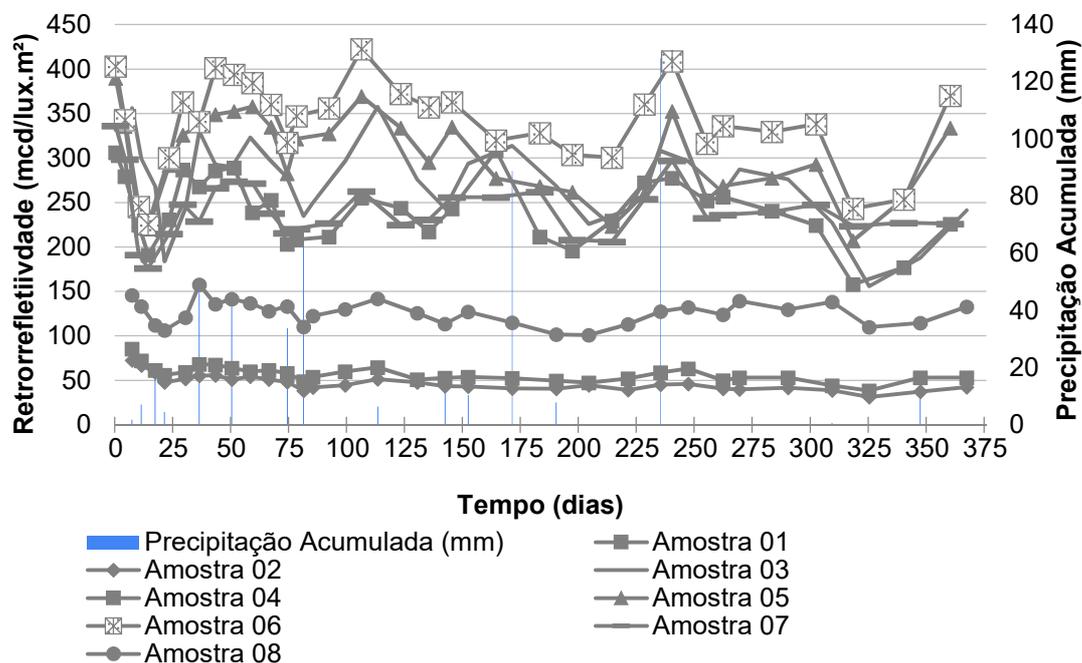
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Devido ao acompanhamento limitado a um ano, o estudo não permitiu identificar o momento exato em que as amostras com microesferas apenas do tipo IB poderiam aumentar sua retrorrefletividade, nem quando as demais amostras atingiriam seus valores mínimos de retrorreflexão. Em todas as campanhas de medição realizadas, nenhuma das amostras, tanto as que utilizam microesferas tipo IB quanto as com microesferas tipo IB e IIA, apresentou valores abaixo do limite mínimo residual.

4.2 Interferência da Precipitação Acumulada

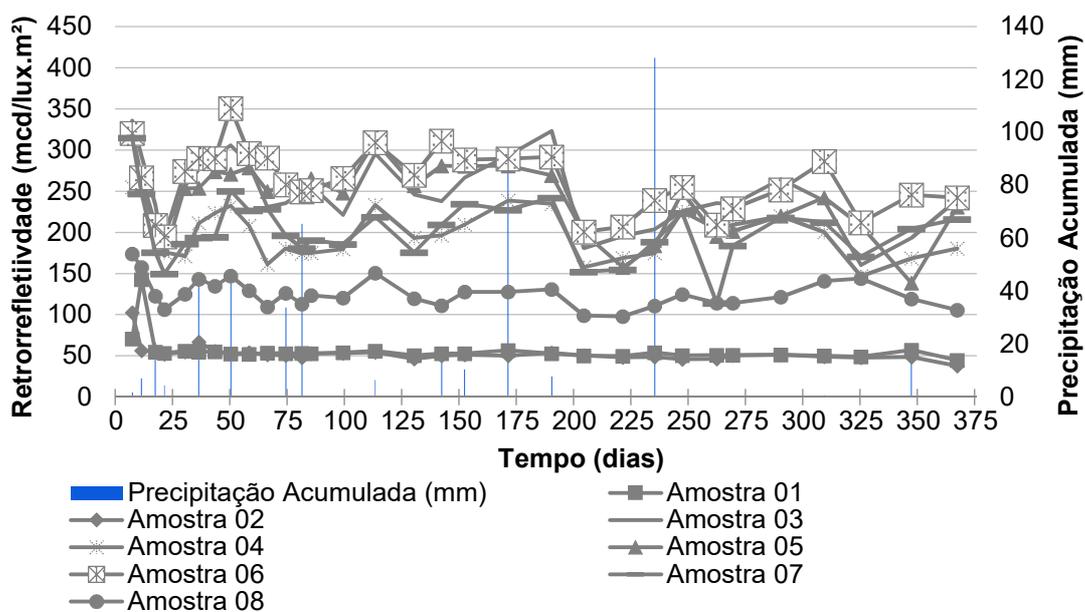
Com os resultados obtidos nas medições, realizaram-se comparações com os índices de precipitação dos dias anteriores, a fim de verificar possíveis interferências nos valores medidos. Nas Figuras 39 e 40, estão apresentados os comportamentos da retrorrefletividade para as geometrias de 15 m e 30 m, considerando a precipitação acumulada (em azul) nos três dias anteriores a medição, em função do tempo (dias). Esse procedimento visou analisar o impacto da precipitação no comportamento da retrorrefletividade.

Figura 39 – Geometria de 15m: retrorefletividade média para todos os trechos em função do tempo considerando a precipitação acumulada



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 40 – Geometria de 30m: retrorefletividade média para todos os trechos em função do tempo considerando a precipitação acumulada



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Embora a chuva possa limpar (lavar) a demarcação viária, o que sugere a remoção de microesferas que não estejam bem ancoradas (diminuindo a retrorrefletividade) bem como a remoção de sujeira (aumentando a retrorrefletividade), observa-se a partir das figuras 39 e 40 que os valores de retrorrefletividade não apresentam variações significativas em períodos de grande volume de chuva. Os picos de retrorrefletividade são observados principalmente em dias em que a precipitação é próxima de zero. Renz, (2018) também identificou em seu estudo que a presença de chuva não contribui para a melhoria da sinalização (retrorrefletividade). Por outro lado, a combinação da chuva com o trânsito poderia ter um efeito mais significativo na sinalização. Porém, devido à localização do estudo (na borda com tachões e canteiro central), pode-se dizer que a sinalização não é afetada pelo desgaste dos pneus dos veículos.

4.3 Degradação da retrorrefletividade ao longo do tempo

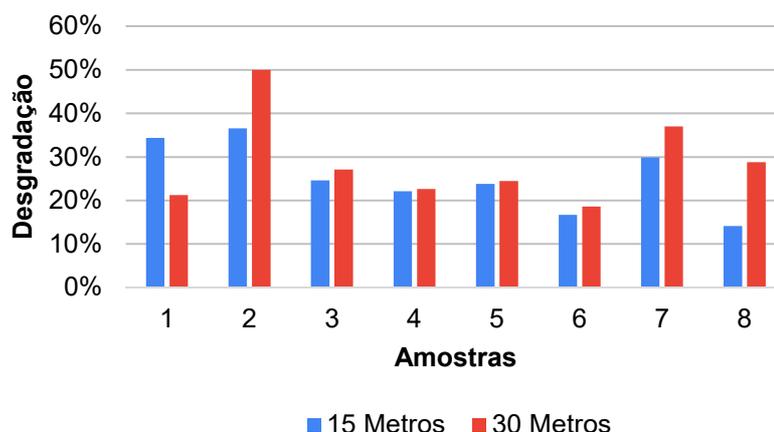
A taxa de degradação dos valores das amostras para cada geometria é um fator relevante quando se pensa em durabilidade até a repintura. É importante considerar que, devido ao acompanhamento ter ocorrido em um período de apenas um ano, foram observadas taxas de degradação relativamente altas. Segundo Rasdorf *et al.*, (2009) e Hummer *et al.*, (2011), a cor branca apresenta uma degradação mais rápida, apesar de sua retrorrefletividade ser mais alta que a cor amarela. Ambos os estudos indicaram uma taxa diária de degradação de aproximadamente 0,1% e 0,04% para os valores de retrorrefletividade para as cores branca e amarela, respectivamente.

Na Figura 41 é apresentada a percentagem de degradação anual das amostras analisadas. A análise foi realizada considerando a razão entre o valor médio de todas as medidas e o valor inicial. A amostra 01 (branca, 0,5mm e IB), registrou uma degradação de 34% na geometria de 15 metros e de 21% na de 30 metros. A amostra 02 (branca, 1mm e 2xIB), por sua vez, apresentou uma degradação elevada, chegando a 37% e 50% para as geometrias de 15 e 30 metros, respectivamente. As amostras 03 (branca, 1mm, 2xIB e IIA), 04 (branca, 0,5mm, IB e IIA) e 05 (branca, 0,5mm, IB e 2xIIA) tiveram comportamentos

semelhantes, com degradação diária (degradação anual dividida por 365 dias) de 0,06% e 0,07% para ambas as geometrias. A amostra 06 (branca, 1mm, 2xIB e 2xIIA), apresentou a menor degradação entre todas, 17% para a geometria de 15m e 19% para a geometria de 30m, ao longo do ano, o que representa uma degradação diária de aproximadamente 0,05%.

A amostra 07 (branca, 0,3mm, IB e IIA) teve uma degradação semelhante ao da amostra 01 (branca, 0,5mm e IB), com valores diários de 0,08% para a geometria de 15 metros e 0,10% para a de 30 metros. Por fim, a amostra 08 (amarela, 0,5mm, IB e IIA). apresentou menor degradação para a geometria de 15 metros em comparação com a amostra 04 (branca, 0,5mm, IB e IIA), que foi pintada de branco em condições similares. A amostra 08 (amarela, 0,5mm, IB e IIA) teve uma degradação anual de 14% (0,04% diário), enquanto que, para a geometria de 30 metros, esse valor dobrou, atingindo 0,08% de degradação.

Figura 41 – Degradação anual das amostras avaliadas



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.4 Comparação em termos de Custo-Benefício

Para avaliação do custo benefício, foi considerada uma comparação entre as amostras 3 (branca, 1mm, 2xIB e IIA), 4 (branca, 0,5mm, IB e IIA), 5 (branca, 0,5mm, IB e 2xIIA), 6 (branca, 1mm, 2xIB e 2xIIA) e 7 (branca, 0,3mm, IB e IIA), as quais possuem a mesma cor (branco) e tiveram valores de retrorrefletividade dentro daqueles estipulados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) no período das medições. Sendo assim, as amostras 1 e 2

não foram consideradas por não terem atingido os mínimos de retrorrefletividade descritos pelo DNIT e a amostra 8 não foi considerada por ser a única de cor amarela. A comparação foi feita aplicando o modelo de *Hummer et al.*, (2011), o qual, entre todos os modelos descritos na revisão bibliográfica, se mostrou mais adequado aos dados experimentais coletados. A tabela 6 resume a durabilidade (tempo) prevista pelo modelo de Hummer até atingir o mínimo de retrorrefletividade descrito pelo DNIT, considerando a geometria de 30m. Por outro lado, foi considerado os gastos associados aos materiais utilizados por quilômetro de pintura. Para isso foram considerados os valores comerciais médios da tinta branca bem como as microesferas do Tipo-IB e IIA. Embora seja muito importante, aqui não foi considerado os custos associados ao maquinário, traslado de maquinário e hora homem, somente o custo dos materiais.

Tabela 6 – Análise do custo-benefício entre as amostras

| Amostras | Durabilidade da sinalização (dias) | Custo da amostra (material) |
|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| 3 (branca, 1mm, 2xIB e IIA) | 1213 | R\$ 3.610,00 |
| 4 (branca, 0,5mm, IB e IIA) | 870 | R\$ 2.100,00 |
| 5 (branca, 0,5mm, IB e 2xIIA) | 1213 | R\$ 2.690,00 |
| 6 (branca, 1mm, 2xIB e 2xIIA) | 1231 | R\$ 4.200,00 |
| 7 (branca, 0,3mm, IB e IIA) | 1208 | R\$ 1.480,84 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Como pode ser observado na tabela 6, as amostras 3, 5, 6 e 7 são teoricamente mais duráveis que a amostra 4 (comumente utilizada na sinalização), tendo valores superiores a 1200 dias, um tempo praticamente 40% maior que a amostra padrão. Do ponto de vista prático, pode-se dizer que para cada duas pinturas para os casos das amostras 3, 5, 6 e 7, devem ser feitas 3 pinturas para a amostra 4. Por outro lado, considerando os custos de material, pode-se observar que a amostra 7 teve melhor resultado comparado com todas as outras situações. Isso se deve ao fato que a espessura de tinta e a quantidade de microesferas são as menores entre todas as amostras, refletindo nos custos. Comparando a amostra 7 com a amostra 4 (padrão), existe uma economia em torno de 30% de material por quilômetro, o que torna a amostra 7 aquela com

melhor custo benefício entre todas as amostras avaliadas neste trabalho. Por outro lado, a amostra 7, por ser menos espessa, pode não ser indicada para áreas sujeitas a tráfego intenso (como faixas de pedestre) devido ao maior desgaste causado pelos veículos neste tipo de condição. Em contrapartida, em locais onde não há trânsito de veículos, como em pinturas de bordo, que é o caso considerado neste trabalho, a amostra 07 se torna a escolha ideal, conforme os parâmetros analisados neste estudo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo teve como objetivo avaliar, na prática, oito trechos com demarcação horizontal urbana aplicados sobre MRAF, variando alguns parâmetros como espessura e cor da tinta além densidades de microesferas de diferentes tipos do ponto de vista de retrorrefletividade e custo-benefício. Após um ano de acompanhamento e monitoramento dos índices de retrorrefletividade, foi possível obter as seguintes conclusões:

- Todas as pinturas com presença de microesferas do Tipo-IIA apresentaram altos valores de retrorrefletividade, bem superiores ao mínimo exigido pelas agências regulatórias;
- As amostras 01 (branca, 0,5mm e IB) e 02 (branca, 1mm e 2xIB), com microesferas do tipo IB de diâmetro menor, incorporadas diretamente na tinta, não alcançaram índices de retrorrefletividade de acordo com os padrões mínimos estipulados pelos órgãos regulamentadores, durante o período de avaliação;
- Todas as amostras apresentaram um comportamento de decréscimo na retrorrefletividade nos primeiros dias após a aplicação, período em que ocorre a perda das microesferas menos ancoradas;
- Nos trechos de características similares, mas cores diferentes, observou-se uma taxa de degradação semelhante entre as cores, sendo que a cor amarela apresentou sempre um valor de retrorrefletividade menor que a cor branca;
- Para as condições consideradas neste trabalho, a amostra 07 (branca, 0,3mm, IB e IIA), apresentou o melhor desempenho em termos de custo-benefício.

Por fim, ressalta-se que, para uma análise mais conclusiva, é necessário o acompanhamento contínuo das amostras até que todas atinjam seus valores mínimos definitivos de retrorrefletividade, o que permitirá uma avaliação mais abrangente e precisa dos resultados obtidos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para obter resultados mais completos e precisos, sugere-se o aprofundamento das pesquisas, com foco nas seguintes atividades:

- Manter o monitoramento dos valores de retrorrefletividade das amostras até que todas atinjam os valores mínimos estabelecidos pelo DNIT;
- Realizar a demarcação das amostras em locais com tráfego veicular direto, como nas faixas centrais das vias;
- Conduzir a análise das amostras em faixas de pedestres para avaliar o desempenho específico neste contexto;
- Avaliar a durabilidade das taxas de microesferas do tipo IB e IIA ao longo do tempo;
- Realizar a demarcação em outros tipos de pavimento, para comparar os resultados.
- Baseado em uma avaliação temporal maior, encontrar um modelo que preveja o tempo máximo para que seja feita uma repintura e deposição de microesferas, momento em que o limite mínimo de retrorrefletividade é atingido, conforme previsto pelas agências regulatórias.

7 REFERÊNCIAS

ANTT — AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Metodologia para avaliação técnica e de durabilidade de sinalização horizontal de rodovias de tráfego muito pesado. Relatório final. Autopista Fernão Dias - Arteris. Fevereiro, 2017.

ABNT — ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13699**: Sinalização horizontal viária — Tinta à base de resina acrílica emulsionada em água. Rio de Janeiro, 2021

____. **ABNT NBR 14723**: Sinalização horizontal viária — Medição de retrorrefletividade utilizando equipamento manual com geometria de 15 m — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

____. **ABNT NBR 15405**: Sinalização horizontal viária — Tintas — Procedimentos para execução da demarcação e avaliação. Rio de Janeiro, 2016.

____. **ABNT NBR 16184**: Sinalização horizontal viária — Esferas e microesferas de vidro — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

____. **ABNT NBR 16307**: Sinalização horizontal viária — Medição de retrorrefletividade utilizando equipamento manual com geometria de 30 m — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

____. **ABNT NBR 16410**: Sinalização horizontal viária — Avaliação da retrorrefletividade utilizando equipamento dinâmico com geometria de 15 m ou 30 m. Rio de Janeiro, 2016.

BABIĆ, Darko; BURGHARDT, Tomasz E.; BABIĆ, Dario. Application and characteristics of waterborne road marking paint. **International Journal for Traffic and Transport Engineering**, v. 5, n. 2, p. 150-169, 2015.

CONTRAN — CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito: Volume IV – Sinalização Horizontal**. Brasília: Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN), 2022.

CNT — CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2023**. Brasília: CNT, SEST SENAT, ITL, 2023.

DETRAN-RS — DEPARTAMENTO ESTADUAL DE TRÂNSITO DO RIO GRANDE DO SUL. **Diagnóstico da acidentalidade fatal no trânsito**. Porto Alegre: DETRAN-RS, 2022.

DNER — DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER EM 373/2000: Microesferas de vidro retrorrefletivas para sinalização horizontal viária**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2000.

DNIT — DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 409 PRO: Medida da retrorrefletividade com uso de equipamento dinâmico - Procedimento**. Rio de Janeiro: IPR, 2017.

____. **Instrução Normativa nº 64/DNIT Sede**, de 23 de setembro de 2021.

DE PAIVA, Rodrigo. Reflexão da luz. **Revista de Ciência Elementar**, v. 2, n. 1, p.009, jan./ mar 2014.

DE SALLES, Lucio Salles et al. Avaliação retrorrefletiva de pintura de demarcação horizontal: peculiaridades e considerações sobre a norma e os requisitos mínimos nacionais. **Transportes**, v. 23, n. 3, p. 5-17, 2015

EASYLUX. Retroreflectometer clássico horizontsl. Disponível em: <https://easylux.com.br/products/horizontal-classic/>. Acesso em: 14 jun. 2024.

HUMMER JE RSDORF, W. ZHANG, G. (2011). **Linear Mixed-effects Models For Paint Marking Retroreflectivity Data**. Journal of Transportation Engineering Vol 137, no. 10 ASCE, p. 705-716

INDUTIL. Inducold Tipo IV. Disponível em: <https://indutil.com.br/produto/inducold-tipo-iv/>. Acesso em: 19 jun. 2024.

INMET — INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Mapas Interativos. Disponível em: <https://mapas.inmet.gov.br/>. Acesso em: 14 jun. 2024.

MACHADO, D. D. D. N. **Estudo da durabilidade da sinalização horizontal em pavimentos asfáltios rodoviários**. Orientador: Dra. Liedi Legi Bariani Bernucci. 2019. 165 f. Tese (Doutorado) - Curso de Mestrado em Ciências, Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2019.

MAZZONI, Laura Nascimento et al. Comportamento entre medidas de retrorrefletividade na geometria de 15 e 30 metros e seu efeito na segurança viária. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 33. 2019, Balneário Camboriú. Anais... São Paulo: Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 2019. p. 3645-3656.

MOREIRA, Hélio Antônio. Comparativo dos métodos de medição de retrorrefletividade com geometrias de 15m e 30m. **Revista UniCET**, v. 2, n. 1, 2019.

MOREIRA, Hélio; MENEGON, Roberto. **Sinalização horizontal**. São Paulo: Master, set 2003.

OZELIM, Luana; TUROCHY, Rod E. Modeling retroreflectivity performance of thermoplastic pavement markings in Alabama. **Journal of Transportation Engineering**, v. 140, n. 6, p. 05014001, 2014.

RASDORF, W. J. HUMMER JE ZHANG, G. SIIZABEE, W. E. (2009) **Pavement Marking Performance Analysis**. North Carolina Department For Transportation, Research and Development Group. Raleigh, NC

RENZ, E. M. **Avaliação do comportamento da retrorrefletividade de pintura de demarcação viária em micro revestimento asfáltico a frio**. Orientador Dr. Deividi da Silva Pereira. 2018. 191 f. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria centro de tecnologia programa de pós-graduação em engenharia civil, Santa Maria/RS, 2018.

SCHWAB, M. S. F. **Estudo do desempenho dos materiais de demarcação viária retrorrefletivos**. Orientador: Dr. Robson José de Cássia Franco Afonso. 1999. 160 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Engenharia dos Materiais, Rede Temática em Engenharia de Materiais (UFOP-UEMG-CETEC), Belo Horizonte/MG, 1999.

THAMIZHARAZAN, A.; Sarasua, W.; Clarke, D. B.; Davis, W. J. - **A Methodology for Estimating the Lifecycle of Interstate Highway Pavement Marking Retroreflectivity** - TRB Paper Number 03-3867 - Transportation Research Board - Washington, D.C., 2002.

VASCONCELOS, Kamilla; BERNUCCI, Liedi; LINHARES, Guilherme. **Considerações para o planejamento e monitoramento de um trecho experimental de sinalização horizontal em rodovias brasileiras**. São Paulo: Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 2024.

ZHANG, Guanghua; HUMMER, Joseph E.; RASDORF, William. Impact of bead density on paint pavement marking retroreflectivity. **Journal of Transportation Engineering**, v. 136, n. 8, p. 773-781, 2010.

ZHANG, Guanghua et al. The impact of pavement type and roughness on paint marking retroreflectivity. **Public Works Management & Policy**, v. 18, n. 1, p. 41-55, 2013.