

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Rossano Streppel Vieira

**ESTUDO DE DESEMPENHO DE EFICIÊNCIA RETRORREFLETIVA  
DE PELÍCULAS EMPREGADAS EM SINALIZAÇÃO VERTICAL**

Santa Maria, RS  
2020



**Rossano Streppel Vieira**

**ESTUDO DE DESEMPENHO DE EFICIÊNCIA RETRORREFLETIVA  
DE PELÍCULAS EMPREGADAS EM SINALIZAÇÃO VERTICAL**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), com requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Dr. Deividi da Silva Pereira

Santa Maria, RS  
2020

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Finance Code 001

Vieira, Rossano Streppel

ESTUDO DE DESEMPENHO DE EFICIÊNCIA RETRORREFLETIVA  
DE PELÍCULAS EMPREGADAS EM SINALIZAÇÃO VERTICAL / Rossano  
Streppel Vieira.- 2020.

233 p.; 30 cm

Orientador: Deividi da Silva Pereira

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de  
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2020

1. Sinalização vertical 2. Retrorrefletividade 3. Avaliação do  
desempenho I. Pereira, Deividi da Silva II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Rossano Streppel Vieira

## **ESTUDO DE DESEMPENHO DE EFICIÊNCIA RETRORREFLETIVA DE PELÍCULAS EMPREGADAS EM SINALIZAÇÃO VERTICAL**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), com requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

**Aprovado em 30 de outubro de 2020:**



---

**Deividi da Silva Pereira, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)



---

**Alejandro Ruiz Padillo, Dr. (UFSM)**



---

**Lucas Dotto Bueno, Dr. (FATEC)**



## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer:

Inicialmente e especialmente, aos meus pais, Cleusa e Jorge, e ao meu irmão, Angelo, por serem meu suporte e inspiração, não somente desta etapa de minha vida, mas ao longo de todo caminho que percorri, amo vocês.

A toda minha família Streppel e Vieira, em especial ao meu primo Frederico Streppel que corrigiu e ajudou na escrita de alguns textos.

Ao meu orientador Professor Deividi da Silva Pereira pela disposição em sempre auxiliar na construção deste trabalho, além da paciência tida em me instruir ao longo do mestrado.

À banca examinadora, Alejandro Ruiz Padillo e Lucas Dotto Bueno, pela contribuição no desenvolvimento desta dissertação.

A CAPES pelo fomento da bolsa que possibilitou a realização desta pesquisa.

Ao meus colegas de pós-graduação e os alunos de graduação, que além de serem colegas de trabalho =), alguns deles tornaram-se meus grandes amigos e essenciais na elaboração desta pesquisa, destaco aqui alguns nomes Silvio Schuster (*Surprise*), Jonathan Rehbein, Eduardo Druzian, Ketrily Saraiva, Pablo Vestena, Fernando Boeira, Chaveli Brondani, Pedro Ilha, Gabriel Wegener, Bruno Gonçalves, Pedro Orlando, Amanda Sagrilo, Bethania Correa, Paula Pascoal e a todos os outros colegas que foram importantes nesta pesquisa mas pelo curto espaço não pude citá-los.

Aos amigos de infância e graduação que participaram desse período de mestrado, não tanto com contribuições a este trabalho, ainda bem =), mas de forma mais descontraída como *happy hour*, fazendo com que esses dias estressantes de mestrado tenham sido suavizados.

Aos professores do GEPPASV/UFSM que contribuíram de alguma forma ao documento final.



“O presente trabalho foi realizado com apoio da  
Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível  
Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001”



## RESUMO

### ESTUDO DE DESEMPENHO DE EFICIÊNCIA RETRORREFLETIVA DE PELÍCULAS EMPREGADAS EM SINALIZAÇÃO VERTICAL

AUTOR: Rossano Streppel Vieira  
ORIENTADOR: Dr. Deividi da Silva Pereira

A boa visibilidade das sinalizações verticais é de suma importância para que os motoristas possam percebê-las e realizar as ações mais apropriadas para a segurança de si mesmos e dos outros condutores. Entretanto, por vezes, é possível observar placas de sinalização que, durante o dia, são visíveis e apresentam um bom aspecto, mas que, à noite, suas cores não transmitem a mesma informação. Um dos métodos existentes para que se possa estimar a capacidade de a placa ser visualizada no período noturno são as leituras de retrorrefletividade realizadas com aparelhos portáteis de medição. Esta pesquisa tem como objetivo medir e analisar os resultados de retrorrefletividade de películas empregadas em sinalização vertical implementada no segmento experimental localizado na cidade de Santa Maria/RS, além de avaliar, laboratorialmente, o comportamento dessas películas. O segmento experimental possui 24 placas de sinalização vertical de quatro diferentes cores e três tipos de películas, de acordo com a norma NBR 14644 (2013). Uma película de mesma cor e do mesmo tipo era duplicada para se observar o efeito da sujeira ao longo do tempo, pois uma era limpa com água e sabão neutro e a outra não. No comparativo entre cores, tipos de películas e limpeza, verificou-se que, em relação à perda de retrorrefletância, somente a limpeza demonstrou ser um fator significativo estatisticamente nos 75 meses (6,27 anos) de análise. Com base nos modelos preditivos gerados neste estudo para as películas expostas no segmento experimental, o conjunto das películas sem limpeza apresentaram, em média, uma perda de retrorrefletância em relação à medida inicial cerca de 7 vezes maior que o conjunto das películas que recebiam limpeza regular. Sobre a correlação entre a performance retrorrefletiva de películas ensaiadas em um equipamento de envelhecimento artificial acelerado (Suntest XLS+) e medidas de campo, não se observou uma correlação exata entre os comportamentos dos dois testes, uma vez que houve um comportamento distinto entre as medidas obtidas em campo e as ensaiadas no Suntest XLS+, para uma condição de contorno de 1,5 anos de radiação acumulada (300-800nm). Entretanto, em comparação a correlação entre as medidas de retrorrefletividade e a radiação acumulada as películas expostas no Suntest XLS+ apresentaram uma maior correlação entre essas duas variáveis do que em campo. Observou-se que fenômenos meteorológicos, como a precipitação pluviométrica, não se mostraram fatores significativos na limpeza das películas retrorrefletivas e, conseqüentemente, nem no aumento dos valores medidos de retrorrefletividade. A temperatura da película se mostrou influente sobre a retrorrefletividade. Avaliando as películas expostas no segmento monitorado durante um dia, verificou-se, para uma variação de 25°C na temperatura da película, que ocorreu uma mudança de 20% da retrorrefletividade das películas tipos I e X e de 40% para película tipo III. Comparando os modelos preditivos encontrados na literatura com os gerados no segmento experimental, não foi notado um percentual de perda anual em relação à retrorrefletividade inicial, contudo a maior porcentagem dos modelos (75%) apresentaram uma perda anual entre 0% e 5% em relação à sua medida inicial. Além disso, analisou-se o tempo em que os modelos apresentavam retrorrefletividade abaixo dos parâmetros brasileiros e norte-americanos mínimos finais. Para os requisitos brasileiros, a maior frequência de falha ficou entre os intervalos de 0 a 15 anos de serviço; já para o norte-americano, foi de 5 a 20 anos de atividade. Foram condicionadas películas dos tipos III e X em uma câmara úmida, com objetivo de avaliar o comportamento delas em um ambiente com alta porcentagem de umidade. Com isso, verificou-se que as películas obtêm, em média, uma perda anual quanto à retrorrefletividade inicial de 11% sobre a retrorrefletividade inicial.

Palavras-chave: Sinalização vertical. Retrorrefletividade. Avaliação do desempenho.



# ABSTRACT

## PERFORMANCE STUDY OF RETROREFLECTIVITY EFFICIENCY OF RETROREFLECTIVE SHEETING USED IN TRAFFIC SIGN

AUTHOR: Rossano Streppel Vieira  
ADVISOR: Dr. Deividi da Silva Pereira

The good visibility of traffic signs is of essential importance so that drivers can perceive them and carry out the most appropriate actions for the safety of themselves and other drivers. However, it is sometimes possible to observe signs that, during the day, are visible and look good, but that, at night, their colors do not transmit the same information. One of the existing methods for estimating the ability of the retroreflective sheeting to be viewed at night is the retroreflective readings performed with portable measuring devices. This research aims to measure and analyze the results of retroreflectivity of sheetings used in traffic signs implemented in the experimental segment located in the city of Santa Maria/RS, in addition to evaluating, in the laboratory, the behavior of these retroreflective sheeting. The experimental segment has 24 signs in four different colors and three types of retroreflective sheeting, according to the NBR 14644 (2013) standard. A sign of the same color and of the same type was duplicated to observe the effect of dirt over time, since one was cleaned with water and neutral soap and the other was not. In the comparison between colors, types of sheeting and cleaning, it was found that, in relation to the loss of retroreflectance, only cleaning proved to be a statistically significant factor in the 75 months (6.27 years) of analysis. Based on the predictive models generated in this study for the sheeting exposed in the experimental segment, the set of sheetings without cleaning showed, on average, a loss of retroreflectance in relation to the initial measurement about 7 times greater than the set of sheetings that received regular cleaning. Regarding the correlation between the retroreflective performance of sheetings tested in an accelerated artificial aging equipment (Suntest XLS+) and field measurements, there was no exact correlation between the behavior of the two tests, since there was a distinct behavior between the measurements obtained field and those tested on the Suntest XLS+, for a 1.5-year boundary condition of accumulated radiation (300-800nm). However, in comparison, the correlation between the retroreflective measures and the accumulated radiation exposed sheetings in the Suntest XLS+ showed a greater correlation between these two variables than in the field. It was observed that meteorological phenomena, such as rainfall, were not shown to be significant factors in the cleaning of the retroreflective sheetings and, consequently, neither in the increase of the measured values of retroreflective. The temperature of the sheeting was shown to be influential on the retroreflectivity. Evaluating the sheetings exposed in the monitored segment during a day, it was verified, for a variation of 25°C in the temperature of the sheeting, that there was a change of 20% in the retroreflectivity of the types I and X and of 40% for the type III. Comparing the predictive models found in the literature with those generated in the experimental segment, it was not noticed a percentage of annual loss in relation to the initial retroreflectivity, however the highest percentage of the models (75%) presented an annual loss between 0% and 5% in relation to your initial measurement. In addition, the time during which the models presented retroreflectivity below the minimum Brazilian and North American parameters was analyzed. For Brazilian requirements, the highest frequency of failure was between 0 to 15 years of service; for the North American, it was 5 to 20 years of activity. Sheetings of types III and X were conditioned in a humid chamber, with the objective of evaluating their behavior in an environment with a high percentage of humidity. With that, it was found that the sheetings obtain, on average, an annual loss in terms of the initial retroreflectivity of 11% over the initial retroreflectivity.

Keywords: Traffic sign. Retroreflectivity. Performance evaluation.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Padrão predominante das placas de sinalização vertical de regulamentação, advertência e indicação.....	35
Figura 2 – Espectro eletromagnético .....	38
Figura 3 – Tipos de reflexão .....	39
Figura 4 – Conceitos básicos de iluminação.....	41
Figura 5 – Sistema CIE para medição de retrorrefletores.....	43
Figura 6 – Configuração coplanar do sistema CIE .....	44
Figura 7 – Ângulo de entrada .....	45
Figura 8 – Ângulo de entrada de $-4^{\circ}$ e $5^{\circ}$ .....	45
Figura 9 – Ângulo de observação .....	46
Figura 10 – Ângulo de observação de diferentes veículos .....	47
Figura 11 – Diferença entre faróis HID (2004) e tungstênio-halogênio.....	50
Figura 12 – Condição visual diurno e noturna de uma placa de sinalização teste....	52
Figura 18 – Cone de retrorrefletividade .....	60
Figura 13 – Microesferas de vidro fechada.....	66
Figura 14 – Microesferas de vidro encapsulada .....	66
Figura 15 – Microprismas metalizados .....	67
Figura 16 – Microprismas não metalizados .....	68
Figura 17 – Diagrama de cromaticidade CIE 1931 .....	71
Figura 19 – Espectro eletromagnético da radiação solar.....	86
Figura 20 – Fluxograma resumido das atividades do estudo.....	88
Figura 21 – Equipamento RetroSign GR3 .....	89
Figura 22 – Localização dos segmentos monitorados nos municípios de Santa Maria/RS.....	91
Figura 23 – Segmento com as 24 placas do segmento experimental .....	92
Figura 24 – Distância entre a estação do INMET e o segmento experimental .....	94
Figura 25 – Estação meteorológica automática de Santa Maria/RS.....	95
Figura 26 – Equipamento de referência para calibragem do Retrosign GR3.....	96
Figura 27 – Limpeza das placas de sinalização .....	98
Figura 28 – Câmara de condicionamento do equipamento UTM-25 e suporte espesso de ferro com amostras.....	101
Figura 29 – Películas implementadas na câmara úmida .....	102
Figura 30 – Placa com películas para exposição solar .....	104
Figura 31 – Películas retrorrefletivas introduzidas no Suntest XLS+ .....	105
Figura 32 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor vermelha do tipo I (NBR 14644) do segmento experimental .....	130
Figura 33 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor vermelha do tipo III (NBR 14644) do segmento experimental .....	130
Figura 34 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor vermelha do tipo X (NBR 14644) do segmento experimental .....	131
Figura 35 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor amarela do tipo I (NBR 14644) do segmento experimental .....	131
Figura 36 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor amarela do tipo III (NBR 14644) do segmento experimental .....	132
Figura 37 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor amarela do tipo X (NBR 14644) do segmento experimental.....	132

Figura 38 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor verde do tipo I (NBR 14644) do segmento experimental.....	133
Figura 39 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor verde do tipo III (NBR 14644) do segmento experimental.....	133
Figura 40 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor verde do tipo X (NBR 14644) do segmento experimental .....	134
Figura 41 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor branca do tipo I (NBR 14644) do segmento experimental.....	134
Figura 42 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor branca do tipo III (NBR 14644) do segmento experimental.....	135
Figura 43 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor branca do tipo X (NBR 14644) do segmento experimental .....	135
Figura 44 – Resultados das medidas de retrorrefletividade das películas de cor branca do tipo I ao longo de tempo com os modelos preditivos lineares .....	142
Figura 45 – Modelos lineares de todas as películas do segmento experimental até a última medida realizada .....	145
Figura 46 – Sujeira em películas brancas do segmento de Santa Maria/RS .....	148
Figura 47 – Distribuição do número de modelos preditivos que apresentam porcentagem de perda de desempenho retrorrefletivo anual dentro de diferentes intervalos de perda propostos (somente para os modelos deste estudo) .....	153
Figura 48 – Distribuição do número de modelos preditivos que apresentam porcentagem de perda de desempenho retrorrefletivo anual dentro de diferentes intervalos de perda propostos (somente para os modelos internacionais).....	153
Figura 49 – Distribuição do número de modelos preditivos que apresentam porcentagem de perda de desempenho retrorrefletivo anual dentro de diferentes intervalos de perda propostos (para todos os 59 modelos analisados).....	154
Figura 50 – Distribuição do número de modelos preditivos que se encontram dentro de diferentes intervalos propostos, em anos, do momento em que película apresenta falha da função retrorrefletiva da película para os parâmetros mínimos finais da norma brasileira e norte-americana.....	156
Figura 51 – Medidas realizadas antes e depois da limpeza para películas de cor vermelha que recebiam regularmente a limpeza bimestral no segmento experimental .....	159
Figura 52 – Medidas realizadas antes e depois da limpeza para películas de cor amarela que recebiam regularmente a limpeza bimestral no segmento experimental .....	160
Figura 53 – Medidas realizadas antes e depois da limpeza para películas de cor verde que recebiam regularmente a limpeza bimestral no segmento experimental	161
Figura 54 – Medidas realizadas antes e depois da limpeza para películas de cor branca que recebiam regularmente a limpeza bimestral no segmento experimental .....	162
Figura 55 – Influência do orvalho no segmento monitorado de Santa Maria/RS ....	164
Figura 56 – Medidas de retrorrefletividade antes e depois da limpeza das películas que usualmente não recebiam limpeza e das películas que recebiam a limpeza ...	167
Figura 57 – Medidas de retrorrefletividade média em função do tempo de exposição da película de cor amarela tipo I (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS...	170
Figura 58 – Medidas de retrorrefletividade média em função do tempo de exposição da película de cor amarela tipo III (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS.	171
Figura 59 – Medidas de retrorrefletividade média em função do tempo de exposição da película de cor amarela tipo X (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS .	171

Figura 60 – Desbotamento da cor vermelha de películas retrorrefletivas de diferentes placas de sinalização vertical localizadas em Santa Maria/RS.....	173
Figura 61 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor amarelo tipo I no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019) .....	177
Figura 62 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor amarelo tipo III no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019) .....	177
Figura 63 - Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor amarelo tipo X no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019) .....	178
Figura 64 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor amarelo tipo I no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019) .....	178
Figura 65 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor amarelo tipo III no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019) .....	179
Figura 66 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor amarelo tipo X no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019) .....	179
Figura 67 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor amarela tipo I (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019) .....	182
Figura 68 – Medida de retrorrefletividade média da película de cor amarela tipo III (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019) .....	183
Figura 69 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor amarela tipo X (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019) .....	183
Figura 70 – Resultados de perda/ganho de retrorrefletividade para a cor amarela de tipo I entre as diferentes datas.....	185
Figura 71 – Resultados de perda/ganho de retrorrefletividade para a cor amarela de tipo III entre as diferentes datas.....	186
Figura 72 – Resultados de perda/ganho de retrorrefletividade para a cor amarela de tipo X entre as diferentes datas .....	186
Figura 73 – Resultado de perda/ganho das medidas de retrorrefletividade de todas as três datas em relação à temperatura de referência (25°C) de tipo I (NBR14644) .....	187
Figura 74 – Resultado de perda/ganho das medidas de retrorrefletividade de todas as três datas em relação à temperatura de referência (25°C) de tipo III (NBR14644) .....	187
Figura 75 – Resultado de perda/ganho das medidas de retrorrefletividade de todas as três datas em relação à temperatura de referência (25°C) de tipo I (NBR14644) .....	188
Figura 76 - Resultado de perda/ganho das medidas de retrorrefletividade em relação à temperatura de referência (25°C) de tipo I (NBR14644) realizadas em laboratório .....	191
Figura 77 – Resultado de perda/ganho das medidas de retrorrefletividade em relação à temperatura de referência (25°C) de tipo III (NBR14644) realizadas em laboratório .....	191
Figura 78 – Resultado de perda/ganho das medidas de retrorrefletividade em relação à temperatura de referência (25°C) de tipo X (NBR14644) realizadas em laboratório .....	192

Figura 79 - Películas de tipo III (NBR 14644) expostas na câmara úmida após quatro anos e meio de condicionamento.....	197
Figura 80 – Películas de tipo X (NBR 14644) expostas na câmara úmida após quatro anos e meio de condicionamento.....	198
Figura 81 – Modelos lineares das películas ensaiadas no Suntest XLS+ e das expostas à intempéries ambientais entre o ponto inicial ao final de cada ensaio....	202
Figura 82 – Confronto entre as películas de cor vermelha novas (A) e as películas ensaiadas no Suntest XLS+ (B) para três os tipos de películas.....	206
Figura 83 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor vermelho tipo I no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019) .....	220
Figura 84 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor vermelho tipo III no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019) .....	220
Figura 85 - Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor vermelho tipo X no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019) .....	221
Figura 86 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor verde tipo I no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019)	221
Figura 87 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor verde tipo III no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019) .....	222
Figura 88 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor verde tipo X no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019) .....	222
Figura 89 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor branco tipo I no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019) .....	223
Figura 90 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor branco tipo III no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019) .....	223
Figura 91 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor branco tipo X no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019) .....	224
Figura 92 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor vermelho tipo I no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019) .....	224
Figura 93 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor vermelho tipo III no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019) .....	225
Figura 94 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor vermelho tipo X no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019) .....	225
Figura 95 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor verde tipo I no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019)	226
Figura 96 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor verde tipo III no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019) .....	226

Figura 97 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor verde tipo X no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019)	227
Figura 98 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor branco tipo I no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019)	227
Figura 99 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor branco tipo III no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019)	228
Figura 100 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor branco tipo III no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019)	228
Figura 101 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor vermelho tipo I (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019)	229
Figura 102 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor vermelho tipo III (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019)	229
Figura 103 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor vermelho tipo X (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019)	230
Figura 104 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor verde tipo I (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019)	230
Figura 105 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor verde tipo III (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019)	231
Figura 106 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor verde tipo X (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019)	231
Figura 107 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor branco tipo I (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019)	232
Figura 108 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor branco tipo III (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019)	232
Figura 109 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor branco tipo X (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019)	233



## LISTA DE TABELAS

Tabela 14 – Coeficiente mínimo inicial de retrorrefletividade das películas Tipo I (ASTM) .....	55
Tabela 15 – Coeficiente mínimo inicial de retrorrefletividade das películas Tipo IV (ASTM) .....	56
Tabela 16 – Coeficiente mínimo inicial de retrorrefletividade das películas Tipo XI (ASTM) .....	56
Tabela 17 – Níveis mínimos finais de retrorrefletividade de sinalização vertical solicitados pela FHWA (2009).....	57
Tabela 18 – Coeficiente mínimo inicial de retrorrefletividade das películas tipo I (ABNT).....	60
Tabela 19 – Coeficiente mínimo inicial de retrorrefletividade das películas tipo III (ABNT).....	61
Tabela 20 – Coeficiente mínimo inicial de retrorrefletividade das películas tipo X (ABNT).....	61
Tabela 21 – Requisitos mínimos iniciais correspondentes entre as normas NBR14644 (ABNT, 2013) e D4956 (ASTM, 2019).....	62
Tabela 22 – Coeficiente mínimo de retrorrefletividade da Classe RA1 (CEN) .....	63
Tabela 23 – Coeficiente mínimo de retrorrefletividade da Classe RA2 (CEN) .....	64
Tabela 1 – Películas indicadas para as classes de rodovias O, IA e IB em relação ao tipo de sinal, ao tipo de via e à sua localização segundo a norma NBR 14891 (2012) .....	69
Tabela 2 – Películas indicadas para as classes de rodovias II, III e IV em relação ao tipo de sinal, ao tipo de via e à sua localização segundo a norma NBR 14891 (2012) .....	69
Tabela 3 – Películas indicadas para as vias urbanas (ruas e avenidas acima de 80 km/h) em relação ao tipo de sinal, ao tipo de via e à sua localização segundo a norma NBR 14891 (2012).....	70
Tabela 4 – Películas indicadas para as vias urbanas (ruas e avenidas de até 80 km/h) em relação ao tipo de sinal, ao tipo de via e à sua localização segundo a norma NBR 14891 (2012).....	70
Tabela 5 – Coordenadas de cromaticidade (diurna) .....	72
Tabela 6 – Retrorrefletividade residual em função do tempo .....	73
Tabela 7 – Modelos desenvolvidos por Jenkins e Gennaoui (1990) .....	75
Tabela 8 – Modelos desenvolvidos por Black et al (1991) .....	76
Tabela 9 – Modelos desenvolvidos por Bischoff e Bullock (2002) .....	76
Tabela 10 – Modelos desenvolvidos por Wolshon <i>et al.</i> (2002) .....	77
Tabela 11 - Modelos desenvolvidos por Rasdorf et al. (2006) .....	78
Tabela 12 - Modelos desenvolvidos por Kipp e Fitch (2009).....	79
Tabela 13 - Modelos desenvolvidos por Carlson et al. (2012) .....	79
Tabela 24 – Parâmetros de desempenho em sinalização vertical pelo contrato da ViaSul .....	83
Tabela 25 – Proporções de radiação solar entre os três de intervalos de comprimento de onda.....	86
Tabela 26 – Caracterização da sequência das placas no segmento .....	92
Tabela 27 – Resumo dos valores mínimos iniciais de retrorrefletividade para as películas analisadas neste estudo segundo a NBR 14644 (2013).....	93
Tabela 28 – Disposição das placas na câmara úmida .....	103

Tabela 29 – Resumo das leituras de retrorrefletividade em cada campanha no segmento experimental para as películas de cor vermelha .....	108
Tabela 30 – Resumo das leituras de retrorrefletividade em cada campanha no segmento experimental para as películas de cor amarela .....	113
Tabela 31 – Resumo das leituras de retrorrefletividade em cada campanha no segmento experimental para as películas de cor verde .....	119
Tabela 32 – Resumo das leituras de retrorrefletividade em cada campanha no segmento experimental para as películas de cor branca .....	124
Tabela 33 – Resumo dos desvios padrões observados nas campanhas de medidas realizadas no segmento experimental .....	136
Tabela 34 – Resumo dos modelos preditivos e resultados da análise de variância (ANOVA) das regressões .....	140
Tabela 35 – Resultados da análise de variância (ANOVA).....	147
Tabela 36 – Resumo dos modelos internacionais utilizados nas análises entre os modelos deste estudo .....	151
Tabela 37 – Retrorrefletividade medida em relação ao efeito do orvalho .....	165
Tabela 38 – Resumo da análise dos resultados de retrorrefletividade média obtida no dia 26 de novembro de 2013 (início das medições) e no dia 1º de fevereiro de 2020 (últimas medidas realizadas neste estudo) .....	168
Tabela 39 – Correlações de Pearson entre os resultados de ganho/perda de retrorrefletividade e temperatura das leituras realizadas no segmento experimental .....	189
Tabela 40 - Correlações de Pearson entre os resultados de ganho/perda de retrorrefletividade e temperatura das leituras realizadas em laboratório .....	192
Tabela 41 - Modelos preditivos das películas condicionadas na câmara úmida.....	195
Tabela 42 – Resumo dos modelos preditivos e dos resultados da análise de variância (ANOVA) das regressões (Suntest XLS+).....	200
Tabela 43 – Resumo dos modelos preditivos e dos resultados da análise de variância (ANOVA) das regressões (Campo) .....	200
Tabela 44 – Perda/ganho de retrorrefletividade no instante em que atinge à radiação acumulada final em campo ( $4,82E+06$ kJ/m <sup>2</sup> para 300-800nm), em porcentagem, em relação a medida inicial de retrorrefletividade .....	203
Tabela 45 – Resumo dos valores da diferença absoluta entre a primeira e a última medida de retrorrefletividade média e desvio padrão médio de todas campanhas de leituras das películas ensaiadas no Suntest XLS+ e Campo. ....	204
Tabela 46 – Resumo dos resultados da correlação de Pearson entre as medidas de retrorrefletividade (cd/lx.m <sup>2</sup> ) e a radiação acumulada (kJ/m <sup>2</sup> ) para o espectro de onda entre 300-800 nm (Campo) .....	206
Tabela 47 – Resumo dos resultados da correlação de Pearson entre as medidas de retrorrefletividade (cd/lx.m <sup>2</sup> ) e a radiação acumulada (kJ/m <sup>2</sup> ) para o espectro de onda entre 300-800 nm (Suntest XLS+).....	207

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus Celsius
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ASTM	American Society for Testing and Materials
cd	Candela
CE	Commission European
CEN	Committe for Standardization
CIE	Commission on Illumination
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CREMA	Contratos de Restauração e Manutenção Rodoviária
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
E	Iluminância
ECOSUL	Empresa Concessionária de Rodovias do Sul
ETA	European Technical Approval
FHWA	Federal Highway Administration
GEPPASV	Grupo de Estudos em Pavimentação e Segurança Viária
h	Hora
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
L	Luminância
lm	Lúmen
LMCC	Laboratório de Materiais e Construção Civil
lx	Lux
m	Metro
nm	Nanômetro
NBR	Normas Brasileiras
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
MUTCD	Manual on Uniform Traffic Control Devices
PER	Programa De Exploração Da Rodovia
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
R <sub>A0</sub>	Retrorrefletividade Inicial
R <sub>A</sub>	Retrorrefletividade
R <sub>L</sub>	Coeficiente de Intensidade Luminosa
RS	Rio Grande do Sul
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>29</b>
1.1	OBJETIVO .....	31
1.1.1	Objetivo geral .....	31
1.1.2	Objetivos específicos.....	31
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	32
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>33</b>
2.1	SINALIZAÇÃO VIÁRIA .....	33
2.1.1	Sinalização vertical .....	34
2.2	RETORREFLETIVIDADE NA SINALIZAÇÃO VERTICAL.....	37
2.2.1	Retrorrefletividade: conceitos básicos .....	37
2.2.2	Termos e definições.....	40
2.2.3	Estudos relacionados à retrorrefletividade.....	48
2.2.4	Parâmetros normativos e requisitos mínimos nos Estados Unidos da América .....	53
2.2.5	Parâmetros normativos e requisitos mínimos no Brasil .....	58
2.2.6	Parâmetros normativos e requisitos mínimos na Europa .....	62
2.2.7	Fatores que influenciam na retrorrefletividade.....	64
2.2.8	Modelos preditivos de retrorrefletividade de sinalização vertical .....	74
2.3	LIMITES FINAIS DE RETORREFLETIVIDADE APLICADOS NO BRASIL	80
2.3.1	ANTT – 1º etapa de concessões .....	80
2.3.2	ANTT – 2º etapa de concessões .....	81
2.3.3	ANTT – 3º etapa de concessões .....	82
2.3.4	ANTT – 4º etapa de concessões .....	82
2.3.5	BR-LEGAL .....	83
2.3.6	Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP) .....	84
2.4	RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL .....	85
<b>3</b>	<b>MÉTODOS E TÉCNICAS.....</b>	<b>87</b>
3.1	PLANEJAMENTO DA PESQUISA.....	87
3.2	EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO .....	88
3.3	DESCRIÇÃO DO SEGMENTO EXPERIMENTAL .....	89
3.3.1	Segmento experimental em Santa Maria/RS.....	89
3.4	DADOS METEOROLÓGICOS.....	93
3.5	AVALIAÇÃO DE RETORREFLETIVIDADE.....	95
3.5.1	Avaliação da retrorrefletividade ao longo do tempo.....	97
3.5.2	Avaliação da retrorrefletividade em relação à precipitação pluviométrica ....	98
3.5.3	Avaliação da retrorrefletividade em relação à temperatura da película .....	99
3.5.4	Avaliação da retrorrefletividade das películas condicionadas na câmara úmida.....	101
3.5.5	Avaliação da retrorrefletividade em relação à radiação acumulada.....	103
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>107</b>
4.1	SEGMENTO EXPERIMENTAL.....	107
4.1.1	Apresentação dos resultados de retrorrefletividade das películas expostas no segmento experimental .....	107
4.1.2	Modelos preditivos de retrorrefletividade dos dados do segmento experimental .....	138

4.1.3	Avaliação do desempenho retrorrefletivo ao longo do tempo das películas expostas no segmento experimental.....	143
4.1.4	Análise de variância entre as porcentagens de perdas de retrorrefletividade em relação à medida inicial.....	146
4.1.5	Avaliação pontual das películas sujas do segmento experimental.....	148
4.1.6	Comparação dos modelos propostos neste estudo com os encontrados na literatura internacional.....	150
4.1.7	Efeito do orvalho sobre as películas retrorrefletivas.....	163
4.1.8	Efeito da limpeza sobre a retrorrefletividade das películas que não recebiam limpeza regular.....	167
4.1.9	Avaliação da retrorrefletividade em relação à precipitação pluviométrica no segmento experimental.....	174
4.1.10	Avaliação da retrorrefletividade em relação à temperatura da película no segmento experimental.....	181
4.2	AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA EM LABORATÓRIO.....	190
4.3	AVALIAÇÃO DA PERDA DE DESEMPENHO RETRORREFLETIVO DAS PELÍCULAS CONDICIONADAS NA CÂMARA ÚMIDA.....	194
4.4	ENSAIO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO <i>VERSUS</i> MEDIDAS EM CAMPO.....	198
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>208</b>
5.1	CONCLUSÕES.....	208
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	211
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>213</b>
	<b>APÊNDICE A – RESULTADOS DE RETRORREFLETIVIDADE DAS “DATA 1”, “DATA 2” E “DATA3”.....</b>	<b>220</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história, os sinais são utilizados como um importante e imprescindível meio de comunicação entre os seres humanos. Meio de comunicação desenvolvido para transmitir mensagens, os sinais são vistos com diferentes finalidades, reproduzidas durante a trajetória da sociedade até os tempos atuais. As pinturas rupestres, que retratam a vida das civilizações pré-históricas, foram um dos primeiros meios de comunicação, e acredita-se que elas tenham surgido antes mesmo da linguagem falada (LAINIER; FORTES, 2009). Durante o avanço da sociedade, essas pinturas passaram a ser utilizadas para marcações viárias, e um dos primeiros usos com essa finalidade foi feita pelos romanos, que utilizavam colunas de pedra – chamadas de marcos miliários – para grafar algumas sinalizações, indicando distâncias ou direções (GIL, 1995). Atualmente, essa tecnologia foi aprimorada com diferentes tipos de sinalizações e dispositivos usados para o controle de tráfego, com vistas a captar a atenção e a confiança do motorista, possibilitando a ele um tempo de resposta apropriado (DNIT, 2010)

Entretanto, habitualmente, quando se fala em sinalização rodoviária, automaticamente se conecta esse tema a acidentes de trânsito, uma vez que, no território brasileiro, esses números são altos em comparação a outros países. O relatório da Organização Mundial da Saúde (2018) apresentou os números de mortes no trânsito a cada cem mil habitantes em vários lugares do mundo. O Brasil aponta 19,7 mortes no trânsito para cada cem mil habitantes, número alto se comparado a países como Dinamarca (valor 4) ou mesmo ao Canadá e aos Estados Unidos da América (valores de 5,8 e 12,4, respectivamente). Ou seja, no Brasil, encontram-se taxas de índices de mortalidade no trânsito muito superiores aos de países desenvolvidos. Esses acidentes geram prejuízos vultosos ao país. Entre 2007 e 2019, foram registrados 1.789.036 acidentes de trânsito e 94.081 mortes. A estimativa média anual é que tais eventos acarretam o custo de dez bilhões de reais em acidentes (CNT, 2020).

Conforme a CNT (2018), os maiores índices de morte por acidentes em 2017 estão em vias identificadas com avaliação negativa (“Regular”, “Ruim” e “Péssimo”) em relação à sinalização. Dados da própria pesquisa demonstram que vias com sinalização consideradas “Ruim” e “Péssima” são exatamente as que possuem maior índice de mortes (cerca de 13 mortes por 100 acidentes). Por outro lado, o menor índice de mortes registrado (cerca de 8,5 mortes por 100 acidentes) está em vias com uma

melhor avaliação, considerada “Ótimo”, sendo 34,6% menor do que as anteriores. Tendo isso em vista, os resultados ressaltam a importância de investimentos em sinalização, além de outros aspectos relacionados à educação para o trânsito e a medidas de engenharia de tráfego.

Porém, não é possível correlacionar integralmente os acidentes de trânsito às sinalizações por haver outros fatores motivadores disso, como defeitos no pavimento, falta de atenção do condutor, entre outros. Fujii (2004) afirma que, mesmo obedecendo aos padrões comuns da sinalização, não se pode garantir totalmente a segurança de trânsito. A autora ressalta, ainda, que manuais e técnicas abrem muito espaço a interpretações diversas feitas pelos projetistas.

Portanto, mesmo que não se possa atrelar, na sua totalidade, acidentes de trânsito ao uso da sinalização vertical precária, o seu uso tem como objetivo orientar o motorista para que ele adote medidas mais seguras durante sua condução. Segundo o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito (CTB, 2007), as placas de sinalização “têm a finalidade de fornecer informações que permitam aos usuários das vias adotar comportamentos adequados, de modo a aumentar a segurança, ordenar os fluxos de tráfego e orientar os usuários da via”.

Para que a sinalização vertical tenha total eficiência no seu uso, alguns princípios básicos devem ser assegurados na sua elaboração, como legalidade, suficiência, padronização, clareza, precisão, confiabilidade, visibilidade, legibilidade, manutenção e conservação (CTB, 2007). Assim, uma das maneiras de avaliar o desempenho das placas de sinalização para que esses princípios básicos sejam atendidos com maior rendimento é a partir de medidas de retrorrefletividade.

A retrorrefletividade, tanto na sinalização vertical quanto na horizontal, serve para avaliar a quantidade de luz que retorna ao condutor a partir de uma fonte luminosa até a vista do observador. Segundo Ai e Tsai (2016), as placas de sinalização devem ser projetadas para que reflitam, durante a noite, apenas com a iluminação dos faróis dos veículos, para que, assim, os motoristas possam ler informações vitais da estrada sem outra iluminação externa.

De acordo com a CNT (2018), estatísticas demonstram que, à noite, rodovias brasileiras possuem uma taxa de colisão fatal duas vezes maior do que durante a luz do dia. Demonstra-se, assim, a importância de que, à noite, as placas sejam retrorrefletivas, pois nesse turno essa característica proporciona, ao condutor, o único meio para que as sinalizações sejam visíveis e exerçam sua função.

Para com cumprir o objetivo geral, o Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV) vem gerando, desde 2013, um banco de dados de medidas de retrorrefletividade de películas de sinalização vertical colocadas em placas instaladas em segmento experimental. Esta pesquisa tem como o propósito analisar o banco de dados adquirido desde o início dos ensaios, e investigar o desempenho retrorrefletivo de placas de sinalização vertical expostas a diferentes situações experimentais ao longo do tempo, utilizando retrorrefletômetro portátil para medição. Analisa-se, assim, a perda da eficiência de películas retrorrefletivas de diferentes tipos, cores e submetidas ou não à limpeza, frente ao seu desempenho retrorrefletivo. Além disso, para que sejam analisados fatores deteriorantes em particular, como umidade e irradiação solar, amostras reduzidas foram submetidas à câmara úmida e ao Suntest XLS+ (ensaio acelerado de irradiação solar).

## 1.1 OBJETIVO

A seguir, serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho.

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho de películas retrorrefletivas empregadas em sinalização vertical, com o intuito de analisar o comportamento de diferentes tipos e cores em relação à perda de qualidade retrorrefletiva ao longo do tempo.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Para a complementação do objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Analisar estatisticamente se há diferença de comportamento em relação ao desempenho da película frente a fatores como a cor, o tipo de película e a limpeza das placas;
- b) Verificar se, ao fim do estudo, as películas analisadas se encontram dentro dos limites preconizados pelas normas nacionais e internacionais;

- c) Avaliar se a limpeza das placas tem influência nos valores de retrorrefletividade ao longo do tempo;
- d) Gerar modelos preditivos de retrorrefletividade em função do tempo das películas retrorrefletivas expostas ao ambiente situado no segmento experimental de Santa Maria/RS;
- e) Comparar os modelos de desempenho gerados nesta pesquisa com os encontrados na literatura mundial, com intuito de verificar o ano de falha observado por outros autores;
- f) Simular a exposição aos raios ultravioletas nas películas em laboratório por meio do equipamento Suntest XLS+;
- g) Avaliar o desempenho das películas mediante sua exposição à umidade em laboratório por meio do acondicionamento das amostras em câmara úmida;
- h) Analisar se a temperatura influencia, significativamente, nos valores de retrorrefletividade.
- i) Verificar se a precipitação pluviométrica influencia, significativamente, nos valores de retrorrefletividade.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está dividido em introdução e objetivos, revisão da literatura, métodos e técnicas e resultados e análises. O primeiro item traz um resumido entendimento do assunto e uma breve apresentação do trabalho desenvolvido, conjuntamente com os objetivos da pesquisa. A revisão da literatura apresenta estudos pertinentes à área, os quais trazem fundamentos utilizados nesta pesquisa, assim como as normas e os parâmetros mínimos iniciais e finais aceitos nacionalmente e internacionalmente. Nos métodos e técnicas, explica-se, pontualmente, como cada processo da presente pesquisa foi efetuado; além disso, mostram-se propriedades que se pretende avaliar. Nos resultados e análises, os valores medidos durante a pesquisa são apresentados, sendo realizada uma avaliação estatística e gráfica dos resultados obtidos.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, será apresentada uma revisão bibliográfica sobre a sinalização viária vertical. Serão exibidos estudos relacionados a essa área e alguns conceitos e definições. Ademais, serão explanados as regularizações e os requisitos encontrados nas normas brasileiras e americanas, juntamente com o processo de avaliação visto em norma.

### 2.1 SINALIZAÇÃO VIÁRIA

A sinalização viária é um sistema de comunicação empregado para transmitir mensagens que instruem o trânsito, sendo composta por símbolos, marcas e sinais definidos por normas exigidas por um código de trânsito (FUJII, 2017). Conforme o Código de Trânsito Brasileiro (1997), sinalização é definida como o conjunto de sinais de trânsito e dispositivos de segurança dispostos na via pública com o objetivo de garantir sua utilização adequada, viabilizando uma melhor fluidez no trânsito e uma maior proteção dos veículos e pedestres que nela circulam.

Segundo Fontana (2005), a sinalização de trânsito tem como objetivo organizar o fluxo de veículos e pedestres nas vias públicas por meio de informações que ordenem a movimentação do tráfego, tendo em vista a segurança, a fluidez e o conforto dos usuários. Dessa maneira, a sinalização é importante para: regulamentar as obrigações, as limitações, as proibições ou as restrições que governam o uso da via; advertir os condutores sobre situações de perigo existentes; e indicar o posicionamento correto dos veículos e as direções a serem seguidas para chegar aos locais de interesse.

De acordo com Castilho (2009), na concepção e na implantação da sinalização de trânsito, deve ser de fundamental interesse que o usuário na via perceba a sinalização, de modo a garantir a real eficácia dos sinais. Para isso, os sinais de trânsito devem assegurar:

- a) Legalidade: seguir o Código de Trânsito Brasileiro (CTB) e a legislação complementar;
- b) Suficiência: ter quantidade de sinalização que seja necessária à fácil percepção da informação do que realmente é importante;

- c) Padronização: seguir um padrão regularmente estabelecido, seguindo igualmente para situações de mesmo critério.
- d) Clareza: informar mensagens objetivas de fácil compreensão;
- e) Precisão e Confiabilidade: corresponder à situação existente, ter credibilidade;
- f) Conspicuidade: conseguir chamar a atenção no ambiente em que está inserida;
- g) Visibilidade e Legibilidade: estar no campo de visão em posição adequada, a fim de ser lida em tempo hábil para a tomada de decisão;
- h) Manutenção e Conservação: estar permanentemente limpa, conservada, fixa e livre de interferência, para ser visível.

Para Teixeira (2017), a sinalização rodoviária é componente fundamental de qualquer rede viária por desempenhar um papel preponderante de ligação entre a via e os seus usuários, proporcionando-lhes uma circulação mais segura e fluida. Documentos técnicos são usados para esses fins para uniformizar e padronizar o emprego da sinalização em vias nacionais. No Brasil, é utilizado o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volumes I, II, III, IV, V e VII (CONTRAN, 2007a; CONTRAN, 2007b; CONTRAN, 2014a; CONTRAN, 2014b; CONTRAN, 2017).

De acordo com o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito (CONTRAN, 2007), a sinalização viária é constituída pelos seguintes subsistemas: sinalização vertical (regulamentação, advertência e indicação), sinalização horizontal, sinalização semaforizada e sinalização de obras e dispositivos auxiliares.

O próximo item aborda a sinalização vertical, a qual é foco do presente trabalho, visto a importância da compreensão dos estudos envolvendo o respectivo trabalho.

### **2.1.1 Sinalização vertical**

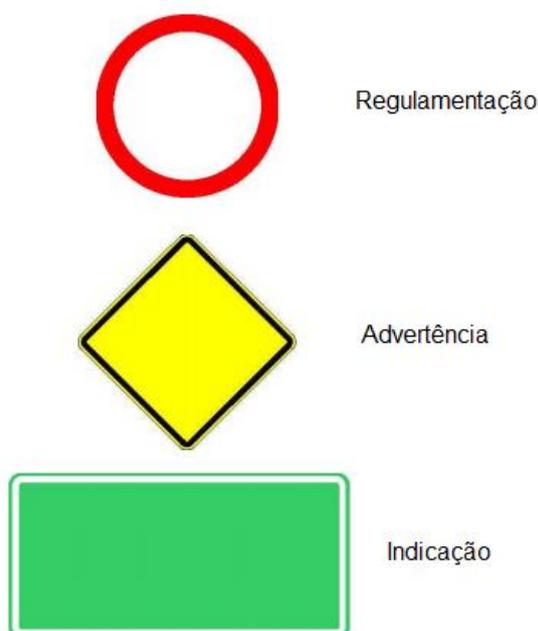
A sinalização vertical é um subsistema da sinalização viária que, segundo o Código de Trânsito Brasileiro (2007, p. 21),

...se utiliza de sinais apostos sobre placas fixadas na posição vertical, ao lado ou suspensas sobre a pista, transmitindo mensagens de caráter permanente ou, eventualmente, variável, mediante símbolos e/ou legendas preestabelecidas e legalmente instituídas.

Os sinais verticais têm como objetivo informar os usuários sobre como se comportar na via, permitindo que eles decidam, de modo seguro, como ordenar e orientar ao fluxo do tráfego (CTB, 2007).

Segundo o DNIT (2010), as placas de sinalização são divididas em três tipos: regulamentação, advertência e indicação. A sinalização vertical de regulamentação tem como objetivo de uso transmitir aos condutores condições, proibições, obrigações ou restrições no uso das vias urbanas e rurais. A sinalização vertical de advertência é utilizada para chamar atenção de potenciais riscos existentes na via ou na proximidade, como curvas acentuadas, escolas, etc. A sinalização vertical de indicação tem com intuito principal orientar os motoristas em seu deslocamento, fornecendo a eles direções, distâncias e sentidos para que percorram sua trajetória. Os sinais têm formas e cores padronizadas para que o condutor possa associar, rapidamente, o tipo de placa à mensagem. A Figura 1 ilustra o padrão predominante das placas de regulamentação, advertência e indicação.

Figura 1 – Padrão predominante das placas de sinalização vertical de regulamentação, advertência e indicação



Fonte: Adaptado de DNIT (2010).

Para Taori e McGee (1998), os sinais verticais de trânsito são um dos componentes mais importantes de uma estrutura rodoviária. São meios para comunicar ao

usuário da rodovia sobre regulamentos, avisos, orientação direcional e outras informações apropriadas. Quanto melhores forem as sinalizações verticais, melhor será a segurança, acarretando em um sistema de transporte mais eficiente.

As sinalizações verticais são normalmente posicionadas à direita da via de pista simples, podendo também ser aéreas (pórticos) ou até mesmo estar à esquerda da via em casos de segmentos com duas ou mais faixas, por sentido de fluxo (pista dupla) (DNIT, 2010). De acordo com Costa *et al.* (2014), os sinais de trânsito verticais têm a vantagem de serem elevados acima da faixa de rodagem, possibilitando, assim, melhor visibilidade.

Também é importante que não haja superposições de informações nas placas de sinalização vertical. Motoristas que se deparam com sinalização com mais informações do que conseguem processar podem desacelerar severamente, dirigir muito devagar, fazer manobras atrasadas ou erradas, ignorar informações importantes, não considerar o tráfego ou tirar os olhos da estrada por muito tempo (XU *et al.*, 2011)

A dimensão da placa é regulamentada por norma, na qual são especificadas as dimensões mínimas condicionadas pelo tipo de via (urbana, rural, etc.). Atribui-se ao projetista planejar as distâncias de percepção, reação e manobra do motorista, dependendo de fatores como velocidade e tipo da via (CONTRAN, 2017). É salutar considerar que maior tempo de pré-visualização das sinalizações proporcionam maior conforto ao condutor para a compreensão e a tomada de decisão (FUJII, 2017)

Ainda que existam métodos diversos para maior percepção da sinalização vertical, um estudo recente mostra que a atenção dada a elas é ineficiente. Pesquisa realizada por Costa *et al.* (2014) testou 22 participantes, entre eles 15 homens, de idade entre 22 e 27 anos, e 7 mulheres, com idade entre 17 e 46 anos. Eles deveriam dirigir por uma mesma rota de 8,34 km para avaliar a fixação visual. Ao final da rota, cada participante listava em um mapa com cada sinalização vertical que recordasse. A rota continha de 75 placas de sinalização vertical. Verificou-se que apenas 6,66% das sinalizações eram lembradas pelos motoristas. Com auxílio de óculos com tecnologia de identificação da movimentação dos olhos, constatou-se que somente 25,06% das placas eram visualizadas. Os resultados demonstram um pouco da falta de atenção existente pelos motoristas e um comportamento automático do motorista em focar sua visão preferencialmente no meio da pista.

## 2.2 RETRORREFLETIVIDADE NA SINALIZAÇÃO VERTICAL

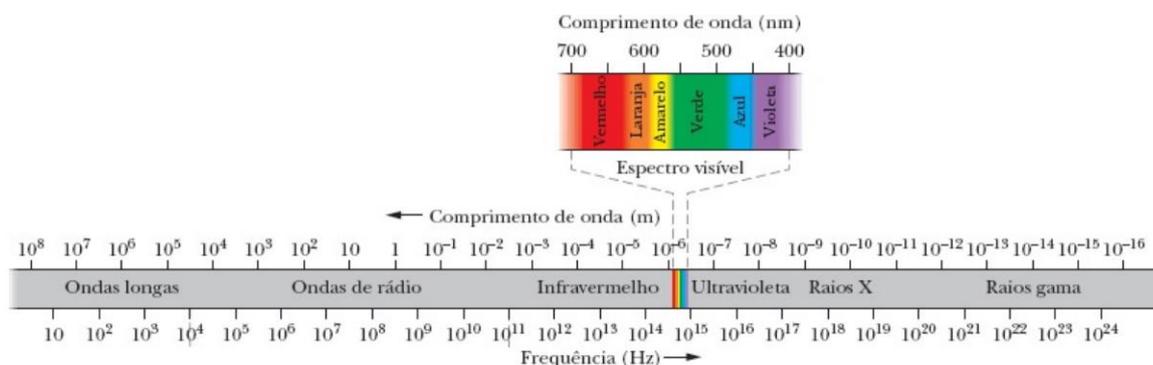
Neste tópico, serão apresentados fundamentos sobre a retrorrefletividade na sinalização vertical, abordando, inicialmente, os conceitos básicos físicos sobre o assunto para a compreensão do estudo. Posteriormente, será discorrido sobre os termos e as definições da retrorrefletividade, com o intuito de explicar os ângulos e as unidades usadas. Em seguida, será abordado o histórico do estudo da retrorrefletividade juntamente com os artigos mais atuais sobre o assunto, tentando expor uma breve trajetória das pesquisas correspondentes ao tema. Ao final, serão explanados os fatores intervenientes nas medidas de retrorrefletividade e os parâmetros normativos revisitados nas normas brasileira, americana e europeia.

### 2.2.1 Retrorrefletividade: conceitos básicos

A luz ou raio luminoso, de acordo com a ótica, é uma onda eletromagnética. Contudo, na física moderna, foi observado que a luz, a partir de evidências do efeito fotoelétrico, possui características também corpusculares, o que é chamado de dualidade onda-corpúsculo. Em um meio homogêneo, como o ar dentro de um compartimento, a luz se propaga em linha reta, diferentemente das ondas sonoras, as quais não têm uma propagação retilínea. Assim, por exemplo, uma pessoa que conversa dentro de uma sala com a porta entreaberta pode ser ouvida sua voz mesmo estando fora da linha visão, o que não acontece com o feixe luminoso (NUSSENZVEIG, 2014).

As ondas eletromagnéticas possuem um largo espectro (Figura 2). Algumas são mais conhecidas, como a luz visível, os raios infravermelhos e ultravioletas. A luz visível é aquela cujas ondas magnéticas são captadas pela sensibilidade do olho humano. A escala de comprimento de onda para o espectro visível não é bem definida, com limites entre, aproximadamente, 430 a 690 nanômetros (HALLIDAY *et al*, 2010).

Figura 2 – Espectro eletromagnético



Fonte: Adaptado de Halliday et al (2010).

A luz, ao se afastar de uma fonte, propaga-se em linha reta. Contudo, se essa propagação estiver em contato com uma superfície, podem ocorrer dois efeitos ao feixe de luz: ele pode ser refletido pela superfície ou sofrer a refração. A seguir, serão explicados os conceitos dos dois efeitos, para, assim, haver compreensão do modo como ocorre a retrorrefletividade.

### 2.2.1.1 Refração

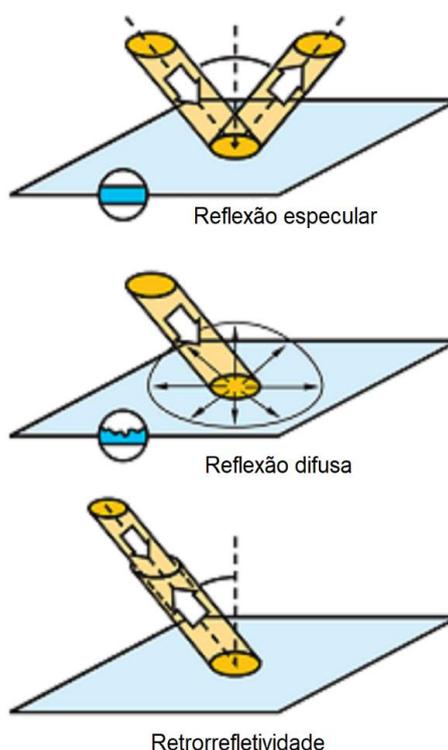
A refração é um efeito que ocorre quando um feixe de luz incide entre dois meios diferentes, sendo eles homogêneos e transparentes, alterando a velocidade e a direção do feixe de luz, como, por exemplo, a passagem de luz entre água e ar (TIPLER e MOSCA, 2010).

Ainda, segundo os autores, essa mudança da velocidade de propagação da luz é dependente do meio em que se encontra o feixe. Essa propriedade ótica é caracterizada pelo índice de refração ( $n$ ), sendo ele a proporção entre a velocidade da luz no vácuo (igual a  $3 \times 10^8$  m/s) e a velocidade da luz no meio considerado. Quanto maior for o índice de refração, maior será a resistência da luz a se propagar. Materiais mais comuns como ar, água e vidro têm, respectivamente, o índice de refração nos valores de 1,0003, 1,33 e entre 1,50 e 1,66, dependendo do vidro.

### 2.2.1.2 Reflexão

A reflexão é um fenômeno óptico em que um feixe de luz retorna ao meio de origem ao incidir sobre uma superfície. Em virtude desse fenômeno, é possível enxergar os objetos ao nosso redor, pois é a reflexão dos feixes de luz que permite aos olhos captá-los e, assim, propiciar a visão (YOUNG e FREEDMAN, 2016). Dependendo da superfície em que a luz reflita, a reflexão pode ser classificada em três tipos: reflexão especular, reflexão difusa e retrorrefletividade (Figura 3).

Figura 3 – Tipos de reflexão



Fonte: Adaptado de Austin e Schultz (2002).

A reflexão especular é quando a luz incide em uma superfície lisa, havendo apenas um ângulo de reflexão. A reflexão difusa acontece quando a superfície é rugosa; logo, os raios são espalhados em várias direções, distinguindo o ângulo de reflexão entre eles. Já a retrorrefletividade ocorre quando, a partir da manipulação de materiais como microesferas de vidro ou mesmo microprismas, a superfície de contato

retorna a luz à fonte, sendo observada nas sinalizações viárias (AUSTIN; SCHULTZ, 2002).

## 2.2.2 Termos e definições

Para o melhor entendimento do modo como a retrorrefletividade é medida e do princípio empregado pelo reflectômetro portátil, são importantes algumas definições, como retrorrefletividade, o ângulo de entrada, o ângulo de observação, entre outros termos.

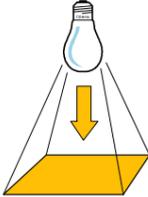
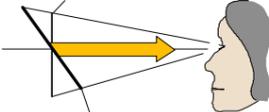
### 2.2.2.1 Retrorrefletividade ( $R_A$ )

Para melhor compreensão do trabalho, alguns conceitos básicos de iluminação precisam ser apresentados. A unidade utilizada para medir a retrorrefletividade ( $R_A$ ) é candelas por lux por metro quadrado, sendo ela a razão entre coeficiente de intensidade luminoso ( $R_L$ ) em relação a uma superfície retrorrefletora plana e sua área. Por sua vez, o coeficiente de intensidade luminosa ( $R_L$ ) é a razão entre a luminância ( $L$ ) e a iluminância ( $E$ ) (ASTM, 2017).

A luminância consiste na intensidade luminosa que é refletida de uma área iluminada em direção ao observador, expressa pelo sistema internacional de unidades como candela por metro quadrado ( $cd/m^2$ ). A iluminância é a medida da concentração de fluxo luminoso que incide na direção perpendicular a uma superfície, expressa pela unidade lux (CREDER, 2010).

A Figura 4 ilustra os conceitos básicos, mostrando, além disso, o fluxo luminoso de unidade pelo sistema internacional (SI) designado lúmen (lm), que é o valor total emitido por uma fonte luminosa em todas as direções. Já a intensidade luminosa é a medida de energia irradiada em uma direção específica (NOVICKI E MARTINEZ, 2008).

Figura 4 – Conceitos básicos de iluminação

	
Fluxo Luminoso (lm)	Intensidade Luminosa (cd)
	
Iluminância ( $\text{lx}=\text{lm}/\text{m}^2$ )	Luminância ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )

Fonte: Adaptado de Novicki e Martinez (2008).

#### 2.2.2.2 Sistema geométrico para medição de retrorrefletores

Segundo Venable e Johnson (1980), retrorrefletores foram empregados durante muitos anos para aplicações automotivas e rodoviárias, entre outros usos. Durante essa época, foram desenvolvidos, de forma independente, vários sistemas de coordenadas geométricas para lidar adequadamente com esse aspecto bastante especial de retrorrefletância. Logo, com o aumento do comércio internacional de dispositivos de leituras de retrorrefletividade e de materiais retrorrefletivos, houve diferentes especificações e regulamentações de uma variedade de sistemas de coordenadas, tornando as medições bastante confusas.

Ainda de acordo com os autores, havia três comitês separados na *International Commission on Illumination* (CIE) – organização internacional que estuda iluminação, luz e cor – que estavam desenvolvendo três sistemas de coordenadas diferentes. Assim, no início dos anos de 1970, foi criado um grupo de harmonização no intuito de resolver esse problema. O grupo de harmonização remeteu três diferentes sistemas de coordenadas, mas todos eram relativamente simples e nenhum era mais claro que o outro. Então, em 1977, foi designada a responsabilidade ao Comitê CIE 2.3, que trata de propriedades ópticas dos materiais, lidando com regulamentações da

retrorefletância. Com isso, foi criado, dentro desse comitê, uma pequena equipe para elaborar um sistema de coordenadas único. A equipe foi orientada por quatro objetivos principais:

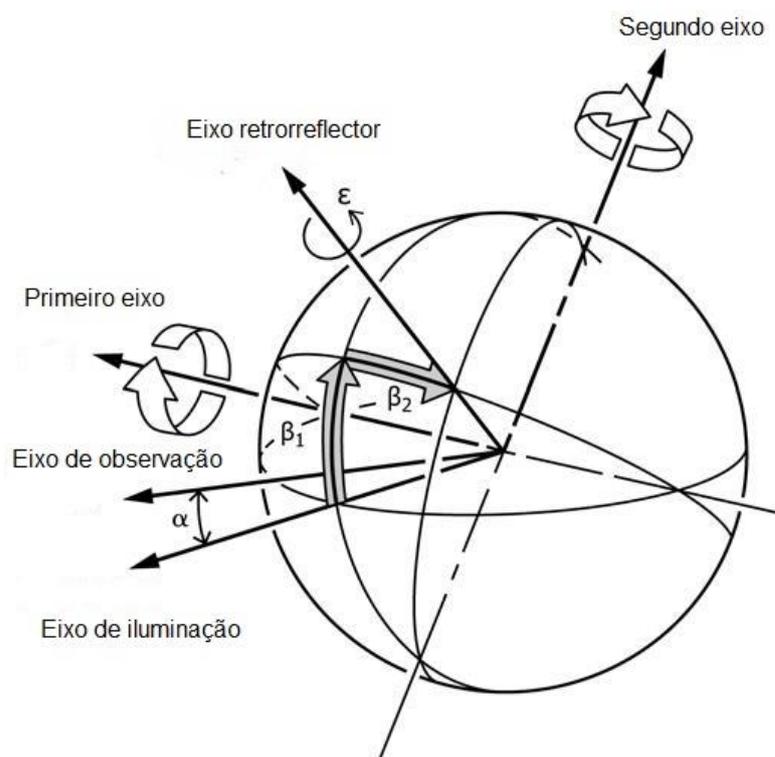
- a) Um sistema de coordenadas único deveria ser recomendado para uso com retrorefletividade;
- b) A geometria, os ângulos e os limites dos ângulos devem ser completos e não redundante, ou seja, deve haver apenas uma maneira de descrever cada configuração possível de fonte, refletor e receptor;
- c) As terminologias devem ser tão consistentes quanto possível juntamente com seu uso presente, mas somente quando tal uso é livre de má interpretação;
- d) O sistema deve ser simples e prático para ser utilizado com os aparelhos existentes para medir retrorefletividade e adaptar as novas especificações e os métodos de teste ao sistema, no qual deve-se exigir apenas pequenas alterações, principalmente na nomenclatura e no sinal algébrico.

A equipe revisou o trabalho feito pelo grupo de harmonização e desenvolveu o sistema de coordenadas único, utilizando os melhores recursos criados de cada um dos três sistemas propostos. Os equipamentos foram considerados em um grande número de laboratórios, sendo verificado que a grande maioria deles possuía o mesmo arranjo de eixos para orientação da amostra, e os eixos do novo sistema foram elaborados para corresponder com os mesmos. A escolha de sinais algébricos tinha como consideração principal evitar confusão para a pessoa que faz as medições, assim como evitar grandes mudanças nas especificações e nos métodos de teste utilizados em todo o mundo. Nomenclatura como horizontal, vertical, esquerda, direita, para cima e para baixo foi evitada, uma vez que o equipamento de teste é orientado de muitas maneiras dentro de um laboratório, e esses termos tendem a causar confusão (VENABLE; JOHNSON, 1980).

A Figura 5 apresenta o sistema CIE para medição de retrorefletores desenvolvido pela organização e ilustra algumas definições fundamentais para o entendimento da medição da retrorefletividade. O eixo de observação é a linha entre o centro do retrorefletor e ponto de observação, já o eixo de iluminação é a linha entre o centro do retrorefletor e ponto de fonte de luz. A Figura 5 ilustra as coordenadas

básicas para a medição da retrorrefletividade. Todas as direções mostradas na figura representam valores positivos (ASTM, 2009).

Figura 5 – Sistema CIE para medição de retrorrefletores



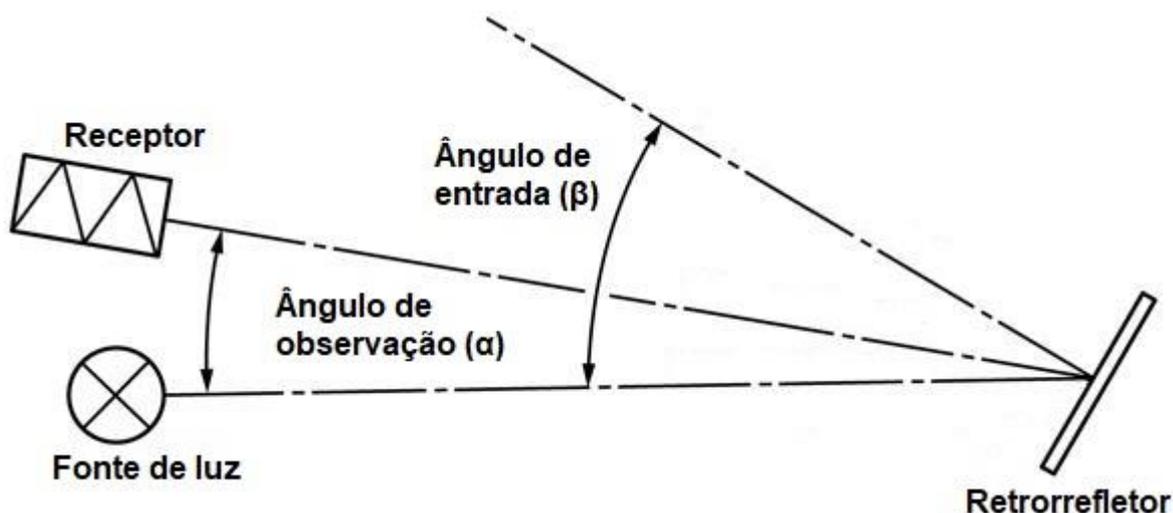
Fonte: Adaptado de ASTM (2009).

Conforme a ASTM (2009), as coordenadas da Figura 5 são utilizadas de forma adaptada para os equipamentos de medição de retrorrefletividade, a fim de que seja possível avaliar as sinalizações verticais a partir de um aparelho portátil. Nos equipamentos portáteis, é utilizada a configuração coplanar para as medidas de retrorrefletividade. Dessa forma, os ângulos de entrada e observação são medidos em um mesmo plano.

A Figura 6 demonstra como é configurada a geometria coplanar do sistema CIE; sendo assim, a fonte de luz e o receptor que calcula o quanto de luz retorna estão situados em um mesmo plano de medição. Logo, o instrumento é calibrado em laboratório para que simule o padrão estipulado por norma, na qual, o ângulo  $\beta_2$ , atribui-se o valor igual a zero e, conseqüentemente, o valor  $\beta$  assume o valor de  $\beta_1$ ,

sendo positivo no sentido anti-horário do eixo do retrorrefletor, como é observado na Figura 5.

Figura 6 – Configuração coplanar do sistema CIE



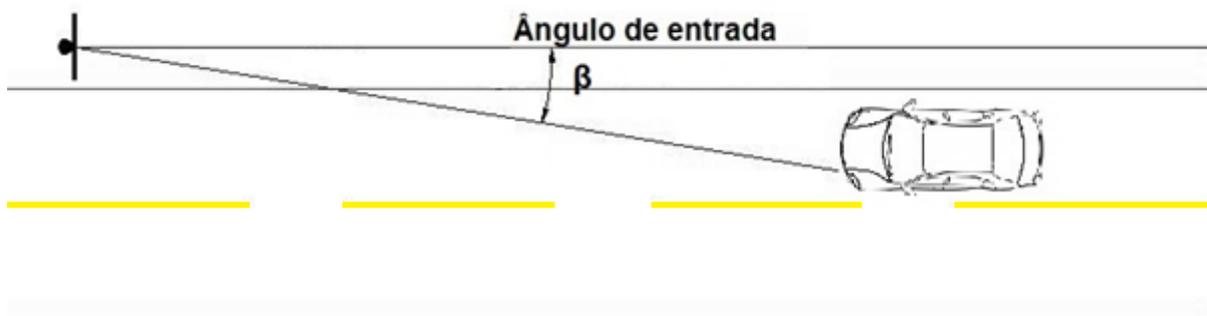
Fonte: Adaptado de ASTM (2009).

A geometria de simulação padronizada pela ASTM (2016) simula certa condição relativa em campo. Conforme o documento, ângulo de entrada de  $-4^\circ$  e ângulo de observação de  $0,2^\circ$  são relativos a um carro de médio porte equipado com faróis de filamento de tungstênio a uma distância de aproximadamente de 200 metros da placa de sinalização. Já medidas com ângulo de entrada de  $-4^\circ$  e ângulo de observação de  $0,5^\circ$ , referentes ao mesmo porte de carro anteriormente citado, equivale a uma distância de aproximadamente de 100 metros (ASTM, 2008).

### 2.2.2.3 Ângulo de entrada ( $\beta$ )

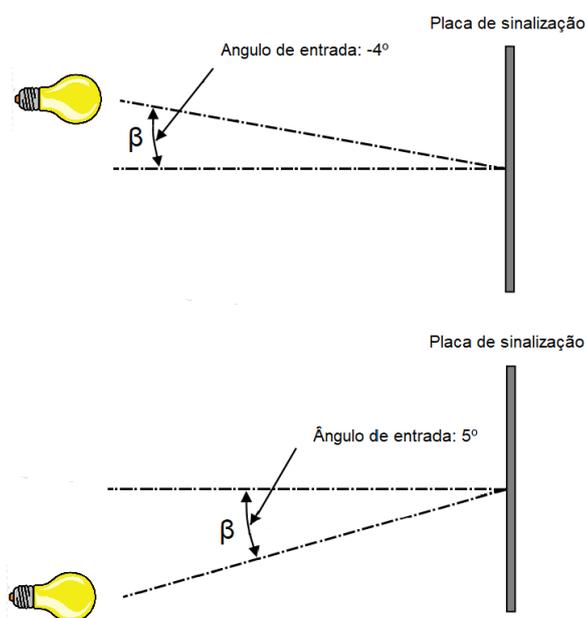
De acordo com Schukanec (2014), o ângulo de entrada na sinalização vertical é determinado pela posição do sinal de trânsito e a geometria do veículo que se aproxima, formado entre um feixe de luz que chega na superfície da placa de trânsito e a linha de referência que sai verticalmente da superfície. A norma brasileira NBR 15426 (ABNT, 2013) expressa o ângulo de entrada ou ângulo de incidência como: “ângulo entre o eixo de iluminação e o eixo do retrorrefletor, tendo como referência uma linha paralela ao eixo da via”. A Figura 7 ilustra como esse ângulo é observado em campo.

Figura 7 – Ângulo de entrada



Fonte: Autor.

De acordo com Delta (2012), para especificações óticas do retrorrefletor portátil da norma americana, D4956 (ASTM, 2019), utiliza-se o ângulo de entrada de  $-4^\circ$ , diferente da norma europeia, EN-12899 (CEN, 2007), que faz uso do ângulo de entrada de  $5^\circ$  (Figura 8).

Figura 8 – Ângulo de entrada de  $-4^\circ$  e  $5^\circ$ 

Fonte: Autor.

De acordo com o manual da Delta para o aparelho GRX (DELTA, 2018), o ângulo de  $0,33^\circ$  para o ângulo de observação e  $5^\circ$  de ângulo de entrada, utilizado pela norma europeia, simula aproximadamente um carro de médio cerca de 100m de distância usando faróis de tungstênio. Essa distância é equivalente à geometria de  $0,5^\circ$  de ângulo de observação e  $-4^\circ$  de ângulo de entrada da ASTM (D4956, 2019).

#### 2.2.2.4 Ângulo de observação ( $\alpha$ )

O ângulo de observação pode ser definido como o ângulo entre o feixe de luz que entra na placa de sinalização e o feixe de luz que retorna ao olho do condutor (Figura 9). Esse parâmetro é uma função da altura do olho do motorista em comparação com os faróis do veículo. Como é assumido que a maioria dos materiais de retrorefletividade reflete a luz diretamente de volta à fonte, o ângulo de observação correto seria igual a zero. No entanto, tal afirmação desconsidera que o olho do motorista é geometricamente mais alto do que os faróis do veículo (SCHUKANEC, 2014).

Figura 9 – Ângulo de observação

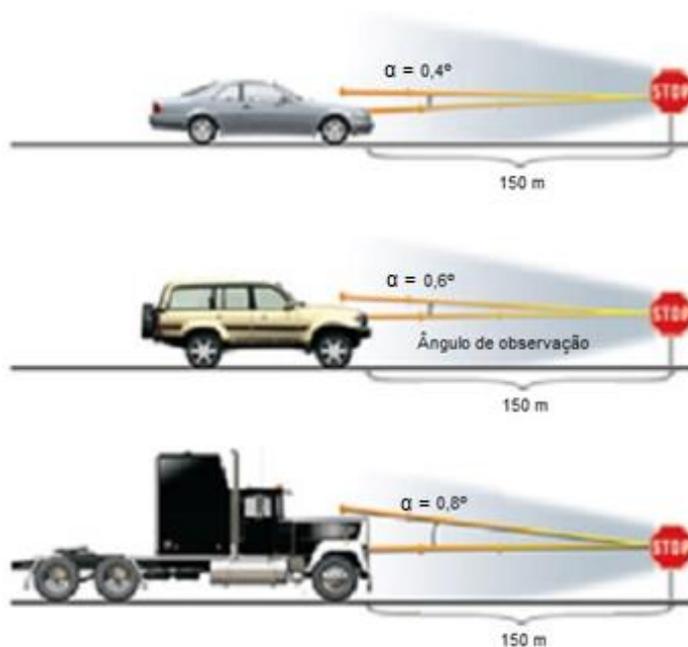


Fonte: Autor.

O site oficial da 3M (2019), empresa multinacional fabricante de películas de sinalização vertical e outras tecnologias, mostra como ângulo é dependente do tamanho do carro que é dirigido (Figura 10). Considerando modelos de automóveis distintos em uma mesma distância, sendo ela uma distância de referência 150 metros da sinalização vertical, um veículo de passeio padrão terá um ângulo de entrada de cerca de  $0,4^\circ$ . Para uma SUV ou caminhonete, esse ângulo aumenta para

aproximadamente  $0,6^\circ$ . E um caminhão, que tem os faróis mais separados da visão do condutor, o ângulo exibe em média um valor de  $0,8^\circ$ . É importante que as sinalizações viárias verticais sejam visíveis para todos os tipos de veículo nas distâncias críticas de detecção e de leitura ao longo da aproximação, pois quanto maior o ângulo de observação pior é a capacidade de o motorista enxergar a placa à noite.

Figura 10 – Ângulo de observação de diferentes veículos



Fonte: Adaptado do site da 3M (2019).

#### 2.2.2.5 Equipamento e processo de avaliação da retrorrefletividade

A avaliação do desempenho da retrorrefletividade em sinalização vertical rodoviária é realizada com o auxílio de um retrorrefletômetro portátil. No Brasil, o método de medição é regulamentado pela NBR 15426 (ABNT, 2013). O documento discorre sobre o equipamento, que deve possuir a capacidade de medir em diferentes posições e ângulos de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . Ao colocar o equipamento na película, ele deve vedar a luz difusa externa, evitando que afete a leitura na área avaliada. O aparelho deve ter condição suficiente de medir os valores de retrorrefletividade de 1 a  $1999 \text{ cd/lx.m}^2$ .

A calibragem é efetuada com um material de referência, consistindo em painel separado ou disco de um material refletivo de cor branca com retrorrefletividade (RA) conhecida. Conforme a NBR 15426 (ABNT, 2013), que tem como referência a norma E810 (ASTM, 2005), o retrorrefletômetro portátil deve possuir a seguinte geometria: ângulo de entrada ( $\beta$ ) de  $-4^\circ$  e ângulo de observação ( $\alpha$ ) de  $0,2^\circ$ , podendo, como opção, utilizar ângulos de observação de  $0,5^\circ$  e  $1^\circ$ . O procedimento para medição consiste, após a calibragem, na realização de cinco leituras em cada cor, de modo que o valor seja representativo da totalidade da placa. As medidas necessitam ser feitas com a placa seca (ABNT, 2013).

### 2.2.3 Estudos relacionados à retrorrefletividade

Segundo Carlson e Hawkins (2002), o desenvolvimento de níveis mínimos finais de retrorrefletividade para a sinalização vertical é um passo crítico no desenvolvimento de um sistema de transporte rodoviário seguro e eficiente. Nos Estados Unidos da América, os esforços nessa área começaram em 1984, quando o *Center for Auto Safety* solicitou à *Federal Highway Administration* (FHWA) o estabelecimento de padrões de retrorrefletividade das sinalizações vertical e horizontal. Carlson *et al.* (2003) comentam que algumas pesquisas, como a de Mace *et al.* (1982), Mace *et al.* (1985), Mace *et al.* (1986) e McGee e Mace (1988), foram pioneiras nesse assunto, culminando, em 1993, nos primeiros requisitos mínimos finais de vida útil de retrorrefletividade.

No mesmo ano, a FHWA publicou os primeiros valores mínimos finais, os quais resultaram de um modelo computacional teórico chamado *Computer Analysis e Retrorefletance of Traffic Signs* (CARTS). O modelo matemático utilizava informações de entrada que eram necessárias para a determinação dos valores mínimos de retrorrefletividade, considerando informações como distância mínima necessária de visibilidade do condutor, o valor de luminância para legibilidade da sinalização vertical, entre outros. O programa gerava medidas de retrorrefletividade para o padrão de geometria de  $-4^\circ$  e  $0,2^\circ$  para os ângulos de entrada e de observação, respectivamente, de acordo com a norma americana ASTM D4956-01<sup>a</sup> (CARLSON *et al.*, 2003).

Ainda de acordo com os autores, após a publicação dos níveis mínimos finais de retrorrefletividade, os desenvolvedores do CARTS receberam algumas críticas sobre o modo como os faróis do carro eram representados na modelagem. As

medidas eram assumidas apenas com um modelo de farol, chamado “modelagem ciclope”. Tal modelagem representava apenas um farol, sendo esse representativo de motocicletas, de modo que não se considerava os modelos utilizados em veículos de quatro rodas, com dois faróis. Em julho de 1994, os desenvolvedores do CARTS aperfeiçoaram o programa, adicionando o efeito dos dois faróis.

Em março de 1997, a *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) implantou uma revisão no FMVSS 108, órgão regulador dos dispositivos automotivos de iluminação, sinalização e refletores nos Estados Unidos. Foram observados dois fatores importantes frente à visualização das sinalizações verticais aéreas, sendo eles a quantidade de brilho e a variabilidade da intensidade luminosa dos faróis automotivos. Em 1998, após várias discussões sobre o assunto, os valores mínimos finais de retrorrefletividade foram revisados. Entre as mudanças, houve a remoção dos valores mínimos finais de retrorrefletividade para sinais aéreos por causa da falta de especificação do desempenho dos faróis e da dificuldade de medir a retrorrefletividade de tais sinais. Os valores mínimos de algumas cores foram ajustados (CARLSON *et al*, 2003).

Após os resultados da revisão da NHTSA ao FMVSS 108, a FHWA financiou algumas pesquisas para o desenvolvimento dos valores mínimos finais de retrorrefletividade dos sinais aéreos e dos sinais indicadores de nomes de ruas. Desse modo, no início de 2001, pesquisadores do *Texas Transportation Institute* desenvolveram um processo analítico para determinar os valores mínimos finais de retrorrefletividade, contemplando mais fatores em sua análise, como exigência de luminância. Os pesquisadores fizeram um estudo da legibilidade com sinais de guia e identificadores de rua em larga escala, de modo que oferecesse suporte a motoristas mais velhos (CARLSON; HAWKINS, 2002). Um dado relevante é mostrado no *site* oficial *Senior Driving* da *American Automobile Association* (2019), no qual afirma-se que motoristas entre os 60 e 80 anos necessitam de três a seis vezes mais de luz do que jovens de 20 anos, o que demonstra que a idade é um fator significativo para a visibilidade das placas de sinalização vertical.

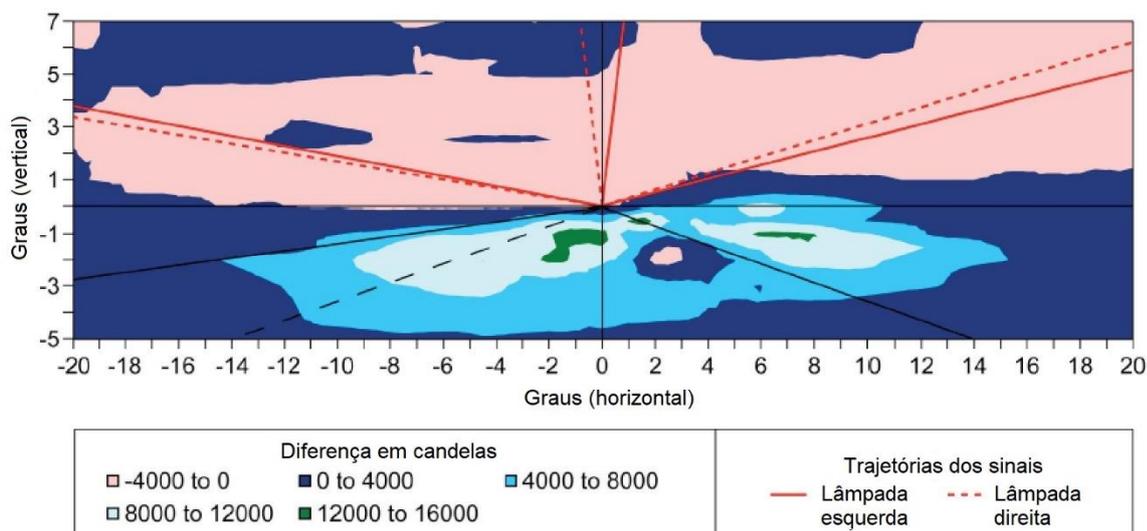
Na tentativa de determinar os valores mínimos finais de retrorrefletividade para as sinalizações verticais aéreas e de nomes de ruas, a pesquisa apresentou análises de sensibilidade para determinar outras condições, como o impacto relativo de fatores como capacidade de padronizar um motorista, tipo de farol e tipo de veículo. Essa pesquisa identificou a necessidade de atualizar alguns dos principais pressupostos dos níveis finais de retrorrefletividade mínimos de 1993 e revisados em 1998. Além

disso, havia a necessidade de desenvolver níveis mínimos finais de retrorrefletividade para os vários tipos de películas retrorrefletivas que haviam sido introduzidas no mercado desde que o trabalho anterior foi concluído (CARLSON *et al.*, 2003).

Com os anos, os requisitos mínimos finais de retrorrefletividade foram periodicamente revisados na tentativa de adaptar os valores mínimos seguros, focando em pesquisas sobre a investigação e a sensibilidade de fatores como idade do motorista, faróis, tipos de veículos e películas retrorrefletivas (CARLSON *et al.*, 2016).

No avanço das tecnologias de lâmpadas de faróis baixos, Sivak *et al.* (2006), demonstram, em um gráfico, a diferença em candelas entre as médias da intensidade luminosa dos faróis de xênon, chamados de *High Intensity Discharge* (2004), menos as médias da intensidade luminosa dos faróis do tipo de tungstênio-halogênio (1997) na parte central do feixe de luz. A Figura 11 expõe as conclusões da pesquisa. As linhas sólidas em preto, abaixo do eixo zero vertical, representam as bordas de uma rodovia, e a tracejada representa o meio da via, sendo que as duas pistas são de 3,7 m de largura. As linhas acima, em vermelho, demonstram as trajetórias de três sinalizações verticais (direita, esquerda e aéreo) pela perspectiva dos dois faróis.

Figura 11 – Diferença entre faróis HID (2004) e tungstênio-halogênio (1997)



Fonte: Adaptado de Sivak *et al.* (2006).

É possível observar que o novo farol fornece mais iluminação ao pavimento em frente ao veículo, mas oferece menos iluminação acima do eixo zero vertical, indicando que uso do novo farol provoca menor visibilidade das sinalizações verticais

(CARLSON *et al.*, 2016). Costa *et al* (2014) afirmam que o uso das cores contrastantes e películas com maior retrorrefletividade faz com que a sinalização vertical seja mais evidente que a marcações horizontais. Entretanto, é necessário ressaltar que as sinalizações verticais são posicionadas afastadas da faixa de rodagem, normalmente onde se concentra visão do condutor. Fujii (2017) afirma que a evolução de lâmpadas dos faróis e dos padrões de seus feixes de luz causou alterações no modo como são vistas as placas de sinalização pelos motoristas.

Em um estudo anterior, Sivak *et al.* (2001) comentam também sobre os faróis dos chamados de “*visually/optically aimable*” (VOA), de tradução livre como “visualmente ou opticamente direcionáveis”, ou chamados de faróis de baixa dispersão que, embora usados para solucionar problemas como redução do brilho do tráfego contrário, reduzem a visibilidade das placas de sinalização vertical. De acordo com Kang *et al.* (2010), pesquisas recentes correspondentes aos faróis atuais no mercado automobilístico apontam que os LED são melhores em muitos pontos em comparação aos HID e tungstênio-halogênio, como intensidade luminosa e largura do feixe, resultando em melhores condições para a visualização dos sinais verticais.

Uma condição significativa para a retrorrefletividade é a conservação e a manutenção das sinalizações verticais para que elas mantenham os valores mínimos de norma. De acordo com Ai e Tsai (2016), na condução noturna, a retrorrefletividade em sinais de trânsito é um dos fatores mais críticos que afetam a segurança. Khalilikhah *et al.* (2015) comentam a importância da realização de uma inspeção visual no turno da noite, afirmando que, durante a inspeção diurna, não é possível avaliar a retrorrefletividade e a legibilidade noturna da placa (Figura 12). O *Manual on Uniform Traffic Control Devices* (2009) comenta a importância das sinalizações apresentarem retrorrefletividade para mostrar a mesma cor e forma tanto durante o dia quanto à noite.

Figura 12 – Condição visual diurno e noturna de uma placa de sinalização teste



Fonte: Adaptado de Khalilikhah *et al.* (2015).

Outro fator importante é que os motoristas visualizem as informações vitais das placas de sinalização sem a necessidade de iluminação de outra fonte além dos faróis dos automóveis, sendo determinante que sejam bem projetadas a fim de que reflitam, durante a noite, a iluminação dos faróis dos veículos. Dessa forma, a retrorrefletividade tem como objetivo avaliar a capacidade retrorrefletora do sinal de trânsito, com o propósito de substituir ou realizar a manutenção do dispositivo (AI E TSAI, 2016).

Carlson *et al.* (2012) realizaram um estudo para avaliar as práticas de manutenção da retrorrefletividade de sinais verticais do *Texas Department of Transportation* e verificar se as orientações quanto à mínima retrorrefletividade estão conforme o *Manual on Uniform Traffic Control Devices* (MUTCD). O referido manual exige a escolha entre cinco métodos para a avaliação da sinalização vertical, que são: inspeção visual noturna, medidas de retrorrefletividade, utilização de amostra de controle e dois tipos diferentes de análise da vida útil esperada da sinalização. Com uso de retrorrefletômetro portátil, foi medido o valor de retrorrefletividade de cerca de 1400 placas de sinalização. Utilizando inspeção visual noturna e medidas de retrorrefletividade, a avaliação revelou que quase todos estavam acima dos níveis mínimos finais de retrorrefletividade exigidos pela MUTCD, concluindo que as práticas atuais do *Texas Department of Transportation* foram eficazes para esse controle.

Porém, Ai e Tsai (2016) comentam que os métodos para avaliar as práticas de

manutenção da retrorrefletividade incorporados pelo MUTCD para valores mínimos de retrorrefletividade são financeira e praticamente inviáveis. Em estudos mais recentes, propuseram uma metodologia para avaliar, automaticamente, a condição da retrorrefletividade usando *Light Detection And Ranging* (LIDAR) e visão computacional. LIDAR é uma nova tecnologia óptica de detecção remota que mede propriedades da luz refletida de modo a obter a distância e outras informações de um objeto distante, sendo possível utilizar o aparelho no topo de um veículo padrão, como no estudo de Ai e Tsai (2016), ou mesmo de forma portátil. Os resultados desse estudo, a partir de testes experimentais feitos com 35 sinalizações do tipo I, mostraram ser uma atraente alternativa para as agências de transporte.

Atualmente a MUTCD (2009) fornece níveis mínimos finais de retrorrefletividade para sinais verticais aéreos vigentes em norma; entretanto Carlson *et al.* (2016), em um dos seus estudos recentes, apresentam uma diretriz para visibilidade noturna de sinais verticais aéreos, sendo eles dependentes da complexidade de visualização da placa. Os níveis de complexidade de visualização são classificados de 1 a 5, de modo que o nível 1 é para volumes de tráfegos baixos e pouca iluminação externa, como vias rurais, e o nível 5 é para um alto volume de tráfego e iluminação externa, competindo com alta quantidade de luzes de painéis publicitários. Os autores indicam um valor de luminância para a legenda da placa, de modo que haja maior contraste entre o fundo e os sinais gráficos, sendo que os valores recomendados são de 2,5 cd/m<sup>2</sup> para nível 1 e 25 cd/m<sup>2</sup> para nível 5.

#### **2.2.4 Parâmetros normativos e requisitos mínimos nos Estados Unidos da América**

Nos Estados Unidos da América, existem duas referências normativas de avaliação de limites mínimos de retrorrefletividade em sinalização vertical. A norma D4956 (ASTM, 2019) especifica propriedades que novas películas, ainda não introduzidas em campo, devem obter e, no manual MUTCD (FHWA, 2009), é apresentada uma tabela com parâmetros mínimos finais para a substituição da película em serviço. Segundo McGee (2010), os valores encontrados na norma D4956 são para películas de sinalização adquiridas recentemente. Quando expostas às intempéries ambientais com o tempo, as cores desaparecem e as qualidades retrorrefletivas das placas de

sinalização se deterioram até o momento em que o sinal não é mais legível pelo motorista, tanto de dia quanto à noite, a uma distância necessária.

A norma para implantação de novas películas em pré-avaliação é a ASTM D4956 – 19, intitulada “*Standard Specification for Retroreflective Sheeting for Traffic Control*”. Originalmente aprovada em 1989, teve sua última edição revisada e aprovada no dia 1 de julho de 2019. Segundo a ASTM (2019), as películas são classificadas como, destaca-se as películas que se aproximam das utilizadas neste estudo:

- a) **Película Tipo I: denominada como “grau de engenharia”, composta tipicamente de microesferas de vidro ou microprismas. Utilizada em sinais de rodovias, sinais em zonas de construção e delineadores de via;**
- b) Película Tipo II: denominada como “super grau engenheiro”, composta tipicamente de microesferas de vidro ou microsprimas. Utilizada em sinais de rodovias, sinais em zonas de construção e delineadores de via;
- c) Película Tipo III: denominada como de “alta intensidade”, composta tipicamente de microesferas de vidro encapsuladas ou microprismas. Utilizada em sinais de rodovias, sinais em zonas de construção e delineadores de via;
- d) **Película Tipo IV: denominada como de “alta intensidade”, composta tipicamente de elemento microprismas não metalizado. Utilizada em sinais de rodovias, sinais em zonas de construção e delineadores de via;**
- e) Película Tipo V: denominada como de “super alta intensidade”, composta tipicamente de elemento microprismático metalizado. Utilizada em delineadores de via;
- f) Película Tipo VI: denominada como elastomérica sem adesivo, composta de material vinílico microprismático. Utilizada em sinais de advertência temporários e cones de trânsito;
- g) Película Tipo VII: esse tipo de película foi reclassificado na versão mais atual dessa norma como Tipo VIII;
- h) Película Tipo VIII: composta por elemento microprismático não metalizado. Utilizada em sinais de rodovias, sinais em zonas de construção e delineadores de via;
- i) Película Tipo IX: composta por elemento microprismático não metalizado

em formato de canto de cubo. Pode ser aplicada em sinalizações de estradas, sinais de zonas de construções e delineadores de via;

j) Película Tipo X: esse tipo de película foi reclassificado na versão mais atual dessa norma como Tipo VIII.

**k) Película Tipo XI: tipicamente composta por elementos microprismático não metalizados de formato canto de cubo. Utilizada em sinais de rodovias, sinais em zonas de construção e delineadores de via;**

A norma americana possui tabelas com os parâmetros normativos mínimos iniciais que cada tipo de película retrorrefletiva deve exibir. Apresentam-se somente os requisitos mínimos para os tipos I, IV e XI (D4956, 2019), que possuem valores semelhantes aos tipos I, III e X (NBR14644, 2013), os quais serão avaliados neste estudo (Tabela 1 a Tabela 3). Destacam-se as medidas da geometria 0,2° de ângulo de observação e -4° de ângulo de entrada, pois são utilizadas como geometria de medição da retrorrefletividade nesta pesquisa.

Tabela 1 – Coeficiente mínimo inicial de retrorrefletividade das películas Tipo I (ASTM)

Ângulo de observação	Ângulo de entrada	Coeficiente mínimo de retrorrefletividade <sup>1</sup>						
		Branca	Amarela	Laranja	Verde	Vermelha	Azul	Marrom
<b>0,2°</b>	<b>-4°</b>	<b>70</b>	<b>50</b>	<b>25</b>	<b>9</b>	<b>14</b>	<b>4</b>	<b>1</b>
0,2°	30°	30	22	7	3,5	6	1,7	0,3
0,5°	-4°	30	25	13	4,5	7,5	2	0,3
0,5°	30°	15	13	4	2,2	3	0,8	0,2

$${}^1R_A = cd \cdot lx^{-1} \cdot m^{-2}.$$

Fonte: Adaptado de D4956 – 19 (ASTM, 2019).

Após empregada em campo, a sinalização vertical é avaliada para que tenha valores satisfatórios de retrorrefletividade ao longo do tempo. Para isso, usa-se o documento intitulado *Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways* (FHWA, 2009). Esse manual tem como objetivo padronizar todos os dispositivos usados para controle de tráfego e serve bastante como referência para os manuais encontrados no Brasil, como o Manual de Sinalização Rodoviária (DNIT, 2010). Nele, são incluídos os requisitos para níveis mínimos de retrorrefletividade mantidos para a maioria dos sinais de trânsito. Esses valores são mostrados na Tabela 4 e se aplicam às combinações de cores mais comumente encontradas em serviço.

Tabela 2 – Coeficiente mínimo inicial de retrorrefletividade das películas Tipo IV (ASTM)

Ângulo de observação	Ângulo de entrada	Coeficiente mínimo de retrorrefletividade <sup>1</sup>										
		Branca	Amarela	Laranja	Verde	Vermelha	Azul	Roxo	Marrom	Amarela lima-limão fluorescente	Amarela fluorescente	Laranja fluorescente
<b>0,2°</b>	<b>-4°</b>	<b>360</b>	<b>270</b>	<b>145</b>	<b>50</b>	<b>65</b>	<b>30</b>	<b>14</b>	<b>18</b>	<b>290</b>	<b>220</b>	<b>105</b>
0,2°	30°	170	135	68	25	30	14	6,8	8,5	135	100	50
0,5°	-4°	150	110	60	21	27	13	6	7,5	120	90	45
0,5°	30°	72	54	28	10	13	6	2,9	3,5	55	40	22

$${}^1R_A = cd \cdot lx^{-1} \cdot m^{-2}.$$

Fonte: Adaptado de D4956 – 19 (ASTM, 2019).

Tabela 3 – Coeficiente mínimo inicial de retrorrefletividade das películas Tipo XI (ASTM)

Ângulo de observação	Ângulo de entrada	Coeficiente mínimo de retrorrefletividade <sup>1</sup>										
		Branca	Amarela	Laranja	Verde	Vermelha	Azul	Roxo	Marrom	Amarela lima-limão fluorescente	Amarela fluorescente	Laranja fluorescente
<b>0,2°</b>	<b>-4°</b>	<b>580</b>	<b>435</b>	<b>200</b>	<b>58</b>	<b>87</b>	<b>26</b>	<b>23</b>	<b>17</b>	<b>460</b>	<b>350</b>	<b>175</b>
0,2°	30°	220	165	77	22	33	10	8,8	7	180	130	66
0,5°	-4°	420	315	150	42	63	19	17	13	340	250	125
0,5°	30°	150	110	53	15	23	7	6	5	120	90	45
1°	-4°	120	90	42	12	18	5	4,8	4	96	72	36
1°	30°	45	34	16	5	7	2	1,8	1	36	27	14

$${}^1R_A = cd \cdot lx^{-1} \cdot m^{-2}.$$

Fonte: Adaptado de D4956 – 19 (ASTM, 2019).

Tabela 4 – Níveis mínimos finais de retrorefletividade de sinalização vertical solicitados pela FHWA (2009)

Cor das sinalizações verticais	Tipo de película <sup>1</sup> (ASTM D4956-04)				Critério adicional
	Película de microesfera		Película microprismática		
	I	II	III	III, IV, VI, VII, VIII, IX e X	
Branco sobre o verde	B*;V ≥ 7	B*;V ≥ 15	B*;V ≥ 25	B ≥ 250; V ≥ 25	Aéreo
	B*;V ≥ 7		B ≥ 120; V ≥ 15		Poste montado
Preto sobre o amarelo ou Preto sobre o laranja	A*; L*		A ≥ 50; L ≥ 50		2
	A*; L*		A ≥ 75; L ≥ 75		3
Branco sobre o vermelho			B ≥ 35; V ≥ 7		4
Preto sobre o branco			B ≥ 50		–

<sup>1</sup> Os níveis mínimos de retrorefletividade mantidos mostrados nesta tabela estão em unidades de  $cd/lx \cdot m^2$  medidas em um ângulo de observação de  $0,2^\circ$  e um ângulo de entrada de  $-4,0^\circ$ ;

<sup>2</sup> Placas com medida maior ou igual a 48 polegadas;

<sup>3</sup> Placas com medida menor a 48 polegadas;

<sup>4</sup> Relação mínima de contraste entre as cores da sinalização vertical  $\geq 3: 1$  (retrorefletividade branca ÷ retrorefletividade vermelha)

\* Esse tipo de película e cor não devem ser usados para esse tipo de aplicação

Nota: A tabela apresentada possui mais informações.

Fonte: Adaptado de FHWA (2009).

Como pode ser observado, a Tabela 4 divide os critérios a partir das cores empregadas na sinalização vertical, como “Branco sobre o verde”, combinação comumente utilizada para placas de indicação de vias e locais de interesse. Nela, percebem-se dois tipos de “Critério adicional”, no qual são apresentados diferentes requisitos mínimos de retrorefletividade para cada critério, sendo um para sinalização aérea e outro para instalação em suporte comum de sinalização. Verifica-se que, para os dois tipos de critérios, o manual não permite o uso de películas de microesfera de cor branca para aplicabilidade, sendo excluído o uso do tipo I, II e III para aéreas e somente a I para o uso em suportes montados na lateral da via.

Para a combinação de cores como “Preto sobre o amarelo” ou “Preto sobre o laranja”, geralmente utilizada como sinais de advertência, também há dois critérios adicionais; entretanto, eles são divididos em relação ao tamanho da placa de sinalização. A escolha do tamanho da sinalização é realizada a partir de uma tabela (que é encontrada no mesmo manual) em função da velocidade diretriz da via. Observa-se que, para placas com 48 polegadas ou mais (equivalente a, aproximadamente, 1,22 m), a retrorefletividade mínima diminui em relação a placas

com menos de 48 polegadas. Para a combinação de cor “Branco sobre o vermelho”, usada como sinalização de regulamentação, exige-se um contraste mínimo de 3 para 1 entre as cores branca e vermelha, respectivamente. Vale ressaltar que as películas de cor preta não possuem retrorrefletividade, geralmente sendo usadas para símbolos e letras, obtendo o contraste com outras cores.

### 2.2.5 Parâmetros normativos e requisitos mínimos no Brasil

A NBR 14644 (ABNT, 2013), intitulada de “Sinalização Vertical Viária – Películas – Requisitos”, é a norma vigente no território nacional, sendo responsável por “especificar os requisitos mínimos para a qualificação e aceitação das películas utilizadas na sinalização vertical viária”. O documento utiliza como referência a norma norte-americana D4956 – não é especificada a edição, contudo, se comparar com a norma mais atual (ASTM, 2019), é possível notar grandes semelhanças entre elas, conforme será apresentado posteriormente. A norma está válida desde 12 de julho de 2013, em sua terceira edição. O documento padroniza os tipos de películas passíveis de utilização (destacam-se os tipos de películas utilizados no estudo), a saber:

- a) **Tipo I: conhecidas comercialmente como “grau técnico ou grau engenharia” podem ser constituídas por microesferas de vidro ou microprimas. São utilizadas nas cores branca, amarela verde, vermelha, azul, laranja e marrom;**
- b) Tipo II: conhecidas comercialmente como de “alta intensidade” são constituídas por microesferas de vidro encapsuladas. São utilizadas nas cores branca, amarela, verde, vermelha, azul, laranja e marrom;
- c) **Tipo III: conhecidas comercialmente como de “alta intensidade prismática” são constituídas tipicamente por microprimas não metalizados. São utilizadas nas cores branca, amarela, vermelha, azul, verde, laranja e marrom;**
- d) Tipo IV: conhecidas comercialmente como “preto legenda”, são destinadas à produção de tarjas, legendas, símbolos e pictogramas em placas de sinalização. Essa película não é retrorrefletiva e é utilizada na cor preta;
- e) Tipo V: são películas não retrorrefletivas translúcidas, desenvolvidas para a fabricação de sinais de tráfego e produzidas por recorte eletrônico ou sobreposição. São utilizadas normalmente nas cores verde, amarela, azul,

vermelho, laranja, marrom e incolor. São destinadas à aplicação sobre películas retrorrefletivas da cor branca. Sua aplicação confere propriedades visuais e ópticos aos sinais, atendendo às especificações estabelecidas para as respectivas cores, considerando-se o tipo de película usada como substrato;

- f) Tipo VI: são elastoméricas, microprismáticas, sem adesivo e para uso em sinalização temporária. São utilizadas nas cores branca, amarela, vermelha, azul, verde e laranja;
- g) Tipo VII: são constituídas tipicamente por microprismas não metalizados e são indicadas para longas e médias distâncias. São utilizadas nas cores branca, amarela, vermelha, azul, verde, laranja e marrom;
- h) Tipo VIII: são constituídas tipicamente por microprismas metalizadas e são indicadas para longas e médias distâncias, compreendendo dispositivos de sinalização temporária e de segurança. São utilizadas nas cores branca, amarela, vermelha, azul, verde e laranja;
- i) Tipo IX: são constituídas tipicamente por microprismas não metalizados, sendo indicadas para médias e curtas distâncias. São utilizadas nas cores branca, amarela, vermelha, azul, verde e laranja;
- j) Tipo X: são constituídas tipicamente por microprismas não metalizados, são indicadas para longas, médias e curtas distâncias. São utilizadas nas cores branca, amarela, vermelha, azul, verde e laranja.**

Ainda segundo a norma NBR 14644 (ABNT, 2013), as cores fluorescentes usadas nas películas de tipo III, VI, VII, IX e X são utilizadas para promover impacto visual ao motorista quando ele estiver dirigindo o veículo. Esse tipo de cor é recomendado quando se tem baixa visibilidade em qualquer período do dia ou sob neblina. Os requisitos mínimos iniciais para o tipo I, III e X da NBR14644 estão representados entre as Tabela 5 à Tabela 7. Ressalta-se, assim como realizado na norma-americana, que serão exibidos somente esses requisitos mínimos pois, são os tipos utilizados nesta pesquisa.

Tabela 5 – Coeficiente mínimo inicial de retrorrefletividade das películas tipo I (ABNT)

Ângulo de observação	Ângulo de entrada	Coeficiente mínimo de retrorrefletividade <sup>1</sup>						
		Branca	Amarela	Laranja	Verde	Vermelha	Azul	Marron
<b>0,2°</b>	<b>-4°</b>	<b>70</b>	<b>50</b>	<b>25</b>	<b>9</b>	<b>14</b>	<b>4</b>	<b>1</b>
0,2°	30°	30	22	7	3,5	6	1,7	0,3
0,5°	-4°	30	25	13	4,5	7,5	2	0,3
0,5°	30°	15	13	4	2,2	3	0,8	0,2

$${}^1R_A = cd \cdot lx^{-1} \cdot m^{-2}.$$

Fonte: Adaptado de NBR 14644 (ABNT, 2013).

A partir da Tabela 5 à Tabela 7, que apresentam os requisitos mínimos iniciais da norma brasileira, é possível observar que, tanto para ângulos de observação quanto de entrada, existe um decréscimo no valor da retrorrefletividade quando aumentado o ângulo. Isso ocorre porque, quando há a retrorrefletividade da luz emitida pela fonte de luz, o seu retorno é visto pelo observador na forma de cone de retrorrefletividade, conforme demonstrado na Figura 13. Logo, quanto mais afastado o receptor está do centro do cone, menor será a medida de retrorrefletividade obtida. As Tabelas 5 à Tabela 7 também mostram a interferência das cores, observando-se que cores mais claras geram medidas maiores de retrorrefletividade (FHWA, 2019).

Figura 13 – Cone de retrorrefletividade



Fonte: Autor.

Se os requisitos mínimos iniciais das normas brasileira (ABNT, 2013) e americana (ASTM, 2017) forem comparados, percebe-se que muitas das tabelas são idênticas entre elas, visto que a norma brasileira utiliza a americana como referência. As tabelas com possibilidade de correlação estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 6 – Coeficiente mínimo inicial de retrorrefletividade das películas tipo III (ABNT)

Ângulo de observação	Ângulo de entrada	Coeficiente mínimo de retrorrefletividade <sup>1</sup>									
		Branca	Amarela	Laranja	Verde	Vermelha	Azul	Marrom	Amarela lima-limão fluorescente	Amarela fluorescente	Laranja fluorescente
<b>0,2°</b>	<b>-4°</b>	<b>360</b>	<b>270</b>	<b>145</b>	<b>50</b>	<b>65</b>	<b>30</b>	<b>18</b>	<b>290</b>	<b>220</b>	<b>105</b>
0,2°	30°	170	135	68	25	30	14	8,5	135	100	50
0,5°	-4°	150	110	60	21	27	13	7,5	120	90	45
0,5°	30°	72	54	28	10	13	6	3,5	55	40	22

$${}^1R_A = cd \cdot lx^{-1} \cdot m^{-2}.$$

Fonte: Adaptado de NBR 14644 (ABNT, 2013).

Tabela 7 – Coeficiente mínimo inicial de retrorrefletividade das películas tipo X (ABNT)

Ângulo de observação	Ângulo de entrada	Coeficiente mínimo de retrorrefletividade <sup>1</sup>									
		Branca	Amarela	Laranja	Verde	Vermelha	Azul	Amarela lima-limão fluorescente	Amarela fluorescente	Laranja fluorescente	
<b>0,2°</b>	<b>-4°</b>	<b>520</b>	<b>395</b>	<b>210</b>	<b>52</b>	<b>106</b>	<b>26</b>	<b>420</b>	<b>330</b>	<b>165</b>	
0,2°	30°	215	160	80	21	43	10	170	127	66	
0,5°	-4°	350	230	90	31	67	18	245	145	72	
0,5°	30°	135	100	50	14	27	6	110	81	41	
1°	-4°	90	70	30	9	20	4,5	64	48	24	
1°	30°	45	34	17	4,5	9	2	36	27	14	

$${}^1R_A = cd \cdot lx^{-1} \cdot m^{-2}.$$

Fonte: Adaptado de NBR 14644 (ABNT, 2013).

Tabela 8 – Requisitos mínimos iniciais correspondentes entre as normas NBR14644 (ABNT, 2013) e D4956 (ASTM, 2019)

NBR 14644 (ABNT, 2013)	D4956 (ASTM, 2019)
Tipo I	Tipo I
Tipo II	Tipo III
Tipo III	Tipo IV
Tipo VI	Tipo VI
Tipo VII	Tipo VIII
Tipo VIII	Tipo V
Tipo IX	Tipo IX
Tipo X	Tipo IX

Fonte: Autor

Ainda segundo a Tabela 8, até mesmo as nomenclaturas dadas aos tipos são semelhantes ou mesmo parecidas, como no caso da película tipo I brasileira, denominada “grau de engenharia”, e a tipo I americana, denominada “*engineering grade*”. Dentre os parâmetros exigidos correspondentes entre os tipos de películas, quase todos possuem as medidas idênticas em relação a critérios mínimos. Entre elas, apenas a tipo X, da ABNT, e a tipo IX, da ASTM, não têm valores iguais, no qual a maioria dos valores da norma norte-americana são cerca de 5% a 30% maiores que da norma brasileira.

Os requisitos mínimos finais para substituição de películas retrorrefletivas são apresentados de maneiras diferentes, dependendo do órgão responsável pela via. Esses critérios serão abordados com maiores detalhes na seção 2.3 .

## 2.2.6 Parâmetros normativos e requisitos mínimos na Europa

A norma usada na Europa para a regularização de placas de sinalização vertical é a norma EN 12899 (CEN, 2007). O documento, além de propor requisitos mínimos iniciais de retrorrefletividade, especifica padrões para dimensionamento, instalação, entre outros itens. Isso acontece de modo diferente nas normas do Brasil e dos Estados Unidos da América, as quais separam os tópicos em arquivos diferentes sendo até mesmo produzidos por diferentes órgãos, como a norma NBR 14644

(ABNT, 2013) e o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito (CONTRAN, 2007a; CONTRAN, 2007b; CONTRAN, 2014a).

Os requisitos mínimos utilizados na norma europeia possuem algumas diferenças em relação à brasileira e à norte-americana, mas apresentam o mesmo objetivo de normatizar novas películas para implantação. A primeira diferença é a geometria de medição, já que a norma europeia utiliza ângulo de entrada de 5°, 30° e 40° e ângulo de observação de 0,2°, 0,33° e 2°; no qual somente o ângulo de entrada 30° e ângulo de observação 0,2° são semelhantes às outras duas normas. Outra diferença está nos tipos das tabelas de requisitos mínimos, pois o documento separa as películas em dois tipos material: microesferas de vidro e microprismáticas.

O material com microesferas de vidro possui duas tabelas de níveis mínimos iniciais de retrorrefletividade, com separação em Classe RA1 (Tabela 9) e Classe RA2 (Tabela 10).

Tabela 9 – Coeficiente mínimo de retrorrefletividade da Classe RA1 (CEN)

Geometria de medições		Coeficiente mínimo de retrorrefletividade <sup>1</sup>							
		Cor							
$\alpha$	$\beta_1$ ( $\beta_2 = 0$ )	Branco	Amarelo	Vermelho	Verde	Azul	Marrom	Laranja	Cinzentos
0,2°	5°	70	50	14,5	9	4	1	25	42
	30°	30	22	6	3,5	1,7	0,3	10	18
	40°	10	7	2	1,5	0,5	*	2,2	6
0,33°	5°	50	35	10	7	2	0,6	20	30
	30°	24	16	4	3	1	0,2	8	14,4
	40°	9	6	1,8	1,2	*	*	2,2	5,4
2°	5°	5	3	1	0,5	*	*	1,2	3
	30°	2,5	1,5	0,5	0,3	*	*	0,5	1,5
	40°	1,5	1	0,5	0,2	*	*	*	0,9

$${}^1R_A = cd \cdot lx^{-1} \cdot m^{-2}.$$

\* Valor maior do que zero, mas que não é significativo ou que não se aplica.

Fonte: Adaptado de EN 12899 (CEN, 2007).

Tabela 10 – Coeficiente mínimo de retrorrefletividade da Classe RA2 (CEN)

Geometria de medições		Coeficiente mínimo de retrorrefletividade <sup>1</sup>								
		Cor								
$\alpha$	$\beta_1$ ( $\beta_2 = 0$ )	Branco	Amarelo	Vermelho	Verde	Verde escuro	Azul	Marrom	Laranja	Cinzentos
0,2°	5°	250	170	45	45	20	20	12	100	125
	30°	150	100	25	25	15	11	8,5	60	75
	40°	110	70	15	12	6	8	5	29	55
0,33°	5°	180	120	25	21	14	14	8	65	90
	30°	100	70	14	12	11	8	5	40	50
	40°	95	60	13	11	5	7	3	20	47
2°	5°	5	3	1	0,5	0,5	0,2	0,2	1,5	2,5
	30°	2,5	1,5	0,4	0,3	0,3	*	*	1	1,2
	40°	1,5	1	0,3	0,2	0,2	*	*	*	0,7

$${}^1R_A = cd \cdot lx^{-1} \cdot m^{-2}.$$

\* Valor maior do que zero, mas que não é significativo ou que não se aplica.

Fonte: Adaptado de EN 12899 (CEN, 2007).

Para o material microprismático, não há coeficientes mínimos de retrorrefletividade descritos em norma. Para que se encontre desempenho em relação a esse material, o documento orienta consulta na *European Technical Approval* (ETA), instituição que possibilita a marcação de “Conformidade Europeia” (CE), a qual funciona como um indicativo de conformidade obrigatória para diversos produtos comercializados no Espaço Econômico Europeu – produtos não abrangidos ou apenas parcialmente abrangidos por norma europeia. Essa marcação funciona se forma semelhante ao selo do INMETRO no Brasil, cuja função é qualificar um produto. Sobre requisitos mínimos finais de retrorrefletividade para substituição das placas de sinalização vertical em serviço, não foi encontrado algum documento que padronize esses valores.

### 2.2.7 Fatores que influenciam na retrorrefletividade

Alguns fatores apresentam influência nas leituras de retrorrefletividade, podendo ser explicados pelas técnicas de construção, como tipo de películas ou cromaticidade, e por fatores ambientais degradantes da película. A seguir, será discorrido sobre alguns desses fatores.

### 2.2.7.1 Tipos de película

De acordo com a norma NBR 14644 (ABNT, 2013, p. 1),

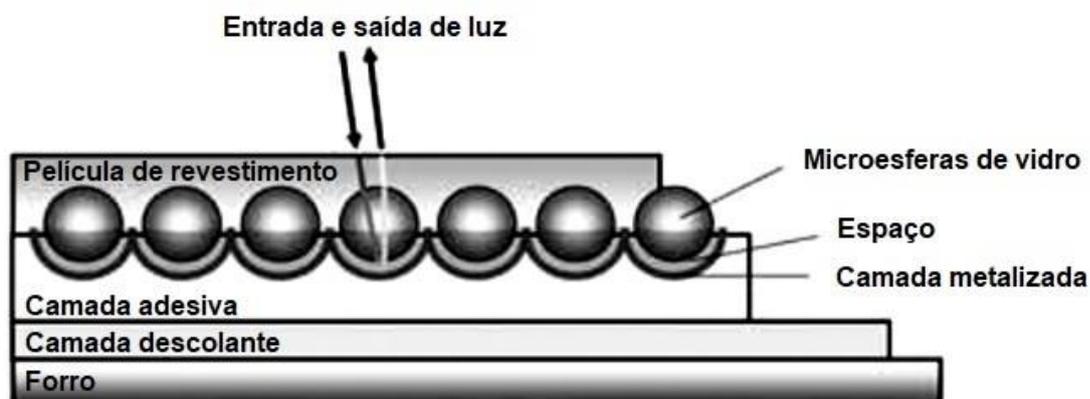
...as películas são filmes plásticos flexíveis com adesivo sensível à pressão, que apresentam a mesma cor, quer durante o dia, quer à noite, quando observadas à luz dos faróis de um veículo, e devem ser resistentes às intempéries.

No mercado mundial, há variados tipos de películas com constituições diferentes. Para atender a certos requisitos mínimos, existem diferentes materiais constituintes e formas de serem fabricadas. As normas dos Estados Unidos, Brasil e Europa fazem referência a dois tipos de modelos de películas, compostas de microesferas de vidro ou microprismáticos (ABNT, 2013; ASTM, 2019; EN, 2007).

De acordo com Cole (2016), as películas conhecidas como “grau de engenharia” e de “alta intensidade” são compostas, usualmente, por microesferas de vidro que fornecem a retrorefletividade a partir do rebatimento da luz nas microesferas de volta à fonte. Entretanto, no mercado, a confecção da película com esse material se diferencia pela forma de disposição das microesferas, fechadas ou encapsuladas.

Segundo o autor, películas de lente fechada (Figura 14) são completamente envolvidas por um polímero flexível, que normalmente é tingido para que se crie diferentes cores. Essa película é frequentemente usada para aplicações ortográficas, pois elas mantêm sua integridade mesmo sendo cortadas. Conforme Belisle *et al.* (1998), as películas de microesferas fechadas são tipicamente caracterizadas por uma camada única de microesferas minúsculas embutidas numa camada de ligação polimérica termofixa, que é apoiada por uma camada refletora especular (metalização) e um adesivo com uma camada protetora removível e revestida com acabamento térmico transparente.

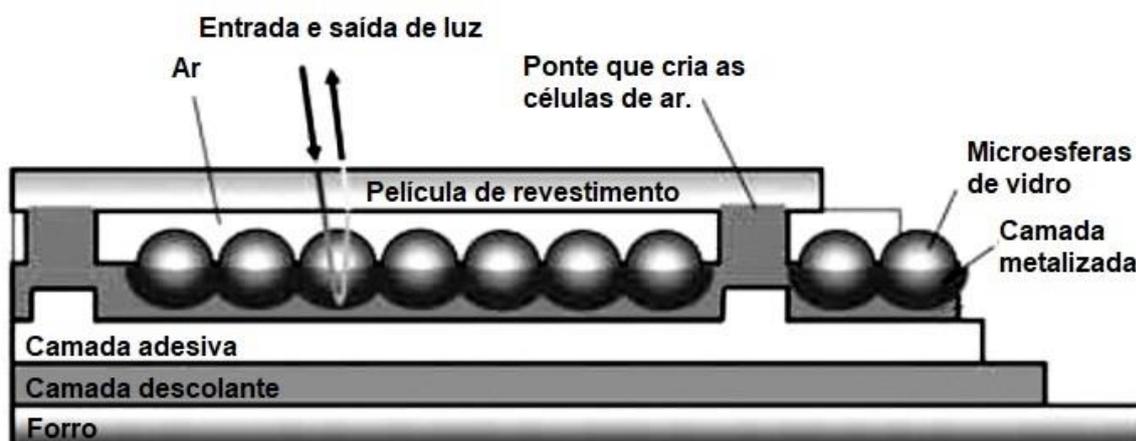
Figura 14 – Microesferas de vidro fechada



Fonte: Adaptado de Cole (2016).

As películas de lente encapsuladas (Figura 15) têm suas microesferas de vidro fechadas em células. Como suas células não são envolvidas pela película de revestimento, há reflexão de maior intensidade. Nesse método construtivo, a película de revestimento é tingida para a obtenção de diferentes cores, e esses filmes encapsulados geralmente apresentam suas células na forma de um favo de mel ou de diamante (COLE, 2016).

Figura 15 – Microesferas de vidro encapsulada

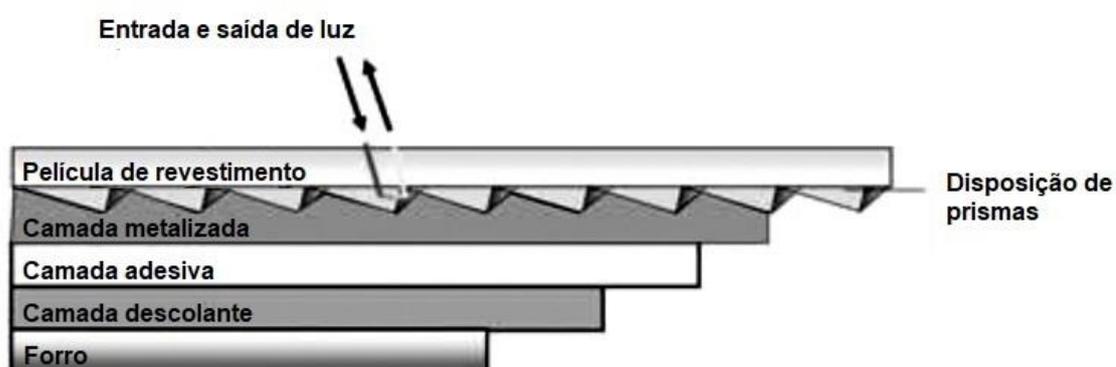


Fonte: Adaptado de Cole (2016).

Com relação aos micropismas, Cole (2016) explica como são compostas as películas constituídas de micropismas metalizados e não metalizados. Os

microprismas metalizados (Figura 16) são compostos de um arranjo de prismas – normalmente de acrílico ou poliéster (vinil) – na camada superior, podendo ser de cor branca ou colorida. A camada superior possui a função retrorrefletiva, fazendo com que a luz que entra retorne à fonte; juntamente a essa camada, há um revestimento metalizado que auxilia nesse ofício. Assim como as outras películas, aplicam-se a camada adesiva e a camada descolante.

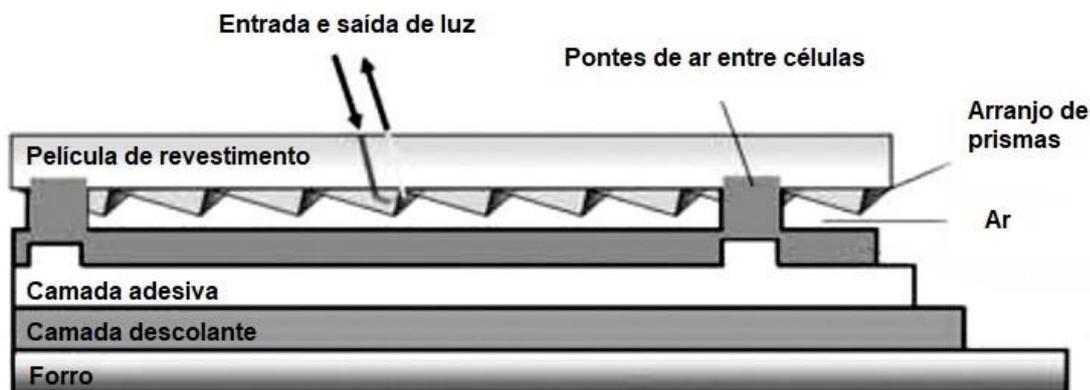
Figura 16 – Microprismas metalizados



Fonte: Adaptado de Cole (2016).

Tal qual a metalizada, a não metalizada (Figura 17) é constituída por um arranjo de prismas; porém, ela é aderida a uma grade, gerando, assim, um depósito de ar abaixo dos prismas. Essa constituição sem a camada metalizada confere mais brilho à película, pois a cor da camada de prismas não precisa competir seu brilho com a camada de prata da metalização. Entretanto, isso não é indicativo de uma maior retrorrefletividade (COLE, 2016). Segundo Pricone *et al.* (1986), quando os elementos retrorrefletivos são metalizados, a retrorrefletividade, em vez de apenas depender da reflexão interna total, é obtida por reflexão especular a partir dos lados espelhados. Além disso, geralmente, a metalização fornecerá uma coloração acinzentada ou preta sob certas condições de luz do dia, podendo reduzir a refletividade sob condições noturnas em comparação a elementos não metalizados (PRICONE *et al.*, 1986).

Figura 17 – Microprismas não metalizados



Fonte: Adaptado de Cole (2016).

Conforme Pricone *et al.* (1986), os termos "canto do cubo" ou "triédrico" ou "tetraédrico" são conhecidos como a forma com que o microprisma é desenvolvido, descrevendo a estrutura que consiste em três faces mutuamente perpendiculares, podendo mudar o tamanho, a forma das faces ou mesmo a orientação do eixo ótico do elemento de canto de cubo. A escolha dessa geometria depende das desejadas características de resposta reflexiva angular e das técnicas de formação de cubos empregadas.

Quanto à escolha dos tipos de películas retrorrefletivas a serem empregadas nas vias rodoviárias no território brasileiro, a norma NBR 14891 (ABNT, 2012) indica quais tipos de películas devem ser utilizadas conforme a característica da via onde vai ser implementada. A norma comenta que placas pintadas com tinta que não seja retrorrefletiva devem ser utilizadas somente para sinalização de pedestres e ciclovias fora da pista principal. O documento apresenta quatro tabelas que recomendam quais tipos de películas são indicadas para cada categoria de via, sendo elas divididas em: classes de rodovias 0, IA e IB; classes de rodovias II, III e IV; vias urbanas (ruas e avenidas acima de 80 km/h); e vias urbanas (ruas e avenidas de até 80 km/h). Da Tabela 11 à Tabela 14, são apresentadas as películas indicadas para cada uma das categorias de via.

Tabela 11 – Películas indicadas para as classes de rodovias O, IA e IB em relação ao tipo de sinal, ao tipo de via e à sua localização segundo a norma NBR 14891 (2012)

Tipo de sinal	Localização	Tipo de película (ABNT NBR 14644)							
		I-A/I-B	II	III	VII	VIII	IX	X	
Indicativas terrestres	Fundo	O	O	O	O	O	O	O	O
	Legenda	X	–	O	O	O	O	O	O
Regulamentação terrestre	Fundo/Orla	X	–	O	O	O	O	O	O
Advertência terrestre	Fundo	X	–	O	O	O	O	O	O
Delineadores de curvas	Seta	X	–	O	O	O	O	O	O
Advertência aérea	Fundo	X	–	–	–	–	–	O	O
Indicativas aéreas	Fundo	X	–	O	O	O	O	O	O
	Legenda	X	–	–	–	–	–	O	O
Regulamentação aérea	Fundo/Orla	X	X	–	–	–	–	O	O

O Deve ser utilizado

– Utilizado com restrição

X Não deve ser utilizado

Fonte: Adaptado da NBR 14891 (2012).

Tabela 12 – Películas indicadas para as classes de rodovias II, III e IV em relação ao tipo de sinal, ao tipo de via e à sua localização segundo a norma NBR 14891 (2012)

Tipo de sinal	Localização	Tipo de película (ABNT NBR 14644)							
		I-A/I-B	II	III	VII	VIII	IX	X	
Indicativas terrestres	Fundo	O	O	O	O	O	O	O	O
	Legenda	O	O	O	O	O	O	O	O
Regulamentação terrestre	Fundo/Orla	–	O	O	O	O	O	O	O
Advertência terrestre	Fundo	–	O	O	O	O	O	O	O
Delineadores de curvas	Seta	–	O	O	O	O	O	O	O
Advertência aérea	Fundo	X	–	O	O	O	O	O	O
Indicativas aéreas	Fundo	–	O	O	O	O	O	O	O
	Legenda	X	–	–	O	O	O	O	O
Regulamentação aérea	Fundo/Orla	X	–	–	O	O	O	O	O

O Deve ser utilizado

– Utilizado com restrição

X Não deve ser utilizado

Fonte: Adaptado da NBR 14891 (2012).

Tabela 13 – Películas indicadas para as vias urbanas (ruas e avenidas acima de 80 km/h) em relação ao tipo de sinal, ao tipo de via e à sua localização segundo a norma NBR 14891 (2012)

Para vias urbanas (ruas e avenidas acima de 80 km/h)								
Tipo de sinal	Localização	Tipo de película (ABNT NBR 14644)						
		I-A/I-B	II	III	VII	VIII	IX	X
Indicativas terrestres	Fundo	O	O	O	O	O	O	O
	Legenda	O	O	O	O	O	O	O
Regulamentação terrestre	Fundo/Orla	–	O	O	O	O	O	O
Advertência terrestre	Fundo	–	O	O	O	O	O	O
Delineadores de curvas	Seta	–	O	O	O	O	O	O
Advertência aérea	Fundo	X	–	O	O	O	O	O
Indicativas aéreas	Fundo	–	O	O	O	O	O	O
	Legenda	X	–	–	O	O	O	O
Regulamentação aérea	Fundo/Orla	X	–	–	O	O	O	O

O Deve ser utilizado

– Utilizado com restrição

X Não deve ser utilizado

Fonte: Adaptado da NBR 14891 (2012).

Tabela 14 – Películas indicadas para as vias urbanas (ruas e avenidas de até 80 km/h) em relação ao tipo de sinal, ao tipo de via e à sua localização segundo a norma NBR 14891 (2012)

Para vias urbanas (ruas e avenidas de até 80 km/h)								
Tipo de sinal	Localização	Tipo de película (ABNT NBR 14644)						
		I-A/I-B	II	III	VII	VIII	IX	X
Indicativas terrestres	Fundo	O	O	O	O	O	O	O
	Legenda	O	O	O	O	O	O	O
Regulamentação terrestre	Fundo/Orla	O	O	O	O	O	O	O
Advertência terrestre	Fundo	O	O	O	O	O	O	O
Delineadores de curvas	Seta	O	O	O	O	O	O	O
Advertência aérea	Fundo	X	–	O	O	O	O	O
Indicativas aéreas	Fundo	O	O	O	O	O	O	O
	Legenda	X	–	O	O	O	O	O
Regulamentação aérea	Fundo/Orla	X	–	O	O	O	O	O

O Deve ser utilizado

– Utilizado com restrição

X Não deve ser utilizado

Fonte: Adaptado da NBR 14891 (2012).

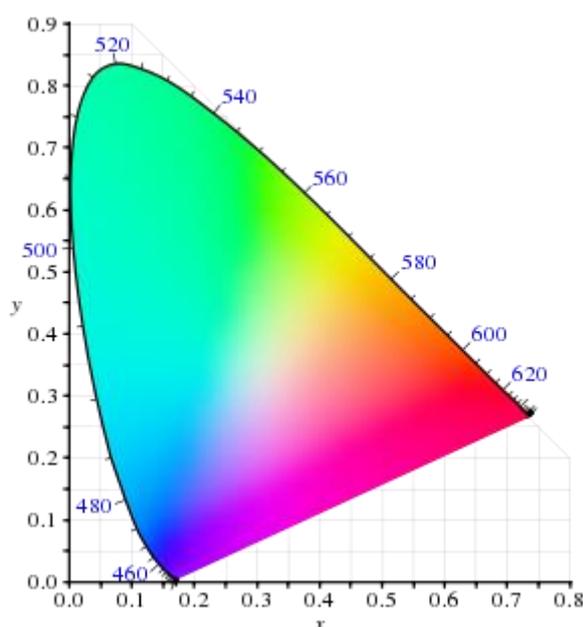
Entre a Tabela 11 e a Tabela 14, nota-se uma maior restrição na utilização da película tipo I e percebe-se que a norma fragmenta as películas de tipo I em IA e IB –

porém, essa caracterização não existe na norma NBR 14644 (2013). Entretanto, observa-se que, usualmente, é possível que o projetista escolha entre quatro ou mais opções, dependendo da função do sinal, ficando a critério dele definir qual dos tipos de películas aplicar. Sobre películas indicadas para uso com restrição, a norma comenta que essas películas não devem ser utilizadas quando há excesso de iluminação ambiente que possa competir com sinalização vertical, propondo sua utilização para vias rurais ou com pouca iluminação.

### 2.2.7.2 Cor

Segundo a norma 14644 (ABNT, 2013) as cores devem atender à cromaticidade diurna nos termos das coordenadas do padrão colorimétrico da CIE 1931. A CIE 1931 é um dos primeiros espaços de cores definido quantitativamente entre distribuições de comprimentos de onda no espectro visível eletromagnético e cores fisiologicamente percebidas na visão humana (WRIGHT, 2007). A Figura 18 apresenta o diagrama de cromaticidade, exigido por norma para que as cores das películas sejam atendidas.

Figura 18 – Diagrama de cromaticidade CIE 1931



Fonte: Adaptado de Agudo *et al.* (2014).

De acordo com a norma (ABNT, 2013), durante o dia, as cores das películas devem ter coordenadas dentro da área definida pelas coordenadas especificadas na Tabela 15. As cores azul e verde podem estender os limites até as extremidades do elo de cromaticidade.

Tabela 15 – Coordenadas de cromaticidade (diurna)

Cor	1		2		3		4	
	x	y	x	y	x	y	x	y
Branca	0,303	0,300	0,368	0,366	0,340	0,393	0,274	0,329
Amarela	0,498	0,412	0,557	0,442	0,479	0,520	0,438	0,472
Laranja	0,558	0,352	0,636	0,364	0,570	0,429	0,506	0,404
Verde	0,026	0,399	0,166	0,364	0,286	0,446	0,207	0,771
Vermelha	0,648	0,351	0,735	0,265	0,629	0,281	0,565	0,346
Azul	0,140	0,035	0,244	0,210	0,190	0,255	0,065	0,216
Marrom	0,430	0,340	0,610	0,390	0,550	0,450	0,430	0,390
Amarela lima-limão fluorescente	0,387	0,610	0,369	0,546	0,428	0,496	0,460	0,540
Amarela fluorescente	0,479	0,520	0,446	0,483	0,512	0,421	0,557	0,442
Laranja fluorescente	0,583	0,416	0,535	0,400	0,595	0,351	0,645	0,355

Fonte: Adaptado de ABNT (2013).

A Tabela 15 apresenta 4 pontos (coordenadas x e y) para serem inseridos na Figura 18, que geram uma área característica de cromaticidade o qual cada uma das cores, citadas na Tabela 15, deve possuir.

As cores têm grande influência nos valores de retrorrefletividade. Para o mesmo tipo de película, cores mais claras, como branco e amarelo, apresentam valores maiores de retrorrefletividade quando comparadas às cores azul e verde. As normas demonstram isso nos requisitos mínimos iniciais, de modo que películas com mesmo tipo e geometria apresentam valor maior no branco se confrontado com o azul (CEN, 2007; ABNT, 2013, ASTM, 2017).

### 2.2.7.3 Fatores ambientais

Ao longo do tempo, as películas de retrorrefletividade sofrem com agentes agressores, ocasionando a redução da medida de retrorrefletividade durante sua vida

útil. Supõe-se que esse processo de deterioração se dê pela exposição a intempéries ambientais, como umidade e chuva, além de se agravar com o fluxo dos carros, que emitem gases e lançam de sujeira nas placas.

A norma brasileira comenta brevemente sobre o assunto e, tentando evitar que as placas de sinalização vertical não cumpram sua função de fornecer informação e proporcionar segurança ao motorista, a NBR 14644 (ABNT, 2013) apresenta valores residuais de retrorrefletividade que as películas devem ter. Almeja-se, com isso, certificar-se de que ostentem boa durabilidade em condições de exposição ao ambiente (Tabela 16).

Tabela 16 – Retrorrefletividade residual em função do tempo

Tipo	Retrorrefletividade residual mínima (%)	Tempo (anos)
I	50	7
II	80	10
III	80	10
IV	-	12
V	-	12
VI	80	3
VII	80	10
VIII	80	10
IX	80	10
X	80	12 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> 10 anos para películas fluorescentes.

Fonte: Adaptado de NBR 14644 (ABNT, 2013).

Um estudo realizado no Canadá verificou que os efeitos de geada e orvalho afetam a sinalização vertical na sua capacidade retrorrefletiva. No estudo, foram analisados dois tipos de películas (Tipo I e III). Na película de tipo I, foram pesquisadas as cores branco, vermelho, amarelo, verde e azul; na de tipo III, as cores branco, vermelho, amarelo e verde. Mesmo que os efeitos de geada e orvalho tenham sido variáveis, os resultados encontrados foram reduções médias nos níveis de retrorrefletividade, respectivamente, de 79% e 60% (HILDEBRAND, 2003).

No que se refere às películas de tipo I, os valores de retrorrefletividade das diferentes cores – exceto a cor de fundo branca coberta de orvalho – não atenderam aos níveis mínimos propostos pela FHWA para quando a película estiver coberta por gelo ou orvalho. Por sua vez, a sinalização amostrada com películas do tipo III tiveram

resultados mistos. Quando coberta por orvalho, apenas uma cor verde demonstrou medidas abaixo dos requisitos mínimos finais. Quanto à geada, as películas de cores amarelas e verdes não atingiram os níveis mínimos propostos. Essas descobertas mostram-se significativas para o desenvolvimento de padrões que corrijam essas interferências.

Sobre a precipitação pluviométrica, McGee (2010) comenta que, normalmente, não é necessário fazer a limpeza da película de sinalização, pois a chuva periódica já auxilia na limpeza. Contudo, o autor comenta que, em localizações especiais, o acúmulo de sujeira, mofo ou bolor pode tornar a sinalização vertical menos visível. Os locais que são indicadas para a realização de limpeza na película são: sinalização vertical sob árvores, sinalização vertical em vias com tráfego intenso de caminhões, áreas com chuvas pouco frequentes e sinalização vertical perto de áreas industriais.

### **2.2.8 Modelos preditivos de retrorrefletividade de sinalização vertical**

Para garantir condições adequadas da sinalização vertical, agências de transportes exigem níveis mínimos de retrorrefletividade, os quais são estipulados por normas ou pelos próprios órgãos que sejam responsáveis pela via. No mercado, existem muitos produtos de películas diferentes, com níveis mínimos iniciais variados para serem escolhidos no momento da instalação das placas; entretanto, a maior preocupação dessas agências de trânsito é a durabilidade esperada para cada uma delas. Um método utilizado internacionalmente para a estimativa de vida útil de películas é a partir de modelos preditivos (BRIMLEY e CARLSON, 2013). A seguir, serão mostrados alguns modelos de previsão de retrorrefletividade apresentados em diferentes estudos.

#### *2.2.8.1 Jenkins e Gennaoui (1990)*

Jenkins e Gennaoui (1990) desenvolveram um dos primeiros modelos preditivos para sinalização vertical. Nele, foi avaliado, em todos os seis estados da Austrália, o desempenho de 2.144 películas em função do tempo, em serviço. O estudo mostra dois tipos de películas padronizadas pela norma Australiana número 1906.1 (AS/NZS, 2007), como Classe 1 e Classe 2. De acordo com Brimley e Carlson

(2013), essas classes são equivalentes ao tipo III e ao tipo I da norma americana (ASTM, 2019), respectivamente.

Os autores verificaram, ainda, se diferentes orientações das películas tinham efeitos sobre os valores de retrorrefletividade. Eles acreditavam que a película virada para o norte (face virada para a linha do equador na Austrália) atingiria uma maior deterioração; porém, essa diferença não foi encontrada, mas foi verificado que isso ocorria em películas mais próximas de áreas industriais (JENKINS; GENNAOUI, 1990). Foram gerados modelos para as cores branca, amarela e verde do tipo I e branco e vermelho do tipo III, conforme é apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 – Modelos desenvolvidos por Jenkins e Gennaoui (1990)

Cor	Tipo (ASTM, 2019)	Modelo preditivo	R <sup>2</sup>
Branco	I	$R_A = 116 - 5,62x(\text{Ano})$	*
Amarelo	I	$R_A = 96 - 5,07x(\text{Ano})$	*
Verde	I	$R_A = 22 - 1,02x(\text{Ano})$	*
Branco	III	$R_A = 294 - 4,05x(\text{Ano})$	*
Vermelho	III	$R_A = 16 + 3,1x(\text{Ano})$	*

\*Não foi apresentado o valor do R<sup>2</sup> no estudo.

Fonte: Autor.

#### 2.2.8.2 Black et al. (1991)

Black et al. (1991) avaliaram películas empregadas em sinalização vertical de 17 diferentes estados dos Estados Unidos da América, totalizando uma amostra de 5.722 placas. Os autores analisaram películas de cores branca, amarela, vermelho e verde para os tipos I e III (ASTM, 2019). Com o número expressivo de amostras, os pesquisadores verificaram fatores como tempo de exposição, precipitação pluviométrica, altitude, “*heating degree days*”, orientação e radiação solar se afetavam a deterioração das películas. O termo “*heating degree days*”, de tradução literal “graus de aquecimento dias”, é uma medida utilizada internacionalmente que condiz com a temperatura necessária para aquecer um edifício. Desses fatores verificados, a orientação da sinalização e a radiação solar não demonstraram ser variáveis significantes em relação aos modelos de retrorrefletividade, mas outros fatores citados foram expressivos. Na Tabela 18, são apresentados os seus modelos lineares em função do tempo.

Tabela 18 – Modelos desenvolvidos por Black et al (1991)

Cor	Tipo (ASTM, 2019)	Modelo preditivo	R <sup>2</sup>
Branco	I	$R_A = 115 - 4,85x(\text{Ano})$	0,52
Amarelo	I	$R_A = 88,2 - 3,39x(\text{Ano})$	0,39
Vermelho	I	$R_A = 22,9 - 0,95x(\text{Ano})$	0,21
Verde	I	$R_A = 16,3 - 0,56x(\text{Ano})$	0,31
Branco	III	$R_A = 311 - 4,61x(\text{Ano})$	0,19
Amarelo	III	$R_A = 246,4 - 3,21x(\text{Ano})$	0,31
Vermelho	III	$R_A = 38,7 + 0,61x(\text{Ano})$	0,17
Verde	III	$R_A = 55,2 - 1,82x(\text{Ano})$	0,48

Fonte: Autor.

### 2.2.8.3 Bischoff e Bullock (2002)

Em estudo desenvolvido no estado de Indiana, nos Estados Unidos da América, nos anos de 2001 e 2002, foi verificado o valor de retrorrefletividade de 1.341 placas de sinalização em serviço considerando o tempo de exposição. Nesse estudo, foram efetuadas medições antes e depois da limpeza da película utilizando uma esponja seca; contudo, a pesquisa só apresenta o modelo com a média dos valores para as medidas antes da limpeza. A comparação dos valores pré e pós limpeza ficou apenas para os modelos com as menores medidas realizadas, não tendo mostrado, a partir dos modelos gerados, diferença significativa entre eles.

Assim como Black *et al.* (1991) e Jenkins e Gennaoui (1990), os autores analisaram a orientação dos sinais de trânsito. No entanto, houve um aumento notável na variabilidade de retrorrefletividade somente das películas vermelhas com face virada para o sul (face virada para a linha do equador nos Estados Unidos). Todas as películas examinadas eram do tipo III (ASTM, 2019), e os modelos apresentados na Tabela 19 referem-se às cores branca, amarela e vermelha (BISCHOFF E BULLOCK, 2002).

Tabela 19 – Modelos desenvolvidos por Bischoff e Bullock (2002)

Cor	Tipo (ASTM, 2019)	Modelo preditivo	R <sup>2</sup>
Branco	III	$R_A = 253,71 - 0,86x(\text{Ano})$	0,02
Amarelo	III	$R_A = 222,47 - 3,58x(\text{Ano})$	0,19

(continua)

			(conclusão)
Cor	Tipo (ASTM, 2019)	Modelo preditivo	R <sup>2</sup>
Vermelho	III	$R_A = 51,84 - 2,03x(\text{Ano})$	0,32

Fonte: Autor.

#### 2.2.8.4 Wolshon et al. (2002)

Wolshon et al. (2002) avaliaram a retrorrefletividade de 237 sinalizações verticais em serviço das cores branca, amarela e verde de tipos I e III (ASTM). Os autores geraram dois modelos das médias medidas em campo, sendo um modelo para medidas antes e outro para medidas após a lavagem das películas. Os pesquisadores ainda avaliaram a distância entre o bordo externo da faixa de rolamento e a orientação da placa, demonstrando não ser estatisticamente representativo nos modelos. Brimley e Carlson (2013) mostram esses modelos apenas com o tempo como variável. Na Tabela 20, são exibidos os modelos preditivos para as películas pré e pós lavagem ajustados por eles.

Tabela 20 – Modelos desenvolvidos por Wolshon et al. (2002)

Pré-limpeza			
Cor	Tipo (ASTM, 2019)	Modelo preditivo	R <sup>2</sup>
Branco	I	$R_A = 89,2 - 6,41x(\text{Ano})$	*
Amarelo	I	$R_A = 61,7 - 2,73x(\text{Ano})$	*
Verde	I	$R_A = 12,9 - 0,57x(\text{Ano})$	*
Branco	III	$R_A = 297,7 - 6,78x(\text{Ano})$	*
Amarelo	III	$R_A = 246,1 - 9,81x(\text{Ano})$	*
Verde	III	$R_A = 48 - 0,42x(\text{Ano})$	*
Pós lavagem			
Cor	Tipo (ASTM, 2019)	Modelo preditivo	R <sup>2</sup>
Branco	I	$R_A = 101,7 - 6,10x(\text{Ano})$	*
Amarelo	I	$R_A = 72 - 2,59x(\text{Ano})$	*
Verde	I	$R_A = 15,9 - 0,62x(\text{Ano})$	*
Branco	III	$R_A = 317,9 - 3,66x(\text{Ano})$	*
Amarelo	III	$R_A = 279,7 - 10,06x(\text{Ano})$	*
Verde	III	$R_A = 61,8 - 0,75x(\text{Ano})$	*

\*Não foi apresentado o valor do R<sup>2</sup> no estudo.

Fonte: Autor.

### 2.2.8.5 Rasdorf et al. (2006)

Rasdorf et al. (2006) mediram, em 2005 e 2006, a retrorrefletividade de 1.047 sinalizações verticais localizadas no estado da Carolina do Norte, nos Estados Unidos da América. Os modelos criados são compostos pelas cores branca, amarela, vermelha e verde, dos tipos I e III (ASTM). Para cada conjunto de medidas das quatro cores e dos dois tipos de películas, foram elaboradas diferentes equações para representar os modelos de previsão, como a linear, a logarítmica, a polinomial, a potência e a exponencial. Além disso, eles ranquearam as curvas pelo melhor  $R^2$ . Na Tabela 21, está representado o melhor modelo encontrado por Rasdorf et al. (2006), visto que, quando os modelos empataram no ranqueamento, foi escolhido o modelo linear.

Tabela 21 - Modelos desenvolvidos por Rasdorf et al. (2006)

Cor	Tipo (ASTM, 2019)	Modelo preditivo	$R^2$
Branco	I	$R_A = 68,8 - 1,41x(\text{Ano})$	0,106
Amarelo	I	$R_A = 62,7 - 2,04x(\text{Ano})$	0,217
Vermelho	I	$R_A = 13,1 - 0,63x(\text{Ano})$	0,368
Verde	I	$R_A = 13,3 - 0,45x(\text{Ano})$	0,266
Branco	III	$R_A = 262,6 - 0,71x(\text{Ano})$	0,012
Amarelo	III	$R_A = 216,4 + 1,27x(\text{Ano}) - 0,251x(\text{Ano})^2$	0,085
Vermelho	III	$R_A = 59,63 - 2,66x(\text{Ano})$	0,346
Verde	III	$R_A = 52 + 4,24x(\text{Ano}) - 0,81x(\text{Ano})^2$	0,481

Fonte: Autor.

### 2.2.8.6 Kipp e Fitch (2009)

No estado Vermont, nos Estados Unidos da América, Kipp e Fitch (2009), a partir de uma amostra de 398 placas sinalização em serviço do tipo III e 220 do tipo IX, desenvolveram modelos de previsão de retrorrefletividade das cores branco, amarelo, vermelho e verde de tipo III (ASTM) e amarela e verde-limão de tipo IX (ASTM). Assim, como visto nos estudos anteriores, os autores verificaram fatores como orientação e distância da película em relação à via, não havendo diferença significativa nos valores. Mesmo que as películas viradas de face para o norte tenham tido maior retrorrefletividade do que as viradas para o sul, eles comentam que, pelo

número pequeno de amostras (8 para o sul e 14 para o norte), essa diferença de desempenho não parece ser considerável. Na Tabela 22, estão exibidos os modelos preditivos.

Tabela 22 - Modelos desenvolvidos por Kipp e Fitch (2009)

Cor	Tipo (ASTM, 2019)	Modelo preditivo	R <sup>2</sup>
Branco	III	$R_A = 1054,5x(\text{Ano})^{(-0,355)}$	0,13
Amarelo	III	$R_A = 525,81 - 78,83x\text{Ln}(\text{Ano})$	0,128
Vermelho	III	$R_A = 72,89 - 0,36x(\text{Ano})$	0,027
Verde	III	$R_A = 159,47x(\text{Ano})^{(-0,204)}$	0,038
Amarelo	IX	$R_A = 310,74x\text{EXP}(-0,0016x\text{Ano})$	0,016
Verde-limão	IX	$R_A = 484,59x\text{EXP}(-0,002x\text{Ano})$	0,028

Fonte: Autor.

#### 2.2.8.7 Carlson et al. (2012)

Pesquisa realizada por Carlson *et al.* (2012) mediu a retrorrefletividade de 859 placas de sinalização vertical em serviço localizadas em sete regiões do estado do Texas, no ano de 2009. O estudo, patrocinado pela *Texas Transportation Institute* (TTI), gerou modelos nas cores branca, amarela e vermelha do tipo III (ASTM). Na Tabela 23, são apresentados os modelos gerados no estudo.

Tabela 23 - Modelos desenvolvidos por Carlson et al. (2012)

Cor	Tipo (ASTM, 2019)	Modelo preditivo	R <sup>2</sup>
Branco	III	$R_A = 265 - 6,2x(\text{Ano})$	0,1
Amarelo	III	$R_A = 251 - 6,8x(\text{Ano})$	0,2
Vermelho	III	$R_A = 52 - 1x(\text{Ano})$	0,1

Fonte: Autor.

Assim como alguns autores anteriores, Carlson *et al.* (2012) verificaram as medidas de retrorrefletividade em relação às diferentes orientações, não tendo sido encontrada nenhuma forte relação entre esses dois fatores. Contudo, quanto aos modelos gerados, foi encontrado fator significativo em relação às diferentes

localizações do estado do Texas em que as placas de sinalização vertical se encontravam e a idade dela para a maioria dos modelos.

Destaca-se, ainda, que todas as equações apresentadas possuem coeficientes de determinação ( $R^2$ ) abaixo de 0,5, demonstrando o quanto é difícil prever valores de retrorrefletividade ao longo do tempo a partir de modelos preditivos.

## 2.3 LIMITES FINAIS DE RETRORREFLETIVIDADE APLICADOS NO BRASIL

Neste item, será apresentado o modo como diferentes órgãos rodoviários brasileiros estipulam os requisitos mínimos finais aceitos de retrorrefletividade e condições de limpeza das sinalizações verticais usadas.

### 2.3.1 ANTT – 1º etapa de concessões

A Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) é uma autarquia federal brasileira responsável por regular, supervisionar e fiscalizar as atividades de prestação de serviços e de exploração da infraestrutura de transportes exercidas por terceiros. Para que haja a garantia da execução, conservação e manutenção das rodovias, a agência criou o Programa de Exploração da Rodoviária (PER), com o intuito de especificar todas as condições para execução do contrato. O documento define todos os serviços e obras a serem realizadas pela concessionária durante o período da concessão e, dentro desses serviços, estão a conservação, a manutenção e o monitoramento das sinalizações verticais, foco deste estudo. Atualmente, a ANTT controla 20 concessões de rodovias, totalizando aproximadamente 9.697 km, dividindo-se em quatro etapas de concessão. A quarta etapa de concessão teve início no dia 11 de janeiro de 2019.

A primeira etapa de concessões, iniciada em 1994, é composta por seis trechos, que são: CCR Ponte (1995-2015), CONCEPA (1997-2017), CONCER (1996-2021), CRT (1996-2021), ECOSUL (1998-2026) e Nova Dutra (1996-2021). A primeira etapa demonstra uma restrição de informação sobre a conservação e a manutenção da sinalização viária vertical. Somente uma delas apresentou, no seu PER, índices mínimos finais de retrorrefletividade, a ECOSUL, limitando o índice de 80 **mcd/lx.m<sup>2</sup>**. Todavia, o valor em microcandelas por lux por metro quadrado é equivocado e usado em valores de retrorrefletância em sinalização horizontal. Essa medida, quando

comparada aos valores medidos para sinalização vertical, é pequena, pois normalmente a unidade seria em candela por lux por metro quadrado, mil vezes maior. As outras concessões até comentam do uso refletômetro portátil; entretanto, não são abordados os requisitos mínimos finais. Já a limpeza das placas é comentada por todas as concessões; entretanto, a frequência em que elas deveriam ser limpas não é comentada com clareza.

### 2.3.2 ANTT – 2º etapa de concessões

A segunda etapa de concessões, iniciada em 2007, é composta por 8 trechos, que são: Autopista Fernão Dias (2008-2033), Autopista Fluminense (2008-2033), Autopista Litoral Sul (2008-2033), Autopista Planalto Sul (2008-não informado), Autopista Régis Bittencourt (2008-2033), Rodovia do Aço (2008-2033), Rodovia Transbrasiliana (2008,2033) e Via Bahia (2009-2034). Nessa etapa, não houve avanço no método de avaliação das sinalizações verticais. Todas as concessões utilizam o mesmo plano de manutenção das sinalizações, indicando um valor mínimo de **80 mcd/lx.m<sup>2</sup>** na fase inicial (até o 6º mês da concessão) e, após esse prazo, deverão ser cumpridos os limites de:

- 120 **mcd/lx.m<sup>2</sup>** em, no mínimo, 30% da rodovia, no final do 1º ano;
- 120 **mcd/lx.m<sup>2</sup>** em, no mínimo, 50% da rodovia, no final do 2º ano;
- 120 **mcd/lx.m<sup>2</sup>** em, no mínimo, 70% da rodovia, no final do 3º ano;
- 120 **mcd/lx.m<sup>2</sup>** em, no mínimo, 85% da rodovia, no final do 4º ano;
- 120 **mcd/lx.m<sup>2</sup>** em 100% da rodovia, no final do 5º ano;

Percebe-se que os erros foram mantidos em relação à unidade de medida e que, nesta 2º etapa, continua com a ausência de diferenciação entre cores e tipos de películas. Contudo, vale observar que, no ano das concessões, a norma NBR 14644 (ABNT, 2013), a que especifica os requisitos mínimos iniciais para qualificação e aceitação das películas, já havia sido publicada, pois teve seu primeiro exemplar publicado em 2001. A respeito da limpeza das sinalizações verticais, todos os PERs comentam que devem ser realizadas periodicamente até o fim da concessão, mas a frequência não é mencionada.

### **2.3.3 ANTT – 3º etapa de concessões**

A terceira etapa de concessões, iniciada em 2013, é composta por 8 malhas: CONCEBRA (2014-2044), ECO101 (2013-2038), Concessionária de Rodovias Galvão BR-153 (2014-2044), MGO Rodovias (2014-2044), MS VIA – Concessionária de Rodovia Sul-Matogrossense S. A. (2014-2044), Rota do Oeste (2014-2044), Via 040 (2014-2044) e ECOPONTE (2015-2045).

Nesta etapa, já há a inserção da norma NBR 14644 (ABNT, 2013) como base nos requisitos mínimos finais para avaliação do desempenho da sinalização viária vertical no PER. A avaliação do requisito final assume valores percentuais em relação aos requisitos iniciais da norma NBR 14644 (ABNT, 2013). Todas as concessões fazem uso da norma, e os valores exigidos devendo ser alcançados de forma gradual. Por exemplo: a concessão Via 040 utiliza índice mínimo final de 80% do valor inicial da NBR 14644 (ABNT, 2013) nos primeiros 9 meses de concessão para as películas tipo II, III-A, III-B e III-C e 50% do valor inicial para as películas tipo I-A, I-B e IV. A partir de 36 meses, é aceito o índice mínimo final de 85% do valor inicial para 50% das películas de sinalização vertical da rodovia e, depois, em 60 meses, para a mesma porcentagem do valor inicial para 100% das placas da rodovia. Vale observar que esses tipos de películas, como I-A, I-B, III-A, III-B e III-C, não são encontrados na norma de sinalização vertical atual; porém, I-A e I-B constavam no documento de 2007, mas foram retiradas no documento de 2013 (ABNT, 2007; ABNT, 2013). Com relação à limpeza, assim como nas etapas anteriores de concessões, ela é mencionada no documento, mas sem indicar periodicidade.

### **2.3.4 ANTT – 4º etapa de concessões**

Na quarta e última etapa de concessões rodoviárias dos trechos, iniciada em 2018, há, por enquanto, apenas de dois contratos: a ViaSul (2019-2049), para as rodovias BR-101/290/386/448/RS; e Ecovias do Cerrado, para as rodovias BR-364/365/MG/GO. As duas concessões mantêm os preceitos dos contratos da terceira etapa, a qual fez uso de porcentagens dos valores iniciais da norma NBR 14644 (ABNT, 2013) como parâmetro mínimo para substituição das películas utilizadas em sinalização vertical até o final da concessão, utilizando um tipo inexistente na norma brasileira NBR 14644 (ABNT, 2013). As PE's das duas concessões são semelhantes

para os parâmetros mínimos finais de substituição. A Tabela 24 exibe os parâmetros encontrados na PER da ViaSul, apresentada de forma idêntica na PER da Ecovias do Cerrado.

Tabela 24 – Parâmetros de desempenho em sinalização vertical pelo contrato da ViaSul

Parâmetros de desempenho	Prazo de atendimento/fase					
	Recuperação				Manutenção	
	Trabalhos iniciais			Recuperação		
	6 meses	9 meses	12 meses	36 meses	60 meses	360 meses
Ausência de sinalização vertical e aérea com índice de retrorrefletância inferior ao especificado na NBR 14.644, sendo o índice mínimo de:			80% do valor inicial para as películas tipo II, III-A, III-B, III-C e 50% do valor inicial para as películas tipo I-A, I-B e IV.	85% do valor inicial para as películas das placas para 50% das placas da rodovia.	85% do valor inicial para as películas das placas para 100% das placas da rodovia	

Fonte: Adaptado do programa de exploração da rodovia da ViaSul (ANTT, 2018).

### 2.3.5 BR-LEGAL

O Departamento Nacional de Infraestrutura em Transporte (DNIT) publicou, em janeiro de 2015, um documento com a finalidade de orientar e padronizar as atividades pertinentes à execução do Programa Nacional de Segurança e Sinalização Rodoviária – BR-LEGAL. Elas são realizadas pela Superintendências Regionais do DNIT nos estados ou através da Coordenação-Geral de Operações Rodoviárias – CGPERT. Em relação à substituição da sinalização vertical, o documento exige o atendimento da norma e dos requisitos mínimos de retrorrefletividade, da norma NBR 15426 (ABNT, 2013), que garantam a condição de segurança viária; contudo, a norma não especifica nenhum valor mínimo de retrorrefletividade. Em relação à limpeza, o documento exige que todo o procedimento de manutenção seja executado mensalmente, incluindo a limpeza das placas de sinalização vertical e aérea.

### **2.3.6 Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP)**

No estado de São Paulo, há a Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP), que é uma autarquia semelhante à ANTT, entretanto em nível estadual. Caracteriza-se como uma entidade autônoma descentralizada da administração pública, atuante no estado de São Paulo. A ARTESP possui como objetivo principal regularizar e fiscalizar os serviços de transporte rodoviário prestados pelas concessionárias do estado de São Paulo por meio do Programa de Concessões Rodoviárias do Estado de São Paulo.

No que concerne à sinalização vertical, de acordo com o documento que apresenta serviços correspondentes às funções de conservação da ARTESP (DERSP, 2006), ela deve assegurar medidas de retrorrefletividade conforme as normas da ABNT para requisitos mínimos de retrorrefletividade; porém, não é mencionado qual delas o avaliador deva utilizar. A norma NBR 14891 (ABNT, 2012) exibe uma tabela igual à Tabela 16, em relação aos requisitos mínimos residuais; porém, como também é notado na norma NBR 14644 (ABNT, 2013), o documento não deixa claro ao leitor se o parâmetro apresentado é usado para substituição da película ou que os valores das películas, ao serem implantadas, devem respeitar como durabilidade. A Tabela 16 apresenta o parâmetro em função do tempo de exposição, o que deixa a interpretação confusa, já que não fica claro se, após passado esse tempo de exposição, ainda se utiliza a mesma porcentagem de perda como parâmetro mínimo aceito em serviço ou se a película deveria ser substituída.

Outro ponto a ser comentado é sobre a forma como os órgãos brasileiros fazem a substituição das películas retrorrefletivas, que é apenas de acordo com a porcentagem do valor inicial de norma. Essa não parece ser a forma coerente de realizar a substituição, visto que, nos Estados Unidos da América, leva-se em conta a função da película, a cor da película, o tamanho de placa e o local onde ela é montada (aérea ou lateral) e o contraste entre as cores da placa.

Por exemplo, em uma situação hipotética: para uma película instalada em serviço de cor branca, em uma suposta via que se possa utilizar qualquer tipo de película, se o projetista escolher colocar uma película tipo I (NBR 14644) de valor inicial de 70 cd/lx.m<sup>2</sup>, ela só deverá ser substituída quando tiver seu valor abaixo de 59,5 cd/lx.m<sup>2</sup>, levando em conta que o órgão use como parâmetro mínimo final 85%

do valor inicial de norma. Em contraponto, se o projetista escolher entre uma película de tipo X (NBR 14644), cujo valor inicial de norma é  $520 \text{ cd/lx.m}^2$ , a sua substituição ocorrerá quando se encontrar abaixo de  $442 \text{ cd/lx.m}^2$ . Esse exemplo mostra que uma película de cor branca tipo X é disfuncional com valores menores do que  $442 \text{ cd/lx.m}^2$ , e a tipo I, acima de  $59,5 \text{ cd/lx.m}^2$ , respeita todas as funções como película retrorrefletiva. Mostra-se que a substituição da película não leva em conta o quanto ela possui de retrorrefletividade em campo, ou mesmo se a quantidade de retrorrefletividade proposta é suficiente para que o motorista perceba a sinalização vertical, ficando somente o critério do seu valor inicial.

Em se tratando da limpeza das placas, é indicado que ela seja realizada em um intervalo de no máximo quatro meses, e ela é executada através da utilização de jato d'água com alta pressão e lavagem com detergente e materiais apropriados.

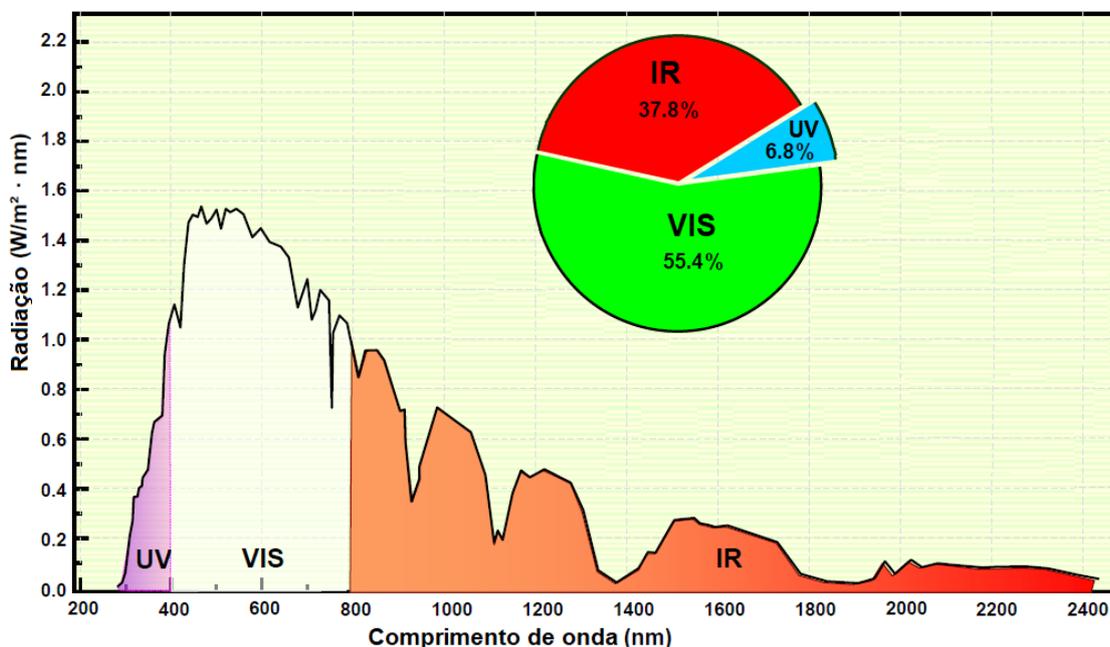
## 2.4 RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL

De acordo com McGreer (2003), a energia que radia do sol é composta de fótons que viajam através do espaço na forma de ondas. Parte dessa onda de fótons atinge a superfície da Terra com diferentes comprimentos de onda, os quais, normalmente, são constituídos entre 295 e 3000 nanômetros.

Ainda conforme o autor, esse comprimento de onda que chega à superfície terrestre usualmente é dividido em três principais intervalos de comprimento: ultravioleta, visível e infravermelho (Figura 19). O intervalo de comprimento entre 295 e 400 nanômetros é denominado de ultravioleta e constitui cerca de 4 a 7% da radiação solar global. O intervalo de comprimento de onda da radiação ultravioleta consiste em um intervalo maior, de aproximadamente 100 a 400 nm, dividindo-se em três faixas de comprimento de onda: UVA (315-400nm), UVB (280-315nm) e UVC (100-280nm). Contudo, a camada de ozônio na atmosfera absorve e elimina basicamente toda radiação abaixo dos 295nm. Apenas a radiação UVA e UVB entram em contato com a superfície terrestre, onde aproximadamente 99% é composta da faixa UVA.

A luz visível está no intervalo de comprimento de onda entre 400 a 800nm, compondo cerca da metade da proporção total de radiação que atinge a Terra, e o infravermelho, está entre 800 e 2450nm, constituindo aproximadamente 40% da radiação solar global (MCGREER, 2003).

Figura 19 – Espectro eletromagnético da radiação solar



Fonte: Adaptado Atlas (2017).

Entretanto, tanto as medidas de proporção da radiação total na Terra quanto o intervalo de comprimento podem variar conforme a literatura utilizada. Neste estudo, serão utilizadas medidas de referência segundo a Comissão Internacional de Iluminação (CIE). Com base na CIE 085-1989 (1989), são apresentadas, na Tabela 25, as proporções em relação aos três principais intervalos de comprimentos que atingem a Terra.

Tabela 25 – Proporções de radiação solar entre os três de intervalos de comprimento de onda

Nome do intervalo	Intervalo de comprimento de onda (nm)	% da radiação solar
Ultravioleta (UV)	295 - 400	6,8
Visível (VIS)	400 - 800	55,4
Infravermelho (IR)	800 - 2450	37,8

Fonte: Adaptado CIE Pub. 85 (1989).

### 3 MÉTODOS E TÉCNICAS

Neste capítulo, serão detalhados os procedimentos metodológicos empregados para o cumprimento dos objetivos delineados para este estudo.

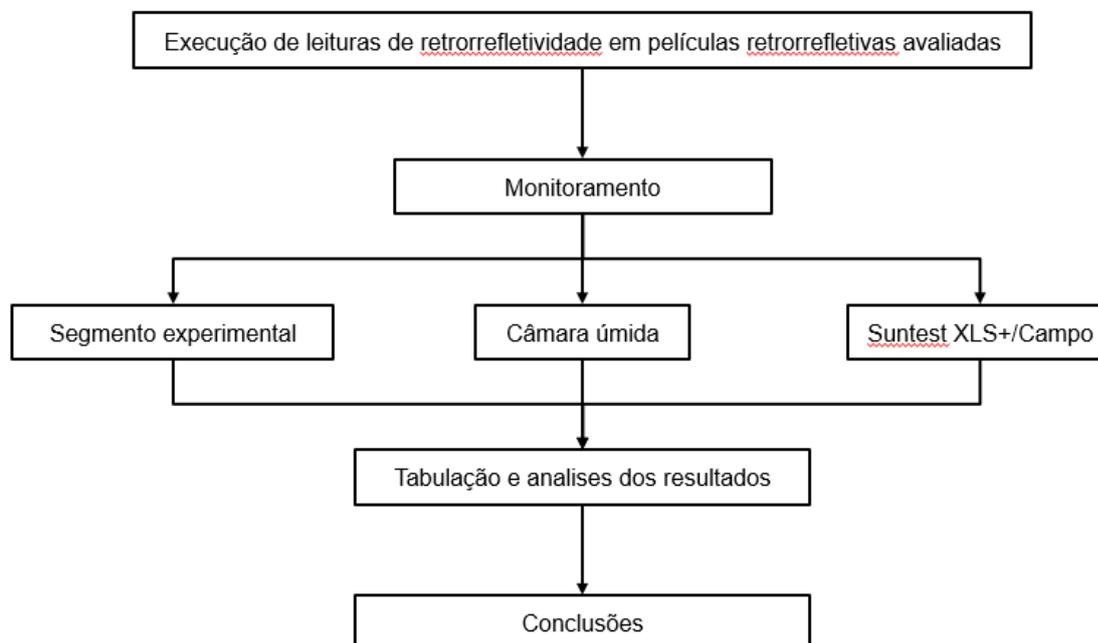
#### 3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

Para com cumprir o objetivo geral, o Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV) vem gerando, desde 2013, um banco de dados de medidas de retrorrefletividade de películas de sinalização vertical colocadas em placas instaladas em segmento experimental. O intuito é desenvolver análises de desempenho das películas.

Concomitantemente às medidas realizadas no segmento experimental, foram realizados outros processos de avaliação, visando verificar, de forma isolada, o desempenho das películas frente à umidade, à precipitação pluviométrica e à irradiação solar.

A partir dos dados obtidos, foram efetuadas análises estatísticas acerca dos dados, verificando quais dos fatores estudados foram significativos ou não para a redução da retrorrefletividade das películas. A Figura 20 exhibe um fluxograma que sintetiza como foram executadas as tarefas para o atendimento dos objetivos desta dissertação.

Figura 20 – Fluxograma resumido das atividades do estudo



Fonte: Autor.

### 3.2 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

O equipamento utilizado para as medições nos experimentos desta pesquisa foi o RetroSign GR3 (Figura 21), fabricado pela empresa dinamarquesa Delta. O instrumento realiza a medição seguindo os padrões da norma NBR 15426 (2013), com o ângulo de entrada de  $-4^\circ$  e ângulo de observação de  $0,2^\circ$ ,  $0,5^\circ$ ,  $1,0^\circ$ . Para as medições do trabalho, são usados o ângulo de observação de  $0,2^\circ$  como padrão para avaliação.

O aparelho mede valores de retrorefletividade ( $R_A$ ) de materiais retrorefletivos utilizados somente em sinalização vertical, como descrito na seção 2.2.2.5. A medição consiste na relação entre o coeficiente de intensidade luminosa ( $R_L$ ) de uma superfície retrorefletiva plana e sua área ( $A$ ), cuja unidade de medida é expressa em candelas lux por metro quadrado ( $cd/lx.m^2$ ). Esse aparelho pode captar valores entre 0 e 1999  $cd/lx.m^2$ .

Figura 21 – Equipamento RetroSign GR3



Fonte: Autor.

Segundo o manual do aparelho (DELTA, 2012), ele opera com uma reprodutibilidade igual a  $\pm 5\%$  e uma repetitividade de  $\pm 2\%$ . A repetitividade do equipamento significa a variação verificada quando um mesmo operador mede o mesmo elemento (película, como no caso da retrorrefletividade) várias vezes; já a reprodutibilidade seria variação encontrada com a variação dos operadores.

### 3.3 DESCRIÇÃO DO SEGMENTO EXPERIMENTAL

Neste item, será apresentado o segmento em que foram colocadas as placas de sinalização vertical para a avaliação ao desempenho da retrorrefletividade, situado na cidade de Santa Maria/RS.

#### 3.3.1 Segmento experimental em Santa Maria/RS

O segmento experimental monitorado pelo GEPPASV, da Universidade Federal de Santa Maria/RS, teve sua implantação no dia 23 de novembro de 2013. A implantação teve auxílio das unidades do DNIT de Santa Maria/RS e Cruz Alta/RS, as quais viabilizaram todos os materiais da sinalização vertical e de implantação.

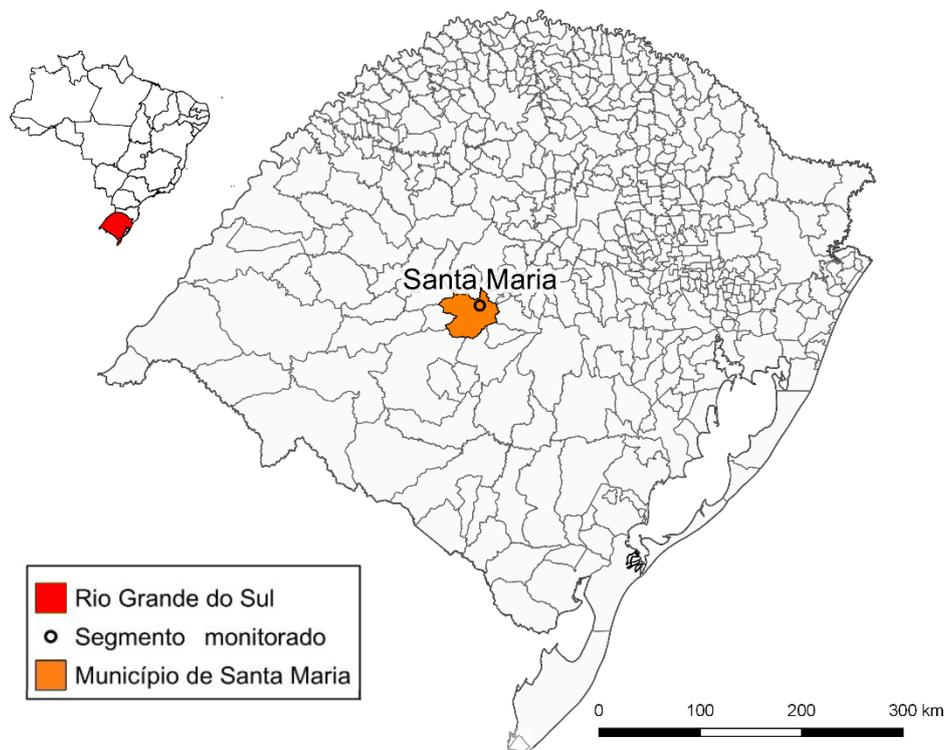
A partir dessa data, foi realizada a coleta dos dados de retrorrefletividade,

sendo produzidos três trabalhos de conclusão de curso: Martins (2016), Garcia (2016) e Silva (2018). Este trabalho deu sequência a esses estudos, aprofundando sua análise e seu desenvolvimento metodológico. O segmento experimental se localiza na região central do estado do Rio Grande do Sul, na cidade de Santa Maria/RS (Figura 22).

O conjunto de placas de sinalização vertical expostas ao ambiente tem como finalidade simular, da forma mais aproximada possível, o modo como, geralmente, as películas de sinalização vertical estão colocadas em serviço. Essas películas são submetidas a intempéries climáticas, como radiação solar, precipitação pluviométrica, umidade e temperatura, e a fatores como poeira e poluição lançada pelos automóveis que trafegam.

A bateria de placas de Santa Maria está situada na Avenida Roraima, na saída da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), aproximadamente na latitude  $29^{\circ}42'36.8''S$  e longitude  $53^{\circ}42'59.2''W$ , com suas películas viradas para o sul. O segmento possui um fluxo contínuo de tráfego, formado, em grande parte, por veículos de passeio e ônibus. O segmento está localizado próximo à guarita de segurança, a fim de que tentar evitar ou mesmo mitigar a depreciação das placas de trânsito.

Figura 22 – Localização dos segmentos monitorados nos municípios de Santa Maria/RS



Fonte: Autor.

As placas estão organizadas em quatro cores (amarelo, branco, verde e vermelho) e em três tipos de película (tipos I, III e X), segundo a NBR 14644 (ABNT, 2013). Esse padrão é duplicado para que haja limpeza de um exemplar de cada dupla, totalizando 24 placas (Figura 23). A marca de películas do segmento é da empresa 3M, cujas películas Tipo I são de microesfera de vidro e a Tipo III e Tipo X são microprismáticas.

Figura 23 – Segmento com as 24 placas do segmento experimental



Fonte: Autor.

O ordenamento do posicionamento das placas no segmento experimental está exposto na Tabela 26.

Tabela 26 – Caracterização da sequência das placas no segmento

(continua)			
Ordenamento	Cor	Tipo de película (NBR 14644)	Limpeza
1	Vermelho	I	Não
2	Vermelho	I	Sim
3	Vermelho	X	Não
4	Vermelho	X	Sim
5	Vermelho	III	Não
6	Vermelho	III	Sim
7	Amarelo	I	Não
8	Amarelo	I	Sim
9	Amarelo	X	Não
10	Amarelo	X	Sim
11	Amarelo	III	Não
12	Amarelo	III	Sim
13	Verde	I	Não

Ordenamento	Cor	Tipo de película (NBR 14644)	(conclusão)
			Limpeza
14	Verde	I	Sim
15	Verde	X	Não
16	Verde	X	Sim
17	Verde	III	Não
18	Verde	III	Sim
19	Branca	I	Não
20	Branca	I	Sim
21	Branca	X	Não
22	Branca	X	Sim
23	Branca	III	Não
24	Branca	III	Sim

Fonte: Autor.

Exibe-se, na Tabela 27, um resumo dos valores de retrorrefletividade mínimos iniciais das películas analisadas neste estudo para a geometria de avaliação de ângulo de observação de 0,2° e ângulo de entrada de -4°, padronizados pela norma NBR 14644 (2013).

Tabela 27 – Resumo dos valores mínimos iniciais de retrorrefletividade para as películas analisadas neste estudo segundo a NBR 14644 (2013)

Tipo de película NBR 14644	Coeficiente mínimo de retrorrefletividade <sup>1</sup>				
	Vermelho	Amarelo	Verde	Branco	Azul
Tipo I	14	50	9	70	4
Tipo III	65	270	50	360	30
Tipo X	106	395	52	520	26

Fonte: Autor

### 3.4 DADOS METEREOLÓGICOS

Para o suporte da pesquisa, fez-se uso do site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), órgão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, que possibilitou obter informações meteorológicas, tais como temperatura, umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento, pressão atmosférica, precipitação pluviométrica e radiação solar.

Os dados coletados pelas estações meteorológicas automáticas (EMA), distribuídas por todo Brasil, são enviados automaticamente para a sede do INMET em Brasília, sendo atualizados de hora em hora. Lá, as validações são executadas por meio de um sistema de qualidade e são disponibilizadas no portal do INMET em tempo real, de forma aberta e gratuita para toda a sociedade (INMET, 2011).

Para o segmento de Santa Maria/RS, foram retirados os dados da estação nomeada de “Santa Maria-A803”, localizada na latitude  $29^{\circ}43'29.9''S$  e longitude  $53^{\circ}43'13.7''W$ , com altitude de 103 metros e inaugurada no dia 03 de setembro de 2001 (INMET, 2019). A estação está situada a cerca de 1,67 km do segmento experimental de Santa Maria/RS. A Figura 24 apresenta a distância entre o segmento experimental e a estação automática e a Figura 25 ilustra a estação automática de Santa Maria/RS.

Figura 24 – Distância entre a estação do INMET e o segmento experimental



Fonte: Adaptado de Google Earth (2020).

Figura 25 – Estação meteorológica automática de Santa Maria/RS



Fonte: (INMET, 2010).

### 3.5 AVALIAÇÃO DE RETRORREFLETIVIDADE

Com base na norma NBR 15426 (ABNT, 2013), a avaliação das películas foi realizada com o retrorrefletômetro portátil. Antes de cada processo de medição, foi realizada a calibração do aparelho com um dispositivo padrão de calibragem. A Figura 26 mostra o material de referência utilizado para a calibragem do aparelho retrorrefletômetro usado na pesquisa. O material de referência possui uma película com os valores fixos de retrorrefletividade. O aparelho de referência utilizado para Retrosign GR3 nas geometrias de ângulo de entrada de  $-4^\circ$  e ângulos de observação de  $0,2^\circ$ ,  $0,5^\circ$  e  $1,0^\circ$  apresentam valores de 293, 116 e 22  $\text{cd/lx.m}^2$ , respectivamente, conforme é apresentado na Figura 26. O outro lado do material possui uma superfície escura, a qual calibra o valor 0  $\text{cd/lx.m}^2$  do aparelho. Após a calibragem, foram realizadas as leituras.

Figura 26 – Equipamento de referência para calibragem do Retrosign GR3



Fonte: Autor.

A norma NBR 15426 (ABNT, 2013) especifica a realização de cinco medidas para cada cor de película a ser avaliada, a fim de que a média dos resultados seja representativa de toda a cor da película. Para o conjunto de placas de sinalização nos segmentos experimentais, foram realizadas as cinco medidas; entretanto, em ensaios que utilizam películas reduzidas, como as utilizadas na câmara úmida, foram realizadas apenas três medidas, sendo representativa da área da referida película.

Para alguns dos ensaios, foi realizado o processo de limpeza das películas empregadas neste estudo. Este método consistiu na limpeza das películas com água, detergente neutro e esponja macia – a qual foi utilizada para que não ocorresse danificação por atrito que comprometesse os resultados. O procedimento de limpeza regular foi adotado em alguns ensaios para que fosse possível verificar a influência que esse procedimento tem nas medições de retrorefletividade ao longo do tempo.

### 3.5.1 Avaliação da retrorrefletividade ao longo do tempo

Com intuito de analisar, nos diferentes tipos de películas e cores, o desempenho das películas em função do tempo e do eventual processo de limpeza imposto, foram realizadas leituras de retrorrefletividade nas placas de sinalização vertical dos segmentos citados anteriormente. O levantamento de dados foi feito desde a instalação das placas nos segmentos experimentais. As medidas foram realizadas periodicamente, a cada dois meses, a fim de possibilitar adequada análise dos dados coletados.

Antes da realização das leituras, a limpeza das placas previamente definidas foi efetuada (Figura 27). Após 24 horas da limpeza, eram realizadas cinco medidas de retrorrefletividade por placa, com equipamento de retrorrefletividade portátil, obtendo-se a média desses valores, a qual foi adotada como medida representativa da placa.

Sobre as dispersões dos resultados, as películas que não recebiam limpeza regular tiveram grande acúmulo de sujeira, principalmente no centro da placa de sinalização vertical. Para que, no processo de medição, não houvesse parcialidade quanto à escolha dos pontos a serem medidos, utilizaram-se pontos nos quatro cantos da placa e um no centro da película, sem que fosse realizada a medida pontual na sujeira ou na parte mais limpa da placa. Assim, seria possível obter uma média que abrangesse toda a placa.

Figura 27 – Limpeza das placas de sinalização



Fonte: Autor.

### 3.5.2 Avaliação da retrorrefletividade em relação à precipitação pluviométrica

Para verificar a influência da precipitação pluviométrica nas medidas de retrorrefletividade em películas de sinalização vertical, foi realizada uma série de leituras antes e depois do início de uma precipitação pluviométrica. O objetivo dessas leituras foi verificar se a chuva tem efeito de limpeza sobre as películas e se, conseqüentemente, aumenta os valores de retrorrefletividade. De acordo com McGee (2010), a limpeza das películas geralmente não é necessária, já que as chuvas periódicas ajudam nesse processo.

Com a intenção de efetuar a medida mais perto do começo da precipitação pluviométrica, foram executadas várias campanhas de medições até que ocorresse o início da chuva. Para isso, com auxílio do site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), verificava-se quando haveria uma probabilidade significativa de chuva, o que, usualmente, corresponde a uma probabilidade de acima de 50%. Quando o INMET apresentava valor igual a esse ou maior, iniciava-se uma bateria de medidas

na tentativa de obter uma retrorrefletividade média mais próxima do início da chuva. Essa probabilidade foi adotada porque notou-se que, usualmente, era quando ocorria a precipitação pluviométrica.

Em ocasiões em que foi possível realizar uma medida 12h antes da chuva, esperava-se o fim da chuva e, em seguida, iniciava-se uma nova série de leituras. Esperava-se as películas ficarem secas naturalmente, evitando, assim, qualquer limpeza feita por outro meio além da água da chuva. Com a película seca, realizava-se uma sequência de leituras de hora em hora, até quando fosse percebida uma estabilização das medidas de retrorrefletividade. Almejou-se, com esses levantamentos, verificar a influência da precipitação pluviométrica na limpeza das películas de sinalização vertical, partindo-se da hipótese de que a chuva acarreta a limpeza com conseqüente aumento das medidas de retrorrefletividade. O site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foi empregado como fonte de dados para o acompanhamento meteorológico a fim de levantar informações acerca das previsões de chuva no local, bem como do volume precipitado.

### **3.5.3 Avaliação da retrorrefletividade em relação à temperatura da película**

Simultaneamente ao estudo de precipitação pluviométrica, foi observada, em leituras anteriores, uma mudança nas medidas de retrorrefletividade em diferentes horários de um mesmo dia. Acreditando-se que essa mudança foi motivada pela variação de temperatura, foi utilizado um termômetro infravermelho MT-350, da marca Minipa, para aferir a temperatura da película no momento em que a medição da retrorrefletividade era realizada. Esse procedimento teve o intuito de analisar o comportamento da retrorrefletividade em relação à alterabilidade de temperatura diária.

Após analisar a temperatura da película em relação à retrorrefletividade no segmento experimental, notou-se uma alta correlação entre os dois parâmetros (discussão feita na seção 4.1.10 ). Com isso, decidiu-se condicionar as películas retrorrefletivas em equipamento laboratorial a fim de verificar somente a influência que a temperatura tem sobre elas. Para isso, foi utilizada a câmara do equipamento UTM-25 (Figura 28), que tem como finalidade realizar ensaios com corpo de provas asfálticas. Foi possível variar a temperatura entre 0 a 50 °C, temperaturas que também foram observadas em serviço.

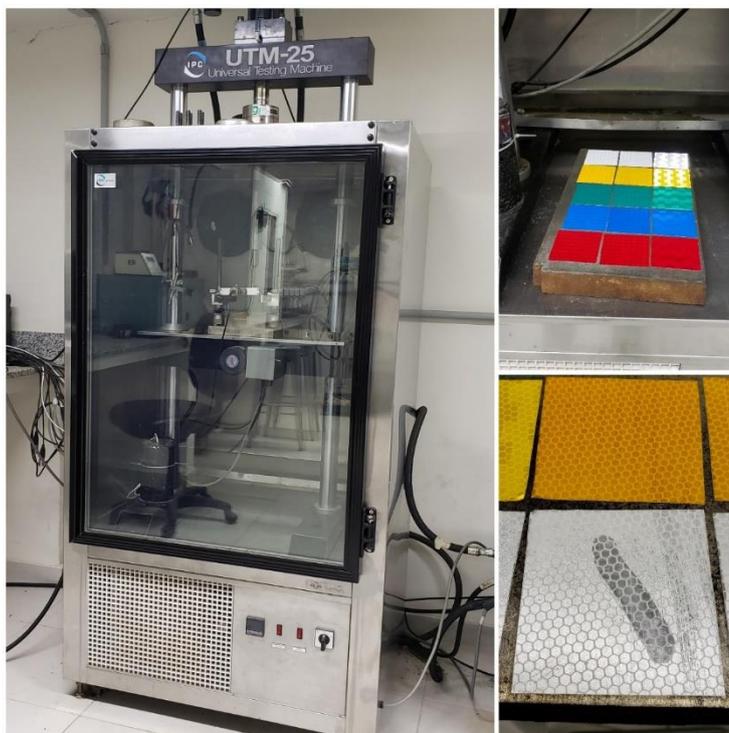
Em um mesmo dia, foi realizada a medição de todas as temperaturas encontradas em campo, de forma semelhante ao que foi ensaiado no segmento monitorado. As medidas iniciaram pela temperatura de 0°C, a qual foi aumentando gradualmente, de 5°C em 5°C, até chegar aos 50°C, quando realizavam-se leituras no intervalo proposto.

Vale ressaltar que foram utilizadas películas de marcas diferentes das apresentadas no segmento experimental, pois não havia disponibilidade de amostras semelhantes. As películas utilizadas foram do tipo I, tipo III e tipo X (NBR 14644), de cores vermelha, verde, amarela e branca, as quais são as mais usualmente encontradas em serviço. A marca das películas foi a *Avery Dennison*, sendo todas elas microprismáticas.

Em um pré-experimento, notou-se, na realização das leituras nas películas, uma perda de temperatura muito rápida, a qual foi motivada pela diferença de temperatura entre o ambiente e a película ensaiada. Então, empregou-se um suporte de ferro com espessura maior – cerca de seis centímetros de espessura – com intuito de que o material apresentasse maior inércia térmica, suportando, assim, um tempo maior para a realização as leituras (Figura 28).

Nas temperaturas baixas, como 0°C, 5°C e 10°C, verificou-se um pouco de umidade na face da película, já que havia diferença de temperatura entre a parte de fora e de dentro do condicionamento, como pode ser observado na Figura 28. Para tentar minimizar a chance de que as leituras sofressem essa influência, foi utilizado um pano seco para retirar a umidade da face da película para que fosse possível realizar as medidas sem muita variação dos resultados. Cabe ressaltar que esse procedimento era realizado em películas completamente limpas.

Figura 28 – Câmara de condicionamento do equipamento UTM-25 e suporte espesso de ferro com amostras



Fonte: Autor.

#### **3.5.4 Avaliação da retrorrefletividade das películas condicionadas na câmara úmida**

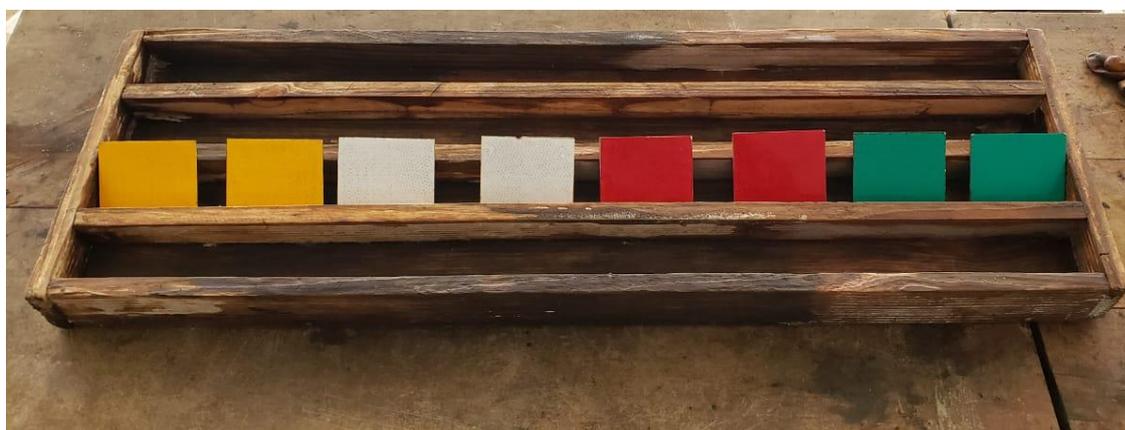
A metodologia de ensaio para verificar a influência que a umidade elevada tem sobre películas retrorrefletivas em um ambiente úmido iniciou-se no dia 12 de novembro de 2015. Desde essa data, o GEPPASV vem executando leituras de retrorrefletividade a fim de avaliar o comportamento retrorrefletivo dessas películas ao longo do tempo.

Para a análise do resultados, foram confeccionados 8 modelos de películas retrorrefletivas da marca Avery Dennison (Figura 29), de dimensão de 10x10 cm. As cores avaliadas foram amarela, branca, verde e vermelha, sendo essas as mais usualmente encontradas em atividade nas sinalizações verticais. Ademais, foram utilizadas as películas de tipo III e tipo X, de acordo com a norma NBR 14644 (2013).

Inicialmente, o objetivo era avaliar os 16 modelos confeccionados; entretanto, somente as leituras de 8 deles foram usadas. Isso se deu porque o procedimento de

limpeza de um dos pares semelhantes de películas foi adotado como estratégia de avaliação dos resultados, a fim de verificar a interferência da limpeza nos resultados. Contudo, posto que as placas dividem a câmara úmida com corpos de prova de concreto e, com isso, o pó liberado pelo material cimentado pode ser incorporado à película, foi descartada a avaliação das leituras das películas por essa metodologia. Uma vez que as películas não recebiam a limpeza regular, houve grande alteração nos resultados de retrorefletividade em virtude dessa sujeira, sendo obtidos os valores de 0 cd/lx\*m<sup>2</sup> nas leituras.

Figura 29 – Películas implementadas na câmara úmida



Fonte: Autor.

As películas foram expostas em uma câmara úmida localizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Centro de Tecnologia da UFSM. A câmara úmida é empregada para cura de corpos de prova de argamassa e concreto, seguindo a norma NBR 9479 (ABNT, 2006). Nessa câmara, temperatura deve ser mantida em  $25 \pm 2^\circ\text{C}$ , e a umidade relativa deve ser maior ou igual a 95% para garantir as condições da norma em seu interior.

As placas foram preparadas e acondicionadas na câmara úmida e dispostas conforme descrito na Tabela 28. As películas utilizadas na câmara úmida são da mesma marca utilizada em outros ensaios laboratoriais, mas de marca distinta daquelas películas do segmento experimental.

Com o uso do retrorefletômetro RetroSign GR3, as leituras foram realizadas a cada duas semanas. Inicialmente, eram realizadas 5 leituras de retrorefletividade, as quais foram executadas até dia 10 de outubro de 2016. Entretanto, como tamanho da

placa é reduzida e verificou-se pouca dispersão de valores entre uma medida e outra, foi adotado o padrão de 3 leituras.

Tabela 28 – Disposição das placas na câmara úmida

Cor	Tipo (NBR 14644, 2013)	Cor	Tipo (NBR 14644, 2013)	Cor	Tipo (NBR 14644, 2013)
Amarelo	I	Branco	III	Verde	X
Amarelo	III	Branco	X	Vermelho	I
Amarelo	X	Verde	I	Vermelho	III
Branco	I	Verde	III	Vermelho	X

Fonte: Autor.

### 3.5.5 Avaliação da retrorrefletividade em relação à radiação acumulada

Com o intuito de verificar a influência da radiação solar, 15 películas de tamanho 10x10 cm foram expostas ao sol, seguindo procedimento adaptado da norma americana G7—13 (ASTM, 2013). As películas aderidas às chapas foram parafusadas em um painel de metal e fixadas a um pé de placa de madeira para que simulasse a condição de campo (Figura 30).

Segundo a norma G7—13 (ASTM, 2013), as placas foram orientadas para a linha do Equador, direção norte, orientação em que ficam expostas ao sol por maior tempo. Sua inclinação respeitara 90° em relação ao eixo horizontal para que fosse evitado o acúmulo de água na amostra; ademais, é o modo como as películas retrorrefletivas são implantadas em real operação na sinalização vertical.

As películas estudadas nessa etapa apresentam as cinco cores mais usuais (vermelho, verde, amarelo, branco e azul) e três tipos de películas diferentes (I, III e X). As películas utilizadas são do mesmo lote daquelas usadas no experimento da câmara úmida e no teste de temperatura laboratorial. As leituras foram realizadas em períodos mensais e, conjuntamente, houve a limpeza para que a sujeira não fosse um fator interveniente na leitura.

Concomitantemente ao teste, a mesma composição de películas foi exposta ao equipamento SUNTEST XLS+ para que fosse possível correlacionar o desempenho da película em campo às submetidas ao equipamento, na tentativa de verificar a correlação entre campo e laboratório (Figura 31).

Figura 30 – Placa com películas para exposição solar



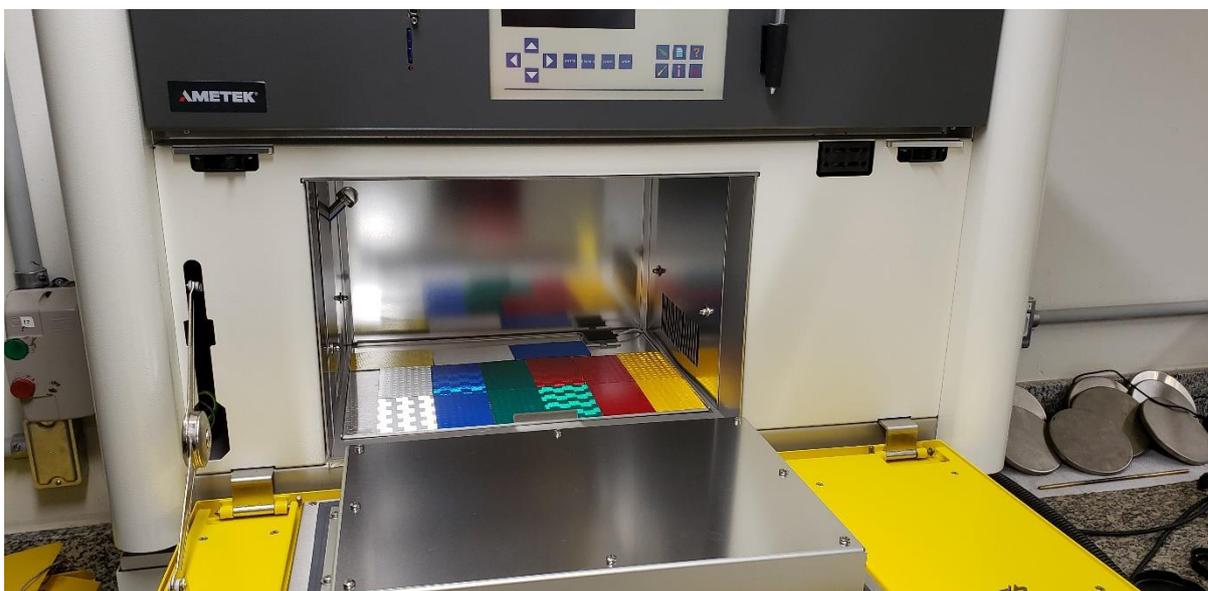
Fonte: Autor.

O SUNTEST XLS+ foi usado para analisar alterações das propriedades retrorrefletivas das películas provocadas pelos raios infravermelhos em ensaios acelerados. Segundo Ketola (1999), nas especificações de películas retrorrefletivas utilizadas a longo prazo, ensaios de intemperismo acelerados por laboratório são usados no lugar testes de intemperismo ao ar livre, pois fornecem resultados rápidos. Contudo, o autor informa que o equipamento de aceleração artificial apresenta uma variabilidade significativa entre os resultados.

As películas foram expostas ao equipamento de aceleração artificial de intemperismo (SUNTEST XLS+), seguindo a norma americana G155—13 (ASTM, 2013) de forma adaptada. O método usado para a exposição é semelhante ao “Método 1” de exposição demonstrado na norma D4956—19 (ASTM, 2019), o qual é equivalente ao “Ciclo 1” da norma G155—13 (ASTM, 2013).

O aparelho foi ajustado para que as películas fossem expostas a uma intensidade de radiação de  $765 \text{ W/m}^2$  – maior intensidade disponível no aparelho – com um comprimento de onda de 300 e 800 nm.

Figura 31 – Películas retrorrefletivas introduzidas no Suntest XLS+



Fonte: Autor.

A temperatura do “Black Panel” foi definida como 63°C, seguindo a norma G155—13 (ASTM, 2013). Essa temperatura representa a medida que as amostras apresentam durante o ensaio. Além da temperatura da amostra, pode-se configurar a temperatura da câmara e a umidade relativa, que são opcionais segundo a norma usada; logo, não foi atribuído nenhum valor ao mesmo.

As medições de retrorrefletividade foram realizadas periodicamente a cada 24 horas de ensaio no aparelho Suntest XLS+. Após o término de uma seção (24 horas), a temperatura da amostra era reestabelecida à  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  e, em seguida, foram efetuadas as leituras nas películas. Para o cálculo de quanto tempo seria necessário ensaiar as amostras, foi utilizada a Equação 1, retirada de McGreer (2003).

$$\text{Tempo} = \frac{\text{Radiação solar anual média}}{3,6 \times \text{Intensidade de radiação do aparelho}} \quad (1)$$

Onde:

Tempo = tempo de exposição necessária no aparelho, dado em horas;

Radiação solar anual média = Média de radiação acumulado em um certo local, dado em  $\text{kJ/m}^2$ ;

Intensidade de radiação do aparelho = Valor de radiação atribuído no aparelho, dado em J/s.m<sup>2</sup>.

Como o tempo de pausa do ensaio Suntest XLS+, adotou-se 3 anos de radiação solar acumulada média. Para o cálculo da radiação acumulada em que as amostras deveriam ser ensaiadas para que tivessem a proporção de radiação semelhante às expostas em campo, fez-se uso dos dados meteorológicos do site Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Segundo os dados do INMET, desde de 2002 (ano em que se pôde ter os dados anuais completos da radiação daquela estação) a média acumulada de radiação solar global foi de 5.607.908 kJ/m<sup>2</sup> para um espectro de 100-3000nm.

Para possibilitar a comparação com o comprimento de onda usado no Suntest XLS+ de 300-800nm, realizou-se a conversão dos dados para esse comprimento, de acordo com os dados da CIE Pub. 85 (1989). Essa proporção em relação à radiação solar global é equivalente a 62,2%; logo, obtém-se uma radiação acumulada de 3.488.119 kJ/m<sup>2</sup> (295-800nm).

A atribuição do valor de 765 W/m<sup>2</sup> para a intensidade de radiação do aparelho para o espectro de (300-800nm), na Equação 1, resultou em uma equivalência de acúmulo de radiação a 162 dias dentro do aparelho Suntest XLS+. Com as configurações apresentadas anteriormente, seria igual a 3 anos de exposição na cidade de Santa Maria/RS.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo, serão exibidos os resultados encontrados no desenvolvimento da pesquisa, juntamente com sua análise. São apresentados os resultados de campo obtidos ao longo do período de monitoramento, desde de sua implantação, juntamente com os resultados laboratoriais relativos à influência da precipitação pluviométrica, da temperatura, da umidade e da radiação solar no desempenho de películas retrorrefletivas. As medidas de retrorrefletividade mostrados neste capítulo são apresentados pela unidade  $\text{cd/lx.m}^2$ , e essas medidas são de geometria igual a ângulo de entrada de  $-4^\circ$  e ângulo de observação de  $0,2^\circ$ , segundo preconizado pela norma NBR 15426 (ABNT, 2013).

### 4.1 SEGMENTO EXPERIMENTAL

Neste item, serão apresentados os resultados e as análises dos ensaios realizados nas 24 películas expostas ao ambiente e estudadas no segmento experimental de Santa Maria/RS.

#### 4.1.1 Apresentação dos resultados de retrorrefletividade das películas expostas no segmento experimental

Com o intuito de facilitar a compressão das análises expostas nos próximos itens, serão apresentadas as medidas de retrorrefletividade encontradas no segmento experimental ao longo dos 75 meses de monitoramento pelo GEPPASV.

Conforme já comentado no capítulo de métodos e técnicas, as campanhas de leituras foram realizadas em intervalos bimestrais, sendo realizadas 5 medidas de retrorrefletividade por película implantada no segmento experimental. Até o fim deste estudo, foram efetuadas 30 campanhas de medidas, e o último registro dos resultados expostos neste documento é do dia 01 de fevereiro de 2020.

As medidas de retrorrefletividade de cada campanha de leitura estão apresentadas na Tabela 29 à Tabela 32, juntamente com as médias dos valores e seus desvios padrões amostrais. As referidas tabelas se dividem entre as cores presentes no segmento experimental, exibindo, para cada uma das cores, os resultados para os três tipos de película (I, III e X) e distinguindo as películas que usualmente eram limpas e as que não eram. Da Figura 32 à Figura 43, são apresentadas todas as medidas –

exibidas igualmente entre a Tabela 29 e a Tabela 32 – em relação ao tempo de exposição, com o intuito de demonstrar suas medidas dispostas graficamente, mostrando os resultados das películas que eram regularmente limpas e do par de película semelhante que nunca recebeu limpeza.

Tabela 29 – Resumo das leituras de retrorrefletividade em cada campanha no segmento experimental para as películas de cor vermelha

		(continua)					
Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X	
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Ano(s) / Dia(s)		Retrorrefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )					
0,00 / 0	Leituras	35	31	89	97	184	162
		33	35	94	80	177	154
		30	34	101	82	183	169
		33	34	77	91	189	189
		30	34	89	77	168	201
	Média	32,20	33,60	90,00	85,40	180,20	175,00
Desvio Padrão		2,17	1,52	8,77	8,32	8,04	19,48
0,26 / 93	Leituras	31	27	94	90	188	197
		30	27	94	86	198	186
		31	30	79	80	218	171
		26	32	68	90	210	207
		27	32	76	82	208	202
	Média	29,00	29,60	82,20	85,60	204,40	192,60
Desvio Padrão		2,35	2,51	11,50	4,56	11,61	14,36
0,51 / 182	Leituras	26	22	82	74	212	199
		26	21	83	66	206	201
		28	25	72	68	208	201
		22	28	77	81	211	194
		22	25	74	65	204	217
	Média	24,80	24,20	77,60	70,80	208,20	202,40
Desvio Padrão		2,68	2,77	4,83	6,69	3,35	8,65
0,65 / 234	Leituras	30	26	97	101	180	187
		27	33	86	91	193	150
		29	29	80	76	225	151
		31	26	106	88	186	152
		28	29	84	81	206	178
	Média	29,00	28,60	90,60	87,40	198,00	163,60
Desvio Padrão		1,58	2,88	10,67	9,61	17,93	17,56
0,77 / 276	Leituras	24	30	95	95	229	192
		27	25	106	98	213	183
		25	23	91	77	209	213

		(continuação)					
Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X	
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Ano(s) / Dia(s)	Retrorrefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )						
0,77 / 276	Leituras	28	23	104	83	206	180
		28	25	87	74	234	211
	Média	26,40	25,20	96,60	85,40	218,20	195,80
	Desvio Padrão	1,82	2,86	8,20	10,69	12,52	15,45
1,04 / 374	Leituras	24	28	95	86	201	126
		28	23	82	89	202	125
		29	19	101	71	186	132
		30	20	91	63	186	166
		29	23	85	64	182	157
	Média	28,00	22,60	90,80	74,60	191,40	141,20
	Desvio Padrão	2,35	3,51	7,63	12,22	9,37	18,99
1,27 / 459	Leituras	30	31	105	94	203	161
		37	36	105	91	178	155
		31	32	100	77	192	181
		37	33	123	83	204	140
		36	35	92	77	208	200
	Média	34,20	33,40	105,00	84,40	197,00	167,40
Desvio Padrão	3,42	2,07	11,38	7,86	12,17	23,42	
1,95 / 702	Leituras	26	25	95	71	214	129
		31	28	119	79	211	156
		28	23	96	74	201	108
		31	26	112	64	198	169
		31	24	98	80	214	166
	Média	29,40	25,20	104,00	73,60	207,60	145,60
Desvio Padrão	2,30	1,92	10,84	6,50	7,57	26,27	
2,34 / 843	Leituras	26	20	103	90	195	156
		29	24	105	90	175	180
		26	25	101	89	185	165
		27	22	96	81	163	145
		28	23	94	84	171	137
	Média	27,20	22,80	99,80	86,80	177,80	156,60
Desvio Padrão	1,30	1,92	4,66	4,09	12,46	16,86	
2,64 / 952	Leituras	30	22	116	91	225	178
		35	28	123	95	200	171
		29	22	117	82	208	166
		33	22	121	95	203	167
		34	22	109	76	207	179
	Média	32,20	23,20	117,20	87,80	208,60	172,20
Desvio Padrão	2,59	2,68	5,40	8,47	9,71	6,06	
2,83 / 1019	Leituras	28	20	114	95	209	174
		32	28	125	95	193	175

		(continuação)					
Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X	
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Ano(s) / Dia(s)	Retrorefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )						
2,83 / 1019		27	23	108	86	199	155
	Leituras	33	22	124	93	210	160
		35	23	104	76	214	174
	Média	31,00	23,20	115,00	89,00	205,00	167,60
	Desvio Padrão	3,39	2,95	9,38	8,15	8,69	9,40
3,08 / 1108		29	19	108	90	217	164
		30	28	118	94	192	164
	Leituras	25	21	104	83	204	149
		30	22	120	91	210	165
		33	21	94	78	206	182
	Média	29,40	22,20	108,80	87,20	205,80	164,80
Desvio Padrão	2,88	3,42	10,64	6,53	9,18	11,69	
3,28 / 1182		26	19	102	89	188	152
		27	24	110	82	170	156
	Leituras	23	21	90	74	198	143
		27	19	111	83	193	155
		31	20	87	67	203	178
	Média	26,80	20,60	100,00	79,00	190,40	156,80
Desvio Padrão	2,86	2,07	11,11	8,57	12,70	12,91	
3,34 / 1203		25	20	82	75	194	140
		28	16	95	91	177	137
	Leituras	20	20	88	72	164	149
		24	20	89	75	109	112
		21	17	85	68	193	170
	Média	23,60	18,60	87,80	76,20	167,40	141,60
Desvio Padrão	3,21	1,95	4,87	8,76	34,92	20,98	
3,39 / 1223		23	15	81	68	196	144
		25	15	72	73	192	136
	Leituras	22	18	76	62	185	142
		25	16	111	67	110	99
		26	18	84	60	196	168
	Média	24,20	16,40	84,80	66,00	175,80	137,80
Desvio Padrão	1,64	1,52	15,35	5,15	37,06	24,88	
3,61 / 1301		22	19	75	52	184	140
		27	14	75	53	183	147
	Leituras	23	15	77	53	182	128
		24	14	87	50	167	141
		28	14	77	48	197	149
	Média	24,80	15,20	78,20	51,20	182,60	141,00
Desvio Padrão	2,59	2,17	5,02	2,17	10,64	8,22	
3,78 / 1361	Leituras	23	14	65	54	126	86

		(continuação)					
Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X	
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Ano(s) / Dia(s)		Retrorefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )					
3,78 / 1361	Leituras	25	10	74	55	140	56
		26	15	69	47	146	114
		27	15	79	55	156	98
		25	16	63	49	129	101
	Média	25,20	14,00	70,00	52,00	139,40	91,00
	Desvio Padrão	1,48	2,35	6,56	3,74	12,32	21,95
3,99 / 1437	Leituras	23	14	98	64	186	121
		25	15	89	56	191	94
		26	16	81	54	184	77
		23	12	101	62	181	134
	26	13	91	57	202	98	
	Média	24,60	14,00	92,00	58,60	188,80	104,80
Desvio Padrão	1,52	1,58	7,87	4,22	8,23	22,64	
4,36 / 1568	Leituras	19	14	89	68	212	185
		22	13	97	65	206	157
		24	10	80	62	196	84
		19	14	94	69	203	174
	22	13	96	60	217	176	
	Média	21,20	12,80	91,20	64,80	206,80	155,20
Desvio Padrão	2,17	1,64	6,98	3,83	8,11	41,07	
4,57 / 1644	Leituras	21	19	94	82	195	166
		24	16	100	77	168	132
		24	15	82	65	184	105
		21	15	90	70	173	153
	24	11	95	66	195	128	
	Média	22,80	15,20	92,20	72,00	183,00	136,80
Desvio Padrão	1,64	2,86	6,72	7,31	12,39	23,59	
4,74 / 1708	Leituras	22	21	88	92	192	138
		23	15	100	89	186	131
		23	14	96	70	178	116
		25	11	99	67	171	122
	25	18	80	63	207	125	
	Média	23,60	15,80	92,60	76,20	186,80	126,40
Desvio Padrão	1,34	3,83	8,47	13,33	13,81	8,44	
4,93 / 1773	Leituras	22	15	89	78	208	118
		24	14	97	73	190	113
		21	13	91	69	189	129
		25	8	85	66	195	113
	25	12	85	48	194	113	
	Média	23,40	12,40	89,40	66,80	195,20	117,20
Desvio Padrão	1,82	2,70	4,98	11,43	7,60	6,94	

		(continuação)					
Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X	
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Ano(s) / Dia(s)	Retrorefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )						
5,10 / 1835	Leituras	23	13	84	72	203	142
		21	13	84	65	196	134
		24	12	86	57	154	126
		25	13	84	47	188	119
		21	10	87	77	190	123
	Média	22,80	12,20	85,00	63,60	186,20	128,80
	Desvio Padrão	1,79	1,30	1,41	11,95	18,93	9,20
5,27 / 1897	Leituras	23	16	99	82	168	137
		25	16	94	78	175	124
		22	17	93	70	172	143
		25	13	82	65	181	138
		25	15	91	64	195	143
	Média	24,00	15,40	91,80	71,80	178,20	137,00
	Desvio Padrão	1,41	1,52	6,22	7,95	10,52	7,78
5,43 / 1953	Leituras	25	18	101	81	159	115
		26	19	104	81	160	93
		25	16	107	81	153	139
		27	13	101	81	167	122
		26	17	101	85	197	138
	Média	25,80	16,60	102,80	81,80	167,20	121,40
	Desvio Padrão	0,84	2,30	2,68	1,79	17,38	18,93
5,60 / 2016	Leituras	18	13	77	44	217	151
		21	11	76	49	213	133
		18	10	66	43	207	135
		21	8	74	47	227	140
		22	12	66	47	215	136
	Média	20,00	10,80	71,80	46,00	215,80	139,00
	Desvio Padrão	1,87	1,92	5,40	2,45	7,29	7,18
5,76 / 2075	Leituras	19	15	77	52	195	157
		21	9	79	65	194	68
		19	10	83	51	191	129
		20	7	81	43	181	104
		20	11	67	42	204	104
	Média	19,80	10,40	77,40	50,60	193,00	112,40
	Desvio Padrão	0,84	2,97	6,23	9,24	8,28	33,08
5,93 / 2135	Leituras	16	13	86	64	190	93
		22	9	95	64	185	83
		19	9	85	47	171	112
		23	8	96	49	187	96
		22	10	78	53	196	103
	Média	20,40	9,80	88,00	55,40	185,80	97,40

		(conclusão)						
Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X		
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	
Ano(s) / Dia(s)		Retrorrefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )						
5,93 / 2135	Desvio Padrão	2,88	1,92	7,52	8,14	9,26	10,88	
		22	8	85	52	192	110	
6,11 / 2198	Leituras	19	13	85	66	182	130	
		22	10	88	63	194	98	
		19	9	87	50	185	127	
		22	8	79	55	195	123	
		Média	20,80	9,60	84,80	57,20	189,60	117,60
		Desvio Padrão	1,64	2,07	3,49	6,98	5,77	13,35
6,27 / 2258	Leituras	21	18	88	82	188	156	
		23	15	97	92	190	153	
		21	14	93	77	173	153	
		23	9	104	75	200	157	
		24	12	80	77	187	164	
		Média	22,40	13,60	92,40	80,60	187,60	156,60
	Desvio Padrão	1,34	3,36	9,07	6,88	9,66	4,51	

Fonte: Autor.

Tabela 30 – Resumo das leituras de retrorrefletividade em cada campanha no segmento experimental para as películas de cor amarela

		(continua)					
Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X	
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Ano(s) / Dia(s)		Retrorrefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )					
0,00 / 0	Leituras	59	55	555	504	619	674
		61	63	434	461	637	666
		65	62	449	480	650	623
		64	61	422	448	653	615
		64	62	499	477	607	593
		Média	62,60	60,60	471,80	474,00	633,20
	Desvio Padrão	2,51	3,21	54,98	21,15	19,85	34,59
0,26 / 93	Leituras	66	60	514	486	654	737
		67	64	477	473	658	720
		69	67	389	403	749	771
		67	60	473	523	689	660
		69	61	463	448	723	566
		Média	67,60	62,40	463,20	466,60	694,60
	Desvio Padrão	1,34	3,05	45,75	44,69	41,19	80,53

		(continuação)					
Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X	
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Ano(s) / Dia(s)	Retrorefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )						
0,51 / 182	Leituras	71	62	475	428	794	730
		68	63	395	400	761	687
		70	64	355	351	826	684
		68	61	436	382	767	610
		67	63	399	333	830	724
	Média	68,80	62,60	412,00	378,80	795,60	687,00
	Desvio Padrão	1,64	1,14	45,42	37,92	32,11	47,84
0,65 / 234	Leituras	68	61	561	487	742	616
		67	56	523	546	595	539
		67	63	479	406	688	556
		66	61	543	490	616	565
		69	56	510	448	685	693
	Média	67,40	59,40	523,20	475,40	665,20	593,80
	Desvio Padrão	1,14	3,21	31,42	52,20	59,50	62,44
0,77 / 276	Leituras	72	56	570	542	723	505
		70	55	609	527	675	672
		72	55	509	352	762	612
		71	61	547	450	569	681
		70	62	436	435	823	628
	Média	71,00	57,80	534,20	461,20	710,40	619,60
	Desvio Padrão	1,00	3,42	65,80	76,80	95,85	70,32
1,04 / 374	Leituras	62	51	519	503	629	628
		63	54	519	369	648	596
		63	47	535	388	547	634
		65	45	463	540	673	505
		63	46	448	312	701	566
	Média	63,20	48,60	496,80	422,40	639,60	585,80
	Desvio Padrão	1,10	3,78	38,63	95,59	58,40	52,75
1,27 / 459	Leituras	69	69	554	646	695	716
		68	72	552	568	766	726
		70	71	515	447	687	594
		68	74	548	602	619	728
		66	73	482	507	802	728
	Média	68,20	71,80	530,20	554,00	713,80	698,40
	Desvio Padrão	1,48	1,92	31,28	78,46	71,70	58,57
1,95 / 702	Leituras	73	61	588	519	660	424
		70	66	629	537	665	547
		72	62	552	401	649	464
		71	67	522	481	599	599
		70	72	487	450	680	680
	Média	71,20	65,60	555,60	477,60	650,60	542,80

		(continuação)					
Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X	
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Ano(s) / Dia(s)		Retrorrefletividade (cd/lx*m²)					
1,95 / 702	Desvio Padrão	1,30	4,39	55,42	54,51	30,92	102,86
		67	52	577	445	602	532
2,34 / 843	Leituras	66	62	568	440	636	510
		66	56	504	354	563	477
		66	66	472	470	462	489
		67	57	481	427	612	549
		67	57	481	427	612	549
	Média	66,40	58,60	520,40	427,20	575,00	511,40
	Desvio Padrão	0,55	5,46	49,07	43,79	68,43	29,69
		80	58	608	481	699	591
2,64 / 952	Leituras	80	60	608	434	721	434
		76	58	615	449	711	518
		78	67	595	529	630	441
		77	65	508	342	720	457
		77	65	508	342	720	457
	Média	78,20	61,60	586,80	447,00	696,20	488,20
	Desvio Padrão	1,79	4,16	44,64	69,06	38,05	66,32
		76	59	635	486	650	603
2,83 / 1019	Leituras	75	59	581	431	707	410
		78	57	563	421	648	505
		76	66	569	545	653	438
		74	60	480	344	751	465
		74	60	480	344	751	465
	Média	75,80	60,20	565,60	445,40	681,80	484,20
	Desvio Padrão	1,48	3,42	55,68	75,25	45,84	75,09
		76	61	648	491	682	612
3,08 / 1108	Leituras	73	58	533	451	668	428
		75	55	542	437	653	494
		77	67	577	508	647	451
		76	56	436	345	684	474
		76	56	436	345	684	474
	Média	75,40	59,40	547,20	446,40	666,80	491,80
	Desvio Padrão	1,52	4,83	76,88	63,59	16,66	71,60
		65	58	580	464	601	585
3,28 / 1182	Leituras	72	56	459	430	572	381
		65	49	493	380	576	486
		72	61	514	481	559	410
		66	53	430	337	646	426
		66	53	430	337	646	426
	Média	68,00	55,40	495,20	418,40	590,80	457,60
	Desvio Padrão	3,67	4,62	57,25	59,65	34,40	80,88
		76	44	576	419	482	465
3,34 / 1203	Leituras	73	47	434	329	609	470
		75	58	464	276	582	463
		77	57	443	413	464	466
		76	61	452	291	657	466
		76	61	452	291	657	466

		(continuação)					
Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X	
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Ano(s) / Dia(s)	Retrorefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )						
3,34 / 1203	Média	75,40	53,40	473,80	345,60	558,80	466,00
	Desvio Padrão	1,52	7,44	58,20	67,14	83,05	2,55
3,39 / 1223	Leituras	69	48	508	387	666	477
		71	61	454	336	670	560
		71	48	431	386	616	433
		72	57	578	432	623	331
		73	59	534	305	780	498
	Média	71,20	54,60	501,00	369,20	671,00	459,80
	Desvio Padrão	1,48	6,19	59,53	49,41	65,64	85,30
3,61 / 1301	Leituras	71	54	488	301	805	396
		69	45	448	300	611	274
		74	51	488	281	643	429
		71	44	289	308	542	286
		74	54	401	285	789	424
	Média	71,80	49,60	422,80	295,00	678,00	361,80
	Desvio Padrão	2,17	4,83	82,94	11,47	114,74	75,84
3,78 / 1361	Leituras	59	48	380	251	573	412
		66	53	359	166	627	273
		62	45	327	193	457	272
		68	45	333	200	601	365
		61	59	378	180	598	366
	Média	63,20	50,00	355,40	198,00	571,20	337,60
	Desvio Padrão	3,70	6,00	24,68	32,35	66,64	62,39
3,99 / 1437	Leituras	70	53	511	333	658	369
		72	51	450	266	633	340
		71	59	417	297	685	441
		70	52	506	272	754	382
		70	54	469	277	612	399
	Média	70,60	53,80	470,60	289,00	668,40	386,20
	Desvio Padrão	0,89	3,11	39,32	27,21	55,10	37,47
4,36 / 1568	Leituras	71	60	488	411	657	450
		72	56	471	389	558	472
		74	64	446	407	636	509
		69	63	477	329	696	482
		74	58	482	370	619	479
	Média	72,00	60,20	472,80	381,20	633,20	478,40
	Desvio Padrão	2,12	3,35	16,24	33,41	50,93	21,20
4,57 / 1644	Leituras	71	51	507	367	645	357
		75	51	475	323	584	683
		74	51	434	329	610	456
		70	52	467	359	674	429

		(continuação)					
Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X	
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Ano(s) / Dia(s)	Retrorrefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )						
4,57 / 1644	Leituras	74	47	479	346	581	395
	Média	72,80	50,40	472,40	344,80	618,80	464,00
	Desvio Padrão	2,17	1,95	26,23	18,85	40,16	127,93
4,74 / 1708	Leituras	70	47	563	432	638	266
		70	57	577	400	598	269
		70	45	480	510	633	316
		73	49	580	400	571	300
		73	39	332	337	590	319
	Média	71,20	47,40	506,40	415,80	606,00	294,00
	Desvio Padrão	1,64	6,54	105,73	62,94	28,71	25,27
4,93 / 1773	Leituras	73	42	512	361	697	271
		74	42	495	315	663	247
		73	41	481	363	832	325
		76	45	417	358	691	296
		71	52	441	309	701	400
	Média	73,40	44,40	469,20	341,20	716,80	307,80
	Desvio Padrão	1,82	4,51	39,23	26,80	66,09	59,13
5,10 / 1835	Leituras	74	39	482	378	632	405
		71	47	452	319	571	366
		70	53	452	327	689	364
		66	54	435	328	565	269
		75	41	553	349	675	355
	Média	71,20	46,80	474,80	340,20	626,40	351,80
	Desvio Padrão	3,56	6,80	46,88	23,87	57,34	50,12
5,27 / 1897	Leituras	73	41	511	414	572	346
		74	47	446	370	586	402
		72	47	474	376	636	443
		76	51	437	435	496	425
		73	58	458	356	607	405
	Média	73,60	48,80	465,20	390,20	579,40	404,20
	Desvio Padrão	1,52	6,26	29,12	32,99	52,49	36,51
5,43 / 1953	Leituras	78	46	595	480	604	368
		80	46	567	481	487	462
		76	51	547	401	619	495
		79	55	561	462	607	403
		77	52	512	443	537	465
	Média	78,00	50,00	556,40	453,40	570,80	438,60
	Desvio Padrão	1,58	3,94	30,34	33,16	56,79	51,67
5,60 / 2016	Leituras	69	35	369	230	820	356
		73	33	330	248	777	456
		68	42	379	297	775	460

(continuação)

Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X	
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Ano(s) / Dia(s)		Retrorrefletividade (cd/lx*m²)					
5,60 / 2016	Leituras	71	44	294	240	727	470
		72	40	250	236	741	425
	Média	70,60	38,80	324,40	250,20	768,00	433,40
	Desvio Padrão	2,07	4,66	53,53	26,97	36,21	46,42
5,76 / 2075		69	38	390	196	623	227
		70	31	503	287	466	223
	Leituras	69	40	419	236	711	374
		71	33	413	223	391	257
		69	33	360	233	664	387
	Média	69,60	35,00	417,00	235,00	571,00	293,60
	Desvio Padrão	0,89	3,81	53,37	33,07	136,36	80,54
5,93 / 2135		69	34	441	256	625	202
		70	30	479	269	549	355
	Leituras	69	36	435	216	786	349
		69	32	491	231	631	288
		72	36	410	204	697	344
	Média	69,80	33,60	451,20	235,20	657,60	307,60
	Desvio Padrão	1,30	2,61	33,24	27,09	88,89	64,85
6,11 / 2198		69	32	433	238	619	274
		72	34	444	268	630	318
	Leituras	69	40	430	223	746	380
		71	34	487	253	575	396
		71	31	382	239	623	328
	Média	70,40	34,20	435,20	244,20	638,60	339,20
	Desvio Padrão	1,34	3,49	37,49	17,02	63,80	49,29
6,27 / 2258		70	45	428	396	609	368
		73	42	457	377	592	539
	Leituras	71	54	486	406	692	483
		71	53	447	352	590	461
		74	52	398	393	609	494
	Média	71,80	49,20	443,20	384,80	618,40	469,00
	Desvio Padrão	1,64	5,36	32,83	21,09	42,12	63,22

Fonte: Autor.

Tabela 31 – Resumo das leituras de retrorrefletividade em cada campanha no segmento experimental para as películas de cor verde

		(continua)					
Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X	
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Ano(s) / Dia(s)		Retrorrefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )					
0,00 / 0	Leituras	23	23	64	89	147	130
		20	21	59	76	128	127
		23	22	77	79	142	132
		24	23	88	74	149	142
		22	21	70	70	140	129
	Média	22,40	22,00	71,60	77,60	141,20	132,00
	Desvio Padrão	1,52	1,00	11,37	7,16	8,23	5,87
0,26 / 93	Leituras	22	20	69	82	138	131
		23	20	84	71	147	129
		21	20	65	65	146	152
		20	17	53	72	152	135
		20	18	78	65	147	130
	Média	21,20	19,00	69,80	71,00	146,00	135,40
	Desvio Padrão	1,30	1,41	11,99	6,96	5,05	9,56
0,51 / 182	Leituras	22	17	56	61	149	138
		21	18	54	52	145	131
		19	16	46	57	148	137
		17	14	48	55	152	139
		18	14	63	55	150	137
	Média	19,40	15,80	53,40	56,00	148,80	136,40
	Desvio Padrão	2,07	1,79	6,77	3,32	2,59	3,13
0,65 / 234	Leituras	21	18	74	92	126	135
		19	15	60	68	138	131
		20	17	71	65	153	127
		22	18	96	80	153	130
		19	15	89	59	152	107
	Média	20,20	16,60	78,00	72,80	144,40	126,00
	Desvio Padrão	1,30	1,52	14,44	13,18	12,10	11,00
0,77 / 276	Leituras	17	11	63	63	141	132
		20	15	73	82	152	138
		18	11	89	64	155	126
		21	15	92	68	158	133
		20	10	62	72	162	133
	Média	19,20	12,40	75,80	69,80	153,60	132,40
	Desvio Padrão	1,64	2,41	14,13	7,69	7,96	4,28
1,04 / 374	Leituras	19	14	68	79	137	115
		15	10	57	47	132	103
		19	13	85	56	132	114

		(continuação)					
Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X	
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Ano(s) / Dia(s)		Retrorefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )					
1,04 / 374	Leituras	17	11	84	53	133	93
		16	12	57	65	130	114
	Média	17,20	12,00	70,20	60,00	132,80	107,80
	Desvio Padrão	1,79	1,58	13,81	12,45	2,59	9,63
1,27 / 459		22	17	62	64	133	142
		14	22	73	83	140	123
	Leituras	22	21	95	68	149	130
		25	25	107	70	172	154
		22	23	73	87	139	139
	Média	21,00	21,60	82,00	74,40	146,60	137,60
Desvio Padrão	4,12	2,97	18,41	10,01	15,31	11,84	
1,95 / 702		20	15	60	47	144	115
		22	20	77	63	146	118
	Leituras	20	16	89	50	151	114
		23	20	100	58	162	128
		21	17	60	71	135	132
	Média	21,20	17,60	77,20	57,80	147,60	121,40
Desvio Padrão	1,30	2,30	17,68	9,73	9,91	8,11	
2,34 / 843		19	16	57	54	125	96
		20	21	71	81	124	117
	Leituras	18	15	85	56	139	104
		21	19	95	66	127	123
		18	17	72	60	140	106
	Média	19,20	17,60	76,00	63,40	131,00	109,20
Desvio Padrão	1,30	2,41	14,53	10,85	7,84	10,76	
2,64 / 952		25	17	79	81	144	99
		26	22	81	80	157	123
	Leituras	23	17	99	54	153	120
		26	20	104	61	171	110
		25	18	65	64	168	87
	Média	25,00	18,80	85,60	68,00	158,60	107,80
Desvio Padrão	1,22	2,17	15,87	11,98	11,06	14,96	
2,83 / 1019		25	16	79	73	143	102
		25	21	80	79	150	123
	Leituras	23	16	95	52	159	111
		25	21	107	59	170	104
		26	18	62	59	169	91
	Média	24,80	18,40	84,60	64,40	158,20	106,20
Desvio Padrão	1,10	2,51	17,13	11,17	11,78	11,82	
3,08 / 1108	Leituras	26	15	82	74	140	101
		26	20	82	78	155	125

		(continuação)					
Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X	
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Ano(s) / Dia(s)		Retrorefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )					
3,08 / 1108	Leituras	22	15	91	52	159	109
		24	22	105	57	172	107
		27	18	59	58	169	85
	Média	25,00	18,00	83,80	63,80	159,00	105,40
	Desvio Padrão	2,00	3,08	16,75	11,45	12,71	14,45
3,28 / 1182	Leituras	23	13	75	64	128	98
		23	20	80	69	148	123
		22	13	82	51	145	105
		23	19	102	55	166	92
		26	18	53	56	148	77
	Média	23,40	16,60	78,40	59,00	147,00	99,00
Desvio Padrão	1,52	3,36	17,53	7,31	13,49	16,93	
3,34 / 1203	Leituras	18	13	54	62	118	99
		17	17	74	79	116	101
		23	13	87	51	143	95
		19	16	82	58	139	86
		17	16	56	63	131	99
	Média	18,80	15,00	70,60	62,60	129,40	96,00
Desvio Padrão	2,49	1,87	14,99	10,31	12,14	6,00	
3,39 / 1223	Leituras	17	13	62	48	143	105
		21	17	61	46	141	111
		18	12	78	46	154	97
		19	15	73	62	117	84
		19	14	58	43	145	97
	Média	18,80	14,20	66,40	49,00	140,00	98,80
Desvio Padrão	1,48	1,92	8,62	7,48	13,78	10,16	
3,61 / 1301	Leituras	18	10	57	37	146	74
		18	13	67	39	113	85
		19	8	81	34	157	111
		19	12	74	41	139	89
		19	11	50	42	156	108
	Média	18,60	10,80	65,80	38,60	142,20	93,40
Desvio Padrão	0,55	1,92	12,52	3,21	17,94	15,73	
3,78 / 1361	Leituras	15	12	38	56	73	89
		16	12	46	46	82	79
		15	8	57	34	94	71
		14	13	55	62	99	81
		16	10	50	43	70	88
	Média	15,20	11,00	49,20	48,20	83,60	81,60
Desvio Padrão	0,84	2,00	7,60	11,01	12,70	7,33	
3,99 / 1437	Leituras	17	11	62	50	137	73

		(continuação)					
Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X	
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Ano(s) / Dia(s)	Retrorefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )						
3,99 / 1437	Leituras	20	12	64	59	155	99
		17	12	62	42	157	94
		18	11	88	46	133	79
		18	13	92	42	140	96
	Média	18,00	11,80	73,60	47,80	144,40	88,20
	Desvio Padrão	1,22	0,84	15,06	7,09	10,90	11,48
4,36 / 1568	Leituras	18	14	58	68	152	116
		20	15	57	69	142	120
		20	15	61	55	154	123
		21	12	83	50	148	107
		22	16	81	58	147	115
	Média	20,20	14,40	68,00	60,00	148,60	116,20
Desvio Padrão	1,48	1,52	12,88	8,28	4,67	6,06	
4,57 / 1644	Leituras	19	12	67	68	135	91
		21	12	62	65	172	104
		19	13	81	50	135	108
		20	13	92	51	140	92
		22	13	102	53	143	102
	Média	20,20	12,60	80,80	57,40	145,00	99,40
Desvio Padrão	1,30	0,55	16,72	8,44	15,48	7,54	
4,74 / 1708	Leituras	18	10	60	54	147	78
		18	12	64	56	118	105
		19	9	87	43	144	79
		20	10	87	43	148	100
		18	10	48	48	133	97
	Média	18,60	10,20	69,20	48,80	138,00	91,80
Desvio Padrão	0,89	1,10	17,28	6,06	12,67	12,48	
4,93 / 1773	Leituras	19	11	67	47	149	60
		21	10	64	59	150	104
		21	10	68	38	140	79
		23	12	87	42	155	96
		19	9	54	48	134	83
	Média	20,60	10,40	68,00	46,80	145,60	84,40
Desvio Padrão	1,67	1,14	11,98	7,92	8,44	16,92	
5,10 / 1835	Leituras	21	12	76	45	115	76
		18	10	75	34	131	88
		20	9	58	47	139	92
		21	14	68	71	105	88
		20	10	57	49	137	87
	Média	20,00	11,00	66,80	49,20	125,40	86,20
Desvio Padrão	1,22	2,00	9,04	13,50	14,79	6,02	

		(continuação)					
Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X	
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Ano(s) / Dia(s)		Retrorefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )					
5,27 / 1897	Leituras	19	11	69	67	144	81
		21	12	53	60	155	101
		19	11	85	45	135	84
		22	11	85	54	138	93
		19	10	58	58	136	94
	Média	20,00	11,00	70,00	56,80	141,60	90,60
	Desvio Padrão	1,41	0,71	14,87	8,11	8,26	8,08
5,43 / 1953	Leituras	21	14	75	78	130	90
		23	16	65	77	149	94
		22	13	103	63	133	81
		23	16	110	55	136	90
		21	11	65	60	129	91
	Média	22,00	14,00	83,60	66,60	135,40	89,20
	Desvio Padrão	1,00	2,12	21,44	10,36	8,08	4,87
5,60 / 2016	Leituras	17	9	52	36	155	84
		21	11	50	41	149	89
		18	13	54	31	147	83
		20	9	68	32	155	91
		17	11	47	34	146	81
	Média	18,60	10,60	54,20	34,80	150,40	85,60
	Desvio Padrão	1,82	1,67	8,14	3,96	4,34	4,22
5,76 / 2075	Leituras	18	9	54	36	161	77
		20	11	63	42	116	89
		20	9	83	38	145	74
		22	13	78	40	144	79
		18	9	47	34	147	78
	Média	19,60	10,20	65,00	38,00	142,60	79,40
	Desvio Padrão	1,67	1,79	15,35	3,16	16,38	5,68
5,93 / 2135	Leituras	12	8	61	42	138	67
		20	10	60	46	152	76
		20	8	81	32	135	67
		22	12	83	38	143	73
		18	9	85	35	139	76
	Média	18,40	9,40	74,00	38,60	141,40	71,80
	Desvio Padrão	3,85	1,67	12,41	5,55	6,58	4,55
6,11 / 2198	Leituras	18	10	58	39	134	67
		21	12	57	48	158	81
		20	9	78	39	143	71
		22	11	87	42	129	71
		19	6	49	37	145	76
	Média	20,00	9,60	65,80	41,00	141,80	73,20

		(conclusão)						
Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X		
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	
Ano(s) / Dia(s)		Retrorefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )						
6,11 / 2198	Desvio Padrão	1,58	2,30	15,96	4,30	11,17	5,40	
		17	13	57	70	138	98	
		20	16	51	69	146	114	
6,27 / 2258	Leituras	20	11	80	53	130	105	
		21	14	78	56	154	106	
		18	12	52	58	131	110	
		Média	19,20	13,20	63,60	61,20	139,80	106,60
		Desvio Padrão	1,64	1,92	14,26	7,79	10,21	5,98

Fonte: Autor.

Tabela 32 – Resumo das leituras de retrorefletividade em cada campanha no segmento experimental para as películas de cor branca

		(continua)						
Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X		
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	
Ano(s) / Dia(s)		Retrorefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )						
0,00 / 0	Leituras	85	95	496	495	540	561	
		85	92	497	474	572	611	
		102	94	424	520	541	572	
		94	95	504	478	561	558	
		96	90	449	470	590	613	
		Média	92,40	93,20	474,00	487,40	560,80	583,00
		Desvio Padrão	7,37	2,17	35,49	20,56	21,23	26,99
0,26 / 93	Leituras	104	105	451	452	563	490	
		102	100	480	529	566	553	
		115	101	446	460	554	529	
		90	100	477	499	589	578	
		105	93	466	507	589	570	
		Média	103,20	99,80	464,00	489,40	572,20	544,00
		Desvio Padrão	8,93	4,32	15,18	32,53	15,96	35,55
0,51 / 182	Leituras	110	96	372	340	591	586	
		113	92	383	372	597	554	
		118	100	351	374	595	638	
		105	91	407	378	581	590	
		112	86	407	383	603	615	
		Média	111,60	93,00	384,00	369,40	593,40	596,60
		Desvio Padrão	4,72	5,29	23,94	16,96	8,17	31,71
0,65 / 234	Leituras	114	87	535	468	545	527	
		88	78	444	441	574	565	

		(continuação)					
Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X	
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Ano(s) / Dia(s)	Retrorrefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )						
0,65 / 234	Leituras	115	79	475	407	598	627
		105	86	481	478	570	478
		87	74	522	462	536	521
	Média	101,80	80,80	491,40	451,20	564,60	543,60
	Desvio Padrão	13,63	5,54	36,95	28,17	24,67	55,91
0,77 / 276	Leituras	105	108	518	373	636	635
		111	114	438	405	660	562
		106	104	493	394	655	615
		115	109	470	424	663	610
	108	106	439	387	638	603	
Média	109,00	108,20	471,60	396,60	650,40	605,00	
Desvio Padrão	4,06	3,77	34,66	19,22	12,58	26,82	
1,04 / 374	Leituras	91	94	482	346	542	468
		85	87	490	422	564	468
		86	89	500	422	548	430
		83	83	502	357	560	496
		90	79	520	323	528	497
Média	87,00	86,40	498,80	374,00	548,40	471,80	
Desvio Padrão	3,39	5,73	14,32	45,50	14,45	27,37	
1,27 / 459	Leituras	86	105	577	618	595	612
		97	116	587	580	616	581
		87	96	605	628	614	589
		96	107	574	619	597	545
		90	100	494	494	583	593
Média	91,20	104,80	567,40	587,80	601,00	584,00	
Desvio Padrão	5,07	7,60	42,78	55,59	13,87	24,60	
1,95 / 702	Leituras	98	79	599	535	595	482
		112	93	550	522	547	518
		88	83	630	469	545	437
		107	91	564	448	576	435
		94	80	550	466	576	479
Média	99,80	85,20	578,60	488,00	567,80	470,20	
Desvio Padrão	9,71	6,42	35,03	38,11	21,37	34,80	
2,34 / 843	Leituras	84	86	600	565	546	406
		89	85	541	499	486	444
		87	78	609	558	505	387
		101	85	544	496	469	435
		83	86	601	470	520	407
Média	88,80	84,00	579,00	517,60	505,20	415,80	
Desvio Padrão	7,22	3,39	33,52	41,70	29,84	23,27	
2,64 / 952	Leituras	108	82	565	393	646	525

(continuação)

Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X	
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Ano(s) / Dia(s)	Retrorefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )						
2,64 / 952	Leituras	112	84	521	367	672	503
		104	76	539	450	647	481
		115	80	461	409	636	479
		90	84	473	305	602	587
	Média	105,80	81,20	511,80	384,80	640,60	515,00
	Desvio Padrão	9,76	3,35	43,99	53,83	25,33	44,38
2,83 / 1019	Leituras	98	78	526	373	649	477
		107	85	478	371	681	528
		107	70	547	440	605	491
		113	78	440	425	629	492
	Média	102,40	79,20	495,20	385,00	629,00	505,00
	Desvio Padrão	10,14	6,22	42,07	49,31	38,68	25,99
3,08 / 1108	Leituras	89	75	488	362	651	467
		103	82	474	335	659	512
		103	71	522	428	609	445
		110	73	405	407	607	446
	Média	97,20	76,40	475,00	372,00	622,40	483,80
	Desvio Padrão	11,84	4,88	43,01	44,06	31,22	45,45
3,28 / 1182	Leituras	86	75	453	334	636	463
		93	78	413	303	596	475
		97	69	517	378	528	412
		96	68	350	351	560	421
	Média	89,20	72,80	443,00	338,00	579,80	451,00
	Desvio Padrão	9,52	4,21	64,51	28,31	40,30	32,52
3,34 / 1203	Leituras	103	60	476	334	501	407
		93	88	432	257	520	431
		80	57	488	403	842	397
		98	64	478	392	539	446
	Média	88,80	69,40	458,40	354,40	579,20	446,00
	Desvio Padrão	13,55	13,15	31,22	60,57	147,95	60,74
3,39 / 1223	Leituras	110	59	481	343	566	398
		118	85	455	280	553	415
		95	55	499	328	570	442
		111	63	570	339	800	433
	Média	108,00	66,40	504,20	322,20	607,80	430,00
	Desvio Padrão	8,46	11,78	43,17	25,15	107,77	24,63

		(continuação)					
Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X	
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Ano(s) / Dia(s)	Retrorrefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )						
3,61 / 1301	Leituras	90	48	477	228	586	338
		109	62	351	222	647	315
		70	50	457	208	660	321
		100	49	411	228	644	310
		97	65	326	270	620	406
	Média	93,20	54,80	404,40	231,20	631,40	338,00
	Desvio Padrão	14,65	8,04	65,34	23,18	29,20	39,45
3,78 / 1361	Leituras	97	70	397	202	674	398
		79	47	406	143	737	337
		67	41	333	155	666	339
		68	45	312	251	660	302
		88	54	388	205	708	340
	Média	79,80	51,40	367,20	191,20	689,00	343,20
	Desvio Padrão	12,91	11,41	41,96	43,35	32,63	34,52
3,99 / 1437	Leituras	94	59	510	337	620	399
		87	61	507	257	554	417
		80	59	437	294	493	425
		108	52	607	348	630	372
		104	51	542	305	600	396
	Média	94,60	56,40	520,60	308,20	579,40	401,80
	Desvio Padrão	11,61	4,56	61,66	36,22	56,44	20,61
4,36 / 1568	Leituras	94	68	504	419	606	511
		97	62	349	389	568	442
		85	56	426	356	534	532
		108	66	523	424	587	507
		110	57	501	364	559	448
	Média	98,80	61,80	460,60	390,40	570,80	488,00
	Desvio Padrão	10,33	5,31	72,56	30,94	27,40	40,44
4,57 / 1644	Leituras	88	57	517	306	567	436
		97	55	458	386	555	393
		83	65	420	288	486	410
		98	55	514	340	561	432
		102	52	467	322	522	397
	Média	93,60	56,80	475,20	328,40	538,20	413,60
	Desvio Padrão	7,83	4,92	40,81	37,51	33,98	19,71
4,74 / 1708	Leituras	84	44	514	263	596	369
		100	45	439	263	509	356
		93	43	516	267	570	320
		109	48	494	263	536	337
		92	50	460	201	488	334
	Média	95,60	46,00	484,60	251,40	539,80	343,20

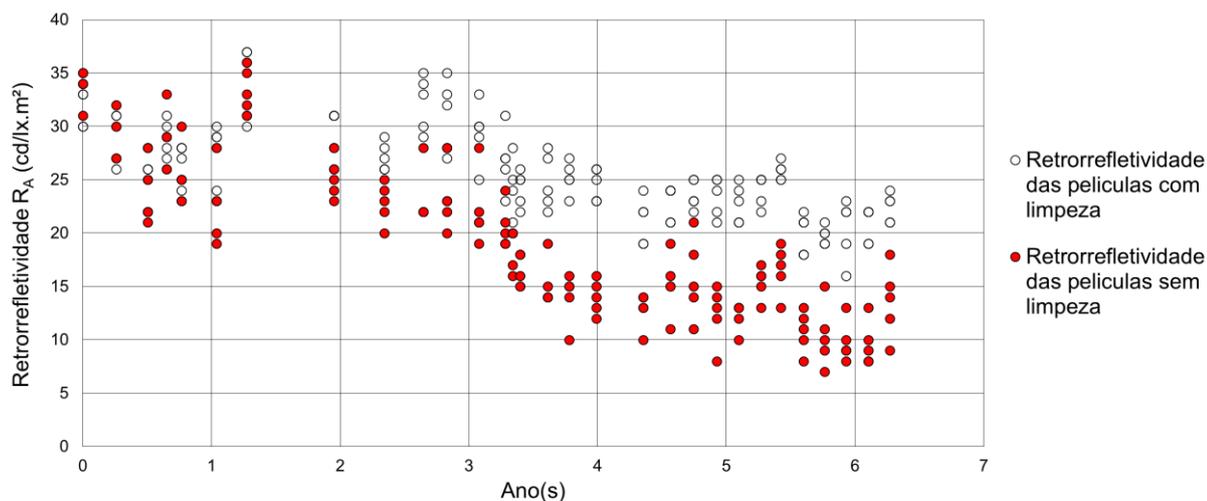
(continuação)

Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X		
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	
Ano(s) / Dia(s)	Retrorefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )							
4,74 / 1708	Desvio Padrão	9,40	2,92	34,00	28,23	43,92	19,31	
		84	41	487	289	600	351	
4,93 / 1773	Leituras	99	53	424	307	580	313	
		104	45	588	263	589	323	
	116	39	466	310	645	400		
	88	45	447	188	543	371		
	Média	98,20	44,60	482,40	271,40	591,40	351,60	
	Desvio Padrão	12,81	5,37	63,45	50,23	36,83	35,45	
5,10 / 1835	Leituras	113	44	538	276	664	334	
		92	59	514	282	506	337	
	93	60	469	285	497	381		
	118	51	476	392	711	447		
	79	50	514	244	542	312		
	Média	99,00	52,80	502,20	295,80	584,00	362,20	
5,27 / 1897	Leituras	Desvio Padrão	16,14	6,69	28,93	56,21	97,40	53,61
		89	54	551	412	563	377	
	95	46	482	404	575	433		
	110	56	581	412	609	379		
	113	50	518	365	609	374		
	93	63	486	273	532	376		
Média	100,00	53,80	523,60	373,20	577,60	387,80		
5,43 / 1953	Leituras	Desvio Padrão	10,77	6,42	42,49	59,30	32,68	25,33
		99	60	613	427	533	391	
	100	57	617	350	530	392		
	111	59	718	433	556	372		
	116	59	602	400	601	355		
	95	62	556	325	462	301		
Média	104,20	59,40	621,20	387,00	536,40	362,20		
5,60 / 2016	Leituras	Desvio Padrão	8,87	1,82	59,32	47,69	50,36	37,45
		103	42	363	198	632	337	
	100	48	351	187	623	342		
	104	48	358	230	595	446		
	112	41	353	206	613	331		
	95	54	351	152	565	376		
Média	102,80	46,60	355,20	194,60	605,60	366,40		
5,76 / 2075	Leituras	Desvio Padrão	6,22	5,27	5,22	28,58	26,53	47,80
		90	41	441	199	573	272	
	101	43	431	220	742	337		
	93	42	489	242	572	300		
	111	40	520	177	606	302		
	103	49	386	179	522	367		

		(conclusão)					
Tipo de película (NBR 14644)		I		III		X	
Limpeza		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Ano(s) / Dia(s)		Retrorefletividade (cd/lx*m <sup>2</sup> )					
5,76 / 2075	Média	99,60	43,00	453,40	203,40	603,00	315,60
	Desvio Padrão	8,35	3,54	52,20	27,74	83,29	36,84
5,93 / 2135	Leituras	92	41	481	235	556	211
		100	42	416	203	540	286
		106	40	544	234	589	226
		108	35	531	233	583	263
		108	27	463	194	506	323
	Média	102,80	37,00	487,00	219,80	554,80	261,80
	Desvio Padrão	6,87	6,20	52,05	19,72	33,79	45,26
6,11 / 2198	Leituras	91	44	458	294	567	297
		99	56	459	211	572	266
		102	43	508	316	585	282
		109	39	519	316	576	310
		98	38	434	150	522	369
	Média	99,80	44,00	475,60	257,40	564,40	304,80
	Desvio Padrão	6,53	7,18	36,23	73,99	24,60	39,48
6,27 / 2258	Leituras	85	61	541	483	557	398
		104	72	484	385	550	477
		99	63	568	494	567	427
		106	64	567	453	574	476
		87	67	448	306	518	473
	Média	96,20	65,40	521,60	424,20	553,20	450,20
	Desvio Padrão	9,68	4,28	53,44	78,53	21,72	35,94

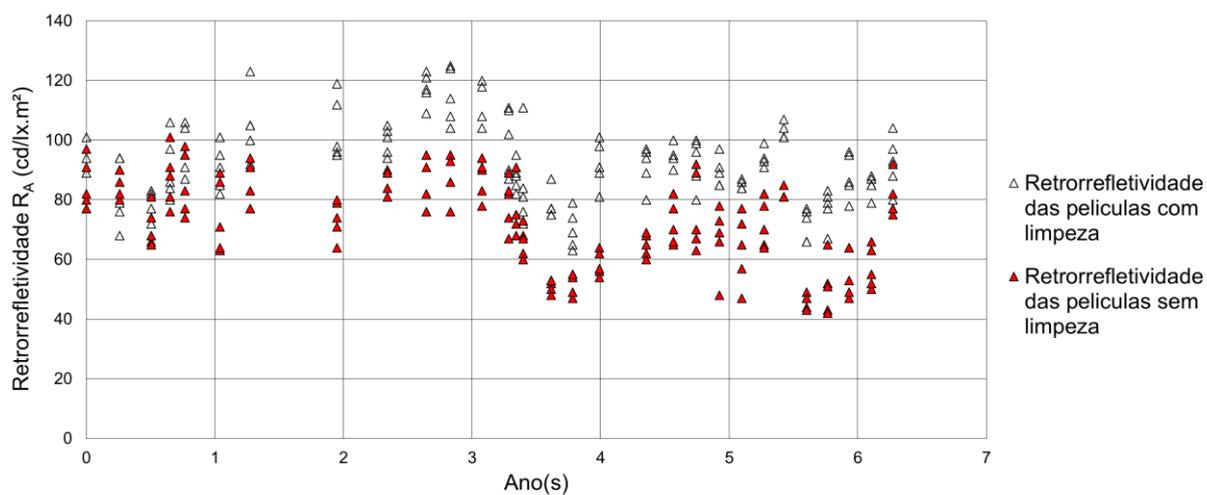
Fonte: Autor.

Figura 32 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor vermelha do tipo I (NBR 14644) do segmento experimental



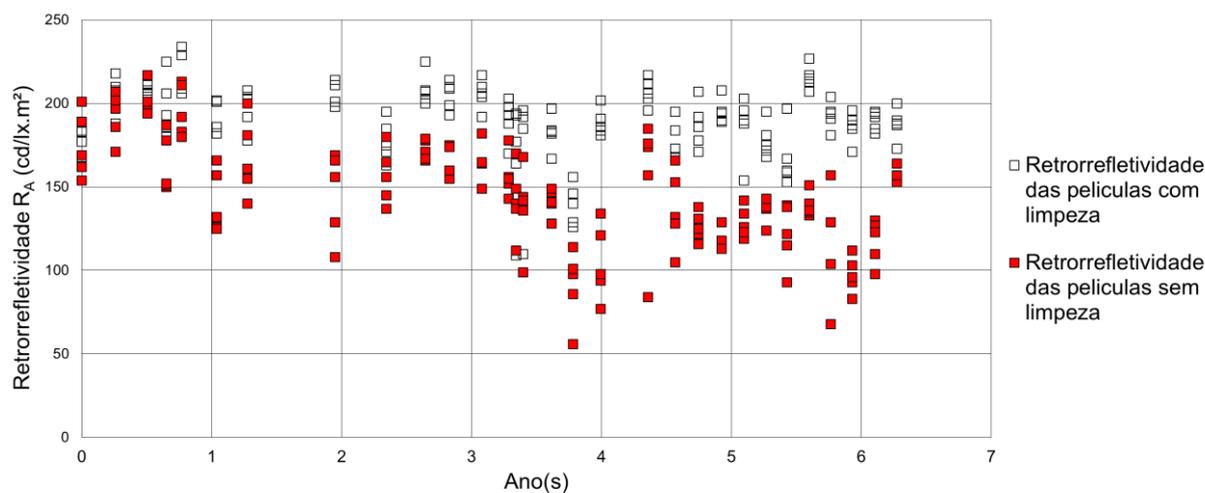
Fonte: Autor.

Figura 33 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor vermelha do tipo III (NBR 14644) do segmento experimental



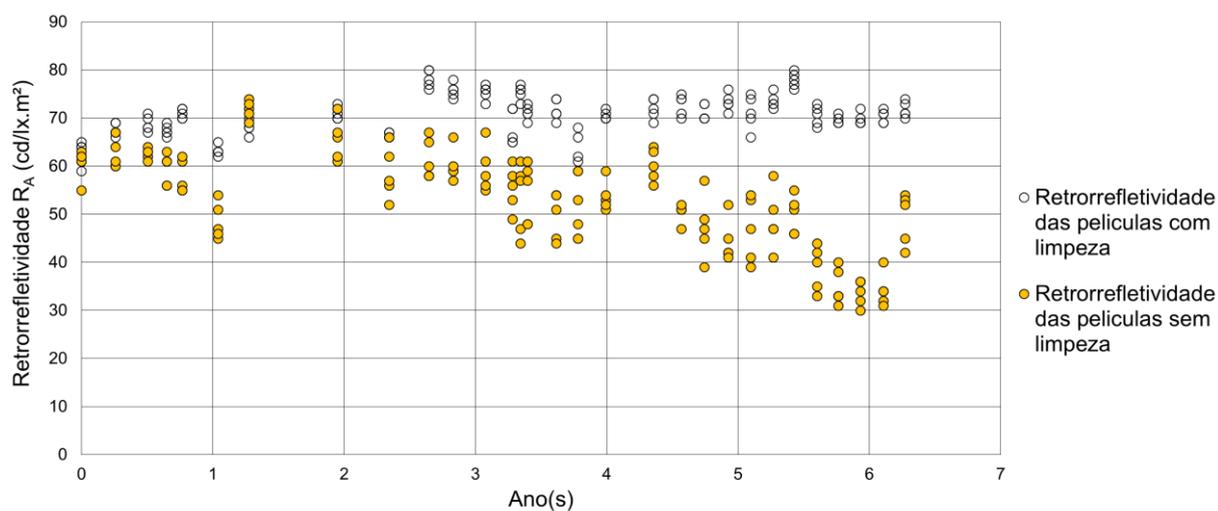
Fonte: Autor.

Figura 34 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor vermelha do tipo X (NBR 14644) do segmento experimental



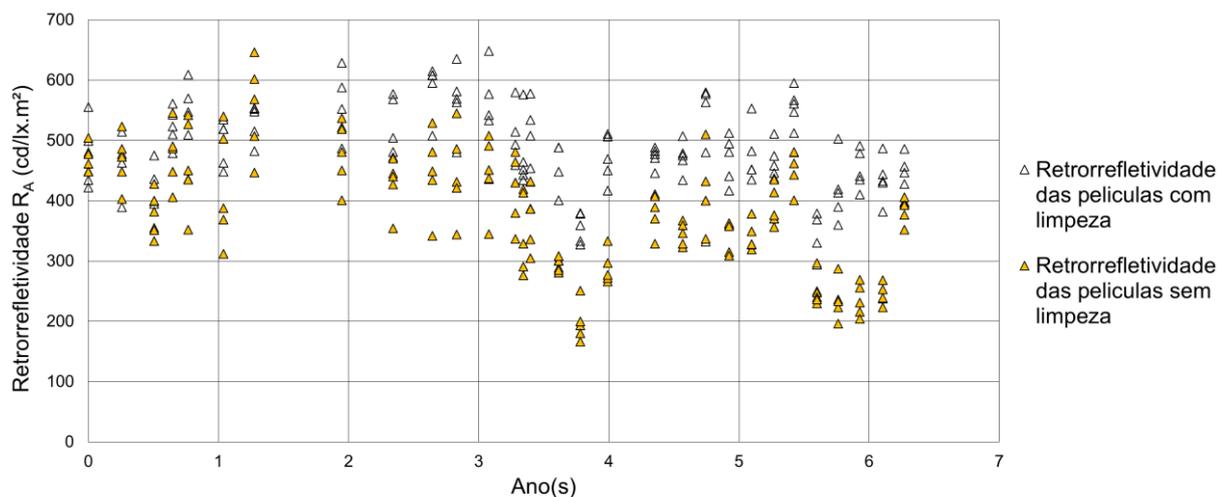
Fonte: Autor.

Figura 35 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor amarela do tipo I (NBR 14644) do segmento experimental



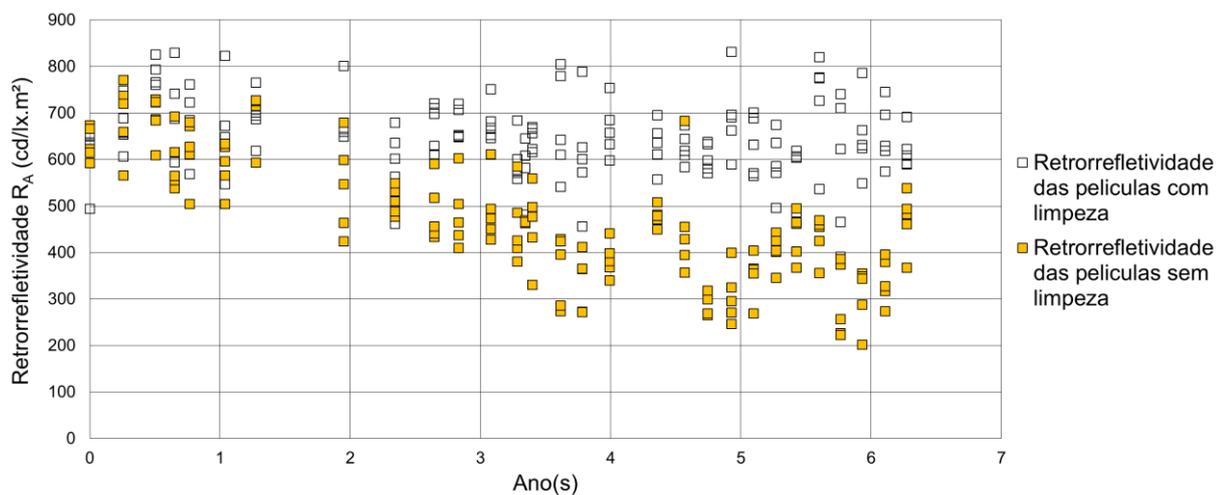
Fonte: Autor.

Figura 36 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor amarela do tipo III (NBR 14644) do segmento experimental



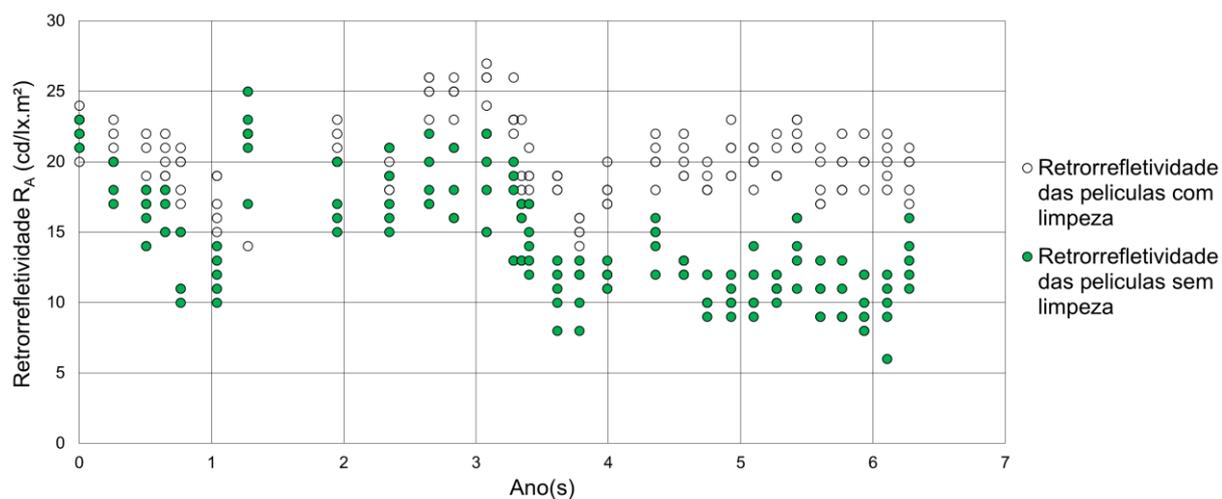
Fonte: Autor.

Figura 37 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor amarela do tipo X (NBR 14644) do segmento experimental



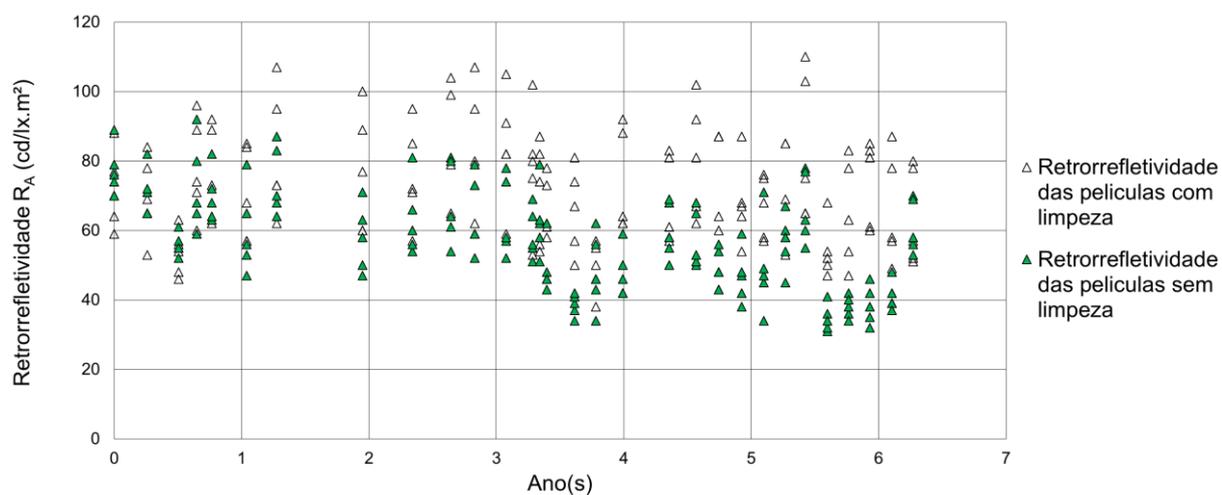
Fonte: Autor.

Figura 38 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor verde do tipo I (NBR 14644) do segmento experimental



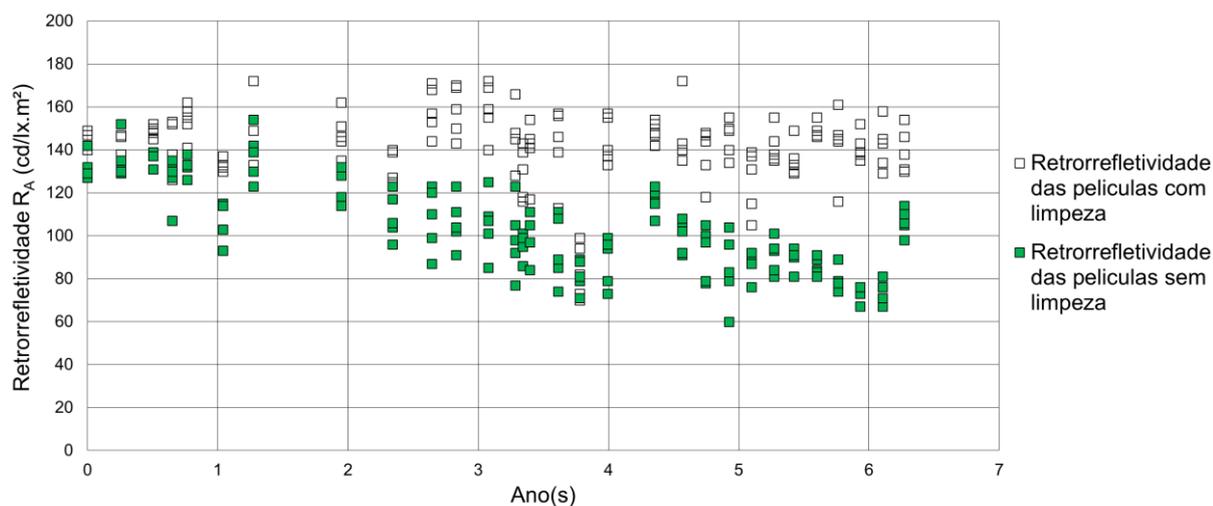
Fonte: Autor.

Figura 39 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor verde do tipo III (NBR 14644) do segmento experimental



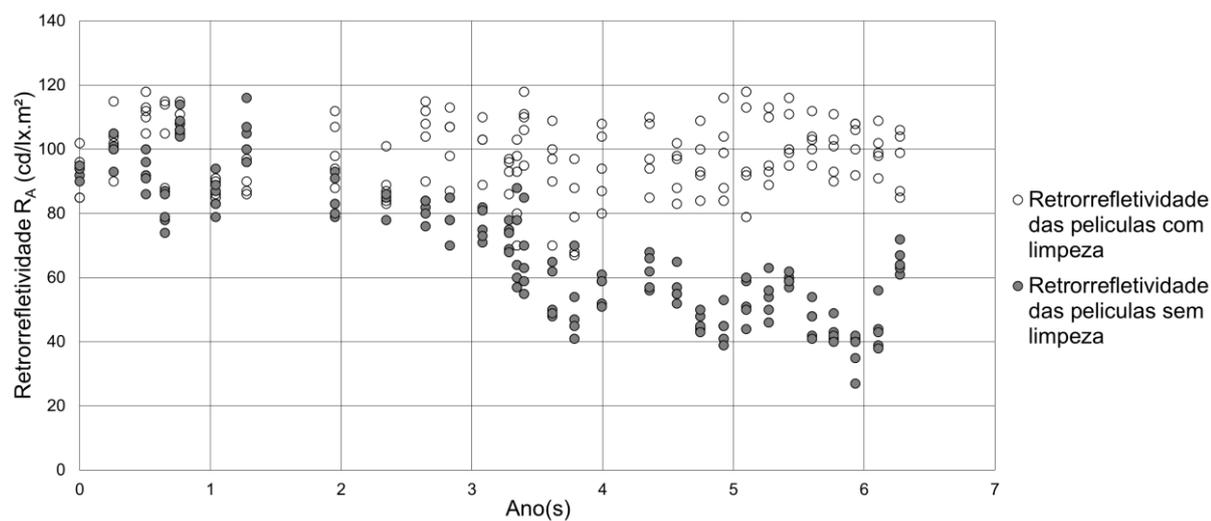
Fonte: Autor.

Figura 40 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor verde do tipo X (NBR 14644) do segmento experimental



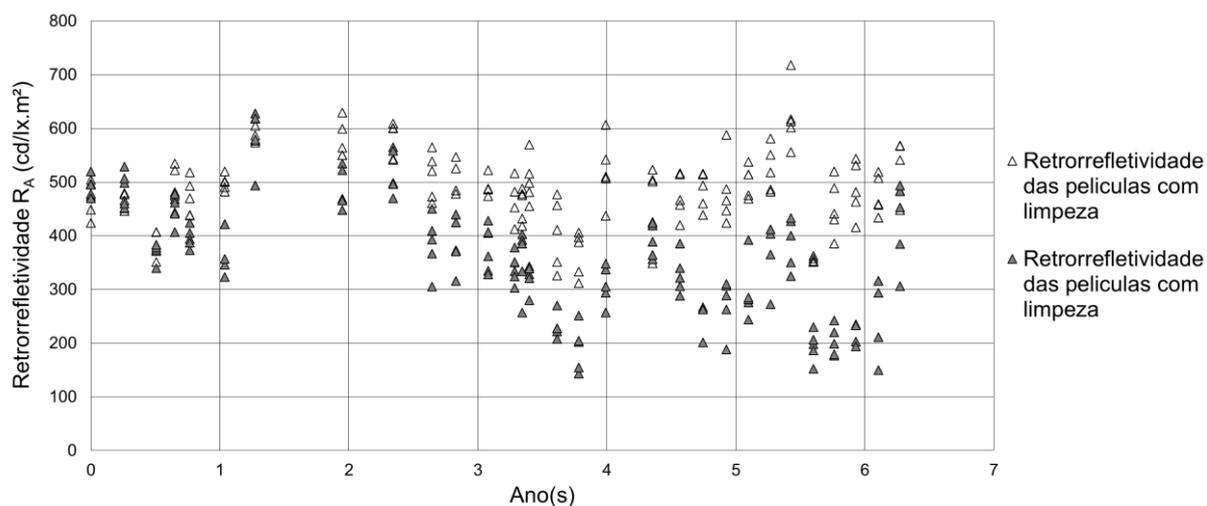
Fonte: Autor.

Figura 41 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor branca do tipo I (NBR 14644) do segmento experimental



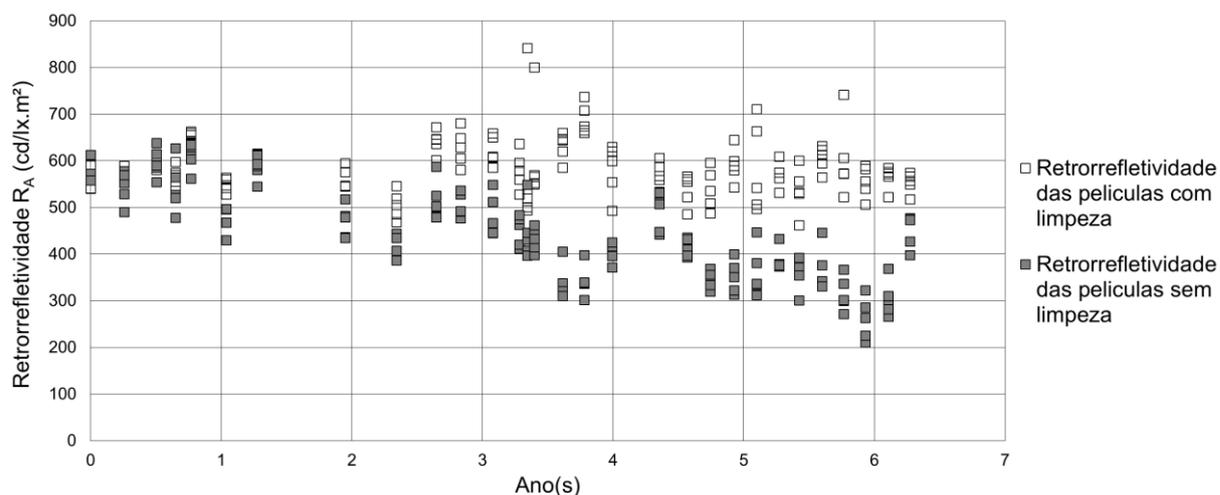
Fonte: Autor.

Figura 42 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor branca do tipo III (NBR 14644) do segmento experimental



Fonte: Autor.

Figura 43 – Medidas de retrorrefletividade em função do tempo para as películas de cor branca do tipo X (NBR 14644) do segmento experimental



Fonte: Autor.

Quanto às Tabela 29, Tabela 30, Tabela 31 e Tabela 32 e às Figura 32 a Figura 43, nota-se que as medidas de retrorrefletividade para as cores brancas e amarelas são similares em grandeza para o mesmo tipo de película, assim como as verdes e vermelhas. Contudo, na comparação entre todas as cores, verifica-se uma superioridade entre as cores brancas e amarelas.

Observa-se, pelos gráficos expostos nas Figura 32 à Figura 43, que, para os pares semelhantes de películas (com e sem limpeza), ocorre uma perda notável de desempenho se confrontar as películas que não recebiam limpeza com as que recebiam. É possível perceber que, ao longo do tempo, as medidas das placas com limpeza foram se tornando superiores às medidas das placas sem limpeza em todas as comparações. Essa porcentagem de perda será melhor discutida nos itens posteriores. Além disso, percebe-se que as medidas com limpeza e sem limpeza se mantêm muito próximas no início da sua vida útil, dispersando-se após 1 a 2 anos subsequentes à implementação.

Para a análise dos desvios padrões obtidos nas campanhas de leituras de retrorefletividade, foi exposto em porcentagem, na Tabela 33, o desvio padrão médio em relação à retrorefletividade média de todas as leituras feitas no segmento experimental. Também são apresentados o maior e o menor desvio padrão entre todas campanhas realizadas juntamente na data do ocorrido. Essa análise tem como intuito verificar se a sujeira nas películas gerou maiores desvios padrões do que as medidas realizadas nas películas que usualmente eram limpas.

Tabela 33 – Resumo dos desvios padrões observados nas campanhas de medidas realizadas no segmento experimental

								(continua)
Cor	Tipo de película (NBR 14644)	Limpeza	Desvio Padrão Médio	Maior Desvio Padrão	Ano(s) do maior desvio padrão	Menor Desvio Padrão	Ano(s) do menor desvio padrão	
Vermelho	I	Sim	8,03%	14,12%	5,93	3,24%	5,43	
Vermelho	I	Não	14,00%	28,52%	5,76	4,51%	0,00	
Vermelho	III	Sim	8,17%	18,10%	3,40	1,66%	5,10	
Vermelho	III	Não	10,40%	18,79%	5,10	4,23%	3,61	
Vermelho	X	Sim	6,62%	21,08%	3,40	1,61%	0,51	
Vermelho	X	Não	11,71%	29,43%	5,76	2,88%	6,27	
Amarelo	I	Sim	2,47%	5,86%	3,78	0,82%	2,34	
Amarelo	I	Não	8,39%	14,52%	5,10	1,82%	0,51	
Amarelo	III	Sim	9,95%	20,88%	4,74	3,43%	4,36	
Amarelo	III	Não	11,41%	22,63%	1,04	3,89%	3,61	
Amarelo	X	Sim	8,96%	23,88%	5,76	2,50%	3,08	
Amarelo	X	Não	13,33%	27,57%	4,57	0,55%	3,34	
Verde	I	Sim	8,06%	20,91%	5,93	2,94%	3,61	
Verde	I	Não	13,44%	23,98%	6,11	4,35%	4,57	
Verde	III	Sim	19,79%	27,24%	3,78	12,67%	0,51	

Cor	Tipo de película (NBR 14644)	Limpeza	Desvio Padrão Médio (%)	Maior Desvio Padrão	Ano(s) do maior desvio padrão	Menor Desvio Padrão	(conclusão)
							Ano(s) do menor desvio pa- drão
Verde	III	Não	14,59%	27,44%	5,10	5,92%	0,51
Verde	X	Sim	7,17%	12,61%	3,61	1,74%	0,51
Verde	X	Não	9,01%	20,05%	4,93	2,30%	0,51
Branco	I	Sim	9,65%	16,30%	5,10	3,73%	0,77
Branco	I	Não	9,21%	22,21%	3,78	2,33%	0,00
Branco	III	Sim	8,64%	16,16%	3,61	1,47%	5,60
Branco	III	Não	12,04%	28,74%	6,11	4,22%	0,00
Branco	X	Sim	6,77%	25,54%	3,34	1,38%	0,51
Branco	X	Não	8,47%	17,29%	5,93	4,21%	1,28

Fonte: Autor.

Quanto à comparação entre a porcentagem média de desvio padrão e as leituras obtidas no segmento experimental das películas com e sem limpeza (Tabela 33), nota-se que, das 12 comparações entre os desvios padrões médios das medidas com e sem limpeza, apenas duas sinalizaram que as medições com limpeza dispersaram mais do que as medidas sem limpeza. Isso demonstra que, usualmente, as medidas sem limpeza apresentam um desvio padrão maior do que das medidas que recebiam limpeza.

Além desse fato, qualificando os desvios padrões médios entre os 12 maiores desvios e os 12 menores, observou-se a dominância do grupo sem limpeza nos maiores desvios padrões. Entre o grupo dos 12 maiores desvios padrões, estão ranqueadas apenas 3 películas que recebiam limpeza regularmente. Com isso, mostra-se uma predominância das películas que não recebiam limpeza nos maiores desvios padrões.

Os desvios padrões obtidos das películas que não recebiam limpeza regular foram, em média, 2,64% maior do que os encontrados para as películas com limpeza.

Quanto aos maiores desvios padrões médios em relação à cor e ao tipo de película, não houve uma singularidade na cor quanto nem no tipo. Pois, considerando a cor, as películas de cor verde de tipo III com e sem limpeza exibiram os maiores desvios padrões médios. Entretanto, a cor verde de tipo I e tipo X com limpeza, na avaliação dos desvios padrões médios, tiveram o sexto e quarto menor desvio padrão, respectivamente. Para o tipo de película, observou-se de semelhante forma, dado que películas como vermelho e verde de tipo I sem limpeza dispuseram do terceiro e do

quarto maiores desvios padrões médios, mas a película de cor amarela tipo I com limpeza apresentou o menor desvio padrão. Não foi apresentada uma particularidade nos desvios padrões tanto no que concerne à cor quanto ao tipo de película.

#### **4.1.2 Modelos preditivos de retrorrefletividade dos dados do segmento experimental**

Inicialmente, tinha-se optado por analisar os dados com os valores absolutos de retrorrefletividade obtidos ao longo das campanhas de leituras realizadas desde a implantação das películas. Contudo, pode-se observar, a partir dos resultados expostos nas Tabela 29 à Tabela 32 e nas Figura 32 à Figura 43, que as medidas apresentaram uma variação significativa para uma avaliação concisa dos resultados. Verifica-se que, tanto para uma campanha de medição quanto para a comparação entre diferentes campanhas de medições, existe um fator que influencia as leituras de retrorrefletividade e faz com que seja complexo fazer uma avaliação apenas com as nuvens de pontos.

Outro empecilho para realizar comparações entre uma possível perda de desempenho retrorrefletivo de cada película refere-se às diferentes grandezas em relação aos valores de retrorrefletividade. Isso porque comparações entre as medidas de retrorrefletividade e os tipos de películas analisados para uma mesma cor demonstram que as películas de tipo X apresentaram os maiores valores, ao passo que as de tipo I mostraram os menores valores para todas as cores. Do mesmo modo, comparações entre diferentes cores para um mesmo tipo de película apresentou distinção entre os resultados obtidos.

Por esses motivos, decidiu-se modelar uma equação que pudesse representar em porcentagem os dados obtidos ao longo do monitoramento a fim de realizar análises semelhantes entre elas e que tivesse um maior embasamento matemático.

A partir desse fato, optou-se por transformar esses modelos em relação à porcentagem de perda de retrorrefletividade ao longo do tempo. Para isso, modelou-se uma regressão linear, sem intercepto fixo, para que fossem representados da melhor forma possível os dados adquiridos ao fim do período de monitoramento deste estudo em cada uma das películas estudadas.

Após encontrado o modelo que melhor representasse os dados de retrorrefletividade para cada uma das películas, empregou-se esse intercepto concebido pelo modelo anterior como a medida inicial de retrorrefletividade.

Em seguida, com valor representativo da medida inicial para cada uma das películas, todos os resultados de retrorrefletividade de cada película foram divididos por seu valor inicial, encontrado no primeiro modelo. Com os dados transformados, foi elaborado um segundo modelo, buscando, assim, uma equação que caracterize a nuvem de pontos quanto à perda de desempenho. Portanto, foram geradas equações referentes à porcentagem de perda da retrorrefletividade inicial.

Salienta-se que foram elaborados modelos de regressão linear em função do tempo, os quais foram distinguidos em relação à cor de película, ao tipo de película e à limpeza, na tentativa de encontrar um modelo que melhor se adequasse aos resultados encontrados em cada película analisada.

Segundo Field (2011), modelos matemáticos elaborados a partir de dados experimentais obtidos por meio do processo de regressão são uma forma de prever algum resultado a partir de uma ou mais variáveis predictoras. Esses modelos podem ser utilizados para fazer cálculo a partir de apenas uma única variável (regressão simples) ou de diversas variáveis (regressão múltipla).

Ressalta-se que, de acordo com os modelos encontrados na literatura internacional consultada, procurou-se adaptar os modelos em regressão do tipo linear para eventuais comparações. Ademais, outros tipos de modelo foram desenvolvidos; contudo, apenas os polinomiais de segundo grau ou superior tiveram um valor similar aos modelos lineares entre o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), sendo observada uma variação de  $\pm 0,05$ . Todavia, os modelos polinomiais de maior grau apresentaram um aumento da retrorrefletividade a partir de um determinado tempo de serviço da película, sendo um comportamento inesperado uma película melhorar seu desempenho ao longo do tempo. Os modelos exponencial, logaritmo e potência, do mesmo modo, foram modelados; porém, houve uma baixa significância do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) em relação aos modelos lineares.

Para avaliar a capacidade preditiva do modelo, as condições de avaliação entre os modelos gerados se deram sobre: os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e o erro padrão de estimativa

Ao total, para cada uma das películas instaladas em campo, foram gerados 24 modelos preditivos para segmento experimental. Na Tabela 34, é apresentado um

resumo com todos os modelos preditivos lineares e os resultados da análise de variância realizada para cada uma das regressões.

Tabela 34 – Resumo dos modelos preditivos e resultados da análise de variância (ANOVA) das regressões

Grupo(s)	Modelo preditivo linear	Modelo	Erro padrão de estimativa	R <sup>2</sup>
Vermelho - Tipo I - Com limpeza	$RA\%_{VLH-I-C} = 1 - 0,0489 \times \text{Ano}(s)$	(1)	0,1035	0,42
Vermelho - Tipo I - Sem limpeza	$RA\%_{VLH-I-S} = 1 - 0,1081 \times \text{Ano}(s)$	(2)	0,1190	0,73
Vermelho - Tipo III - Com limpeza	$RA\%_{VLH-III-C} = 1 - 0,0146 \times \text{Ano}(s)$	(3)	0,1384	0,04
Vermelho - Tipo III - Sem limpeza	$RA\%_{VLH-III-S} = 1 - 0,0469 \times \text{Ano}(s)$	(4)	0,1498	0,24
Vermelho - Tipo X - Com limpeza	$RA\%_{VLH-X-C} = 1 - 0,0154 \times \text{Ano}(s)$	(5)	0,1000	0,07
Vermelho - Tipo X - Sem limpeza	$RA\%_{VLH-X-S} = 1 - 0,0602 \times \text{Ano}(s)$	(6)	0,1383	0,38
Amarelo - Tipo I - Com limpeza	$RA\%_{AML-I-C} = 1 + 0,0098 \times \text{Ano}(s)$	(7)	0,0553	0,09
Amarelo - Tipo I - Sem limpeza	$RA\%_{AML-I-S} = 1 - 0,0601 \times \text{Ano}(s)$	(8)	0,1082	0,50
Amarelo - Tipo III - Com limpeza	$RA\%_{AML-III-C} = 1 - 0,0240 \times \text{Ano}(s)$	(9)	0,1366	0,09
Amarelo - Tipo III - Sem limpeza	$RA\%_{AML-III-S} = 1 - 0,0639 \times \text{Ano}(s)$	(10)	0,1665	0,32
Amarelo - Tipo X - Com limpeza	$RA\%_{AML-X-C} = 1 - 0,0185 \times \text{Ano}(s)$	(11)	0,1143	0,08
Amarelo - Tipo X - Sem limpeza	$RA\%_{AML-X-S} = 1 - 0,0839 \times \text{Ano}(s)$	(12)	0,1303	0,58
Verde - Tipo I - Com limpeza	$RA\%_{VRD-I-C} = 1 - 0,0080 \times \text{Ano}(s)$	(13)	0,1316	0,01
Verde - Tipo I - Sem limpeza	$RA\%_{VRD-I-S} = 1 - 0,0687 \times \text{Ano}(s)$	(14)	0,1688	0,35
Verde - Tipo III - Com limpeza	$RA\%_{VRD-III-C} = 1 - 0,0148 \times \text{Ano}(s)$	(15)	0,2104	0,02
Verde - Tipo III - Sem limpeza	$RA\%_{VRD-III-S} = 1 - 0,0575 \times \text{Ano}(s)$	(16)	0,1657	0,28
Verde - Tipo X - Com limpeza	$RA\%_{VRD-X-C} = 1 - 0,0087 \times \text{Ano}(s)$	(17)	0,1151	0,02
Verde - Tipo X - Sem limpeza	$RA\%_{VRD-X-S} = 1 - 0,0663 \times \text{Ano}(s)$	(18)	0,1005	0,59
Branco - Tipo I - Com limpeza	$RA\%_{BRC-I-C} = 1 - 0,0028 \times \text{Ano}(s)$	(19)	0,1151	0,00
Branco - Tipo I - Sem limpeza	$RA\%_{BRC-I-S} = 1 - 0,0956 \times \text{Ano}(s)$	(20)	0,1022	0,74
Branco - Tipo III - Com limpeza	$RA\%_{BRC-III-C} = 1 - 0,0013 \times \text{Ano}(s)$	(21)	0,1475	0,00
Branco - Tipo III - Sem limpeza	$RA\%_{BRC-III-S} = 1 - 0,0732 \times \text{Ano}(s)$	(22)	0,1838	0,34
Branco - Tipo X - Com limpeza	$RA\%_{BRC-X-C} = 1 - 0,0060 \times \text{Ano}(s)$	(23)	0,0996	0,01
Branco - Tipo X - Sem limpeza	$RA\%_{BRC-X-S} = 1 - 0,0718 \times \text{Ano}(s)$	(24)	0,1049	0,60
		Média Total	0,1294	

Fonte: Autor.

Quanto ao erro padrão de estimativa exposto na Tabela 34, os modelos apresentaram valores médios de erro padrão de 0,1294. Observa-se que os erros padrões foram próximos da média. Quando comparado os erros padrões de estimativa médios entre os tipos de películas (I, III e X) os resultados médios encontrados foram de 0,1130 para o tipo I, 0,1623 para o tipo III e 0,1129 para o tipo X. Mostra-se, assim, que as películas de tipo III tiveram em média os maiores erros padrões de estimativa entre as comparações, com o tipo I e X apresentando valores próximos entre eles.

Usando essa mesma análise para as diferentes cores quanto aos erros padrões médios, os resultados obtidos foram de 0,1248, 0,1185, 0,1487 e 0,1255 para as cores vermelho, amarelo, verde e branco, respectivamente, desse modo demonstra que a cor verde foi a que exibiu em média os maiores erros padrões de estimativa, já as cores vermelho e branco mostraram-se resultados próximos porém menores que a cor verde, seguindo da cor amarela que mostrou o menor erro padrão entre elas.

Verifica-se que, mesmo tentando ajustar os modelos preditivos lineares da melhor maneira, nota-se que, para as películas que usualmente recebiam limpeza, não foi possível gerar um modelo que representasse bem a variação de retrorrefletividade encontrada em campo. Observa-se que os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para os modelos preditivos das películas com limpeza exibiram o valor abaixo de 0,10 para 11 dos 12 modelos. Isso significa que o modelo linear gerado não se ajusta aos resultados de retrorrefletividade encontrados em campo.

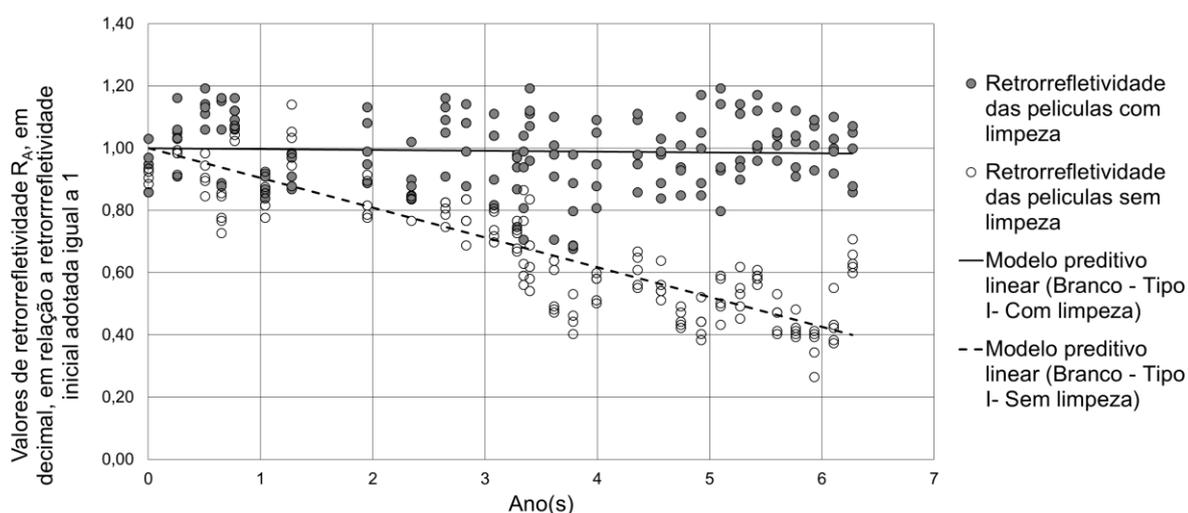
Para os modelos lineares representativos dos resultados de retrorrefletividade das películas sem limpeza, foi possível verificar um maior ajuste do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), se comparado aos modelos de películas que recebiam limpeza regularmente. Todavia, alguns deles não apresentaram valores de coeficientes de determinação tão altos – mais próximos de 1 –, mas muito próximo aos obtidos por outros modelos na literatura internacional. Esse fato mostra a adversidade que outros autores encontram em modelar as suas medidas retrorrefletivas, o que talvez ocorra em virtude de alguma variação nos valores que não é explicada de forma completa pelo modelos matemáticos.

A média dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtida para as películas sem limpeza foi de 0,47, sendo 0,24 a menor e 0,74 a maior, os quais se referem às películas nas cores verde e branco tipo I, respectivamente. Já para as películas com limpeza, a média foi de 0,07, sendo que as películas de cor branca de tipo I e III mostraram o menor valor (0,00). O maior valor foi de 0,42, atribuído a película vermelha tipo I.

Para exemplificar, graficamente, os modelos lineares ajustados às leituras realizadas ao longo do tempo, estão apresentados, na Figura 44, os valores da película de cor branca do tipo I com e sem limpeza, juntamente com os modelos lineares gerados. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para o modelo preditivo da película de cor branca de tipo I obteve um valor 0,00 para as películas que receberam limpeza e 0,74 para as que não receberam. Salienta-se que as interpretações

observadas para a película de cor branca tipo I podem ser transferidas para as demais películas e cores analisadas.

Figura 44 – Resultados das medidas de retrorrefletividade das películas de cor branca do tipo I ao longo de tempo com os modelos preditivos lineares



Fonte: Autor.

A partir da Figura 44, verifica-se que os modelos, tanto para as películas com limpeza quanto para as sem limpeza, parecem representar visualmente, de modo adequado, as leituras de retrorrefletividade obtidas em campo. Entretanto, como o modelo com limpeza não demonstrou uma perda significativa de retrorrefletividade ao longo do tempo, resultou, conseqüentemente, em  $R^2$  baixos se comparado ao seu par sem limpeza.

Além disso, os resultados de  $R^2$  sugerem que esse período de análise ainda seja pequeno para se observar, por meio de modelos matemáticos, perdas de desempenho retrorrefletivo significativos – considerando películas expostas ao tempo que tenham uma boa manutenção. Entretanto, essa foi a maneira encontrada mais coerente de comparar perdas de retrorrefletividade das películas estudadas ao longo do intervalo de avaliado.

#### **4.1.3 Avaliação do desempenho retrorrefletivo ao longo do tempo das películas expostas no segmento experimental**

Para avaliar a de perda até a última avaliação feita no segmento experimental (75 meses), o embasamento será feito de acordo com os modelos lineares apresentados no item anterior. Isso porque as medidas de retrorrefletividade ao longo do tempo demonstram, ocasionalmente, superioridade em relação a medidas feitas anteriormente.

Serão exibidos, em um mesmo gráfico, todos os modelos apresentados na Tabela 34, com intuito de avaliar a velocidade de perda da retrorrefletividade em relação a medida inicial ao longo do tempo das películas expostas no segmento experimental. A Figura 45 apresenta as perdas de retrorrefletividade em relação aos modelos lineares até a última leitura realizada (75 meses).

Quanto à Figura 45, nota-se que os modelos com limpeza têm uma velocidade de perda menor que os modelos sem limpeza, mostrando que, matematicamente, as películas que recebiam limpeza pouco perderam da capacidade retrorrefletiva.

Com base nos modelos lineares (Figura 45), verifica-se que, até as últimas medidas (75 meses após implantação), dos 12 modelos de películas que recebiam limpeza, a película vermelha tipo I foi única que mostrou alta perda de desempenho anual.

As películas do tipo I da cor vermelha sem limpeza obtiveram uma perda anual de cerca de 10,81% em relação ao valor inicial de 1. Já para a película com limpeza, esse valor foi menor, tendo uma perda de 4,89%, aproximadamente a metade do seu par sem limpeza. Para a película do tipo III o valor de perda foi de 1,46% para a que regularmente era limpa, ao passo que a sem limpeza mostrou uma perda anual maior, de 4,69%. Isso é visto de forma análoga para a película do tipo X, na qual o modelo apresentou uma pequena perda de desempenho, de 1,54%; já a película sem limpeza apresentou uma perda anual de 6,02% em relação à retrorrefletividade inicial.

Percebe-se que, para a película de tipo I, a perda de desempenho retrorrefletivo foi superior em relação aos tipos III e X, tanto na comparação às películas com limpeza quanto às sem limpeza.

A partir dos modelos lineares das películas de cor amarela, verificou-se que apenas uma película apresentou, matematicamente, um aumento dos valores retrorrefletivos entre todos os modelos: esse modelo refere-se à de tipo I, a qual exibiu

um ganho de 0,98% sobre a medida inicial. Todavia, esse valor é pouco significativo para relacionar a um ganho de retrorefletividade anual. Porém, as películas dos tipos III e X com limpeza apresentaram, respectivamente, uma perda anual sobre a medida inicial de 2,4% e 1,85%. Contudo, as películas sem limpeza mostraram perdas mais significativas se comparadas às películas com limpeza. As perdas anuais sobre a medida inicial para as películas dos tipos I, III e X sem limpeza foram de 6,01%, 6,39% e 8,39%.

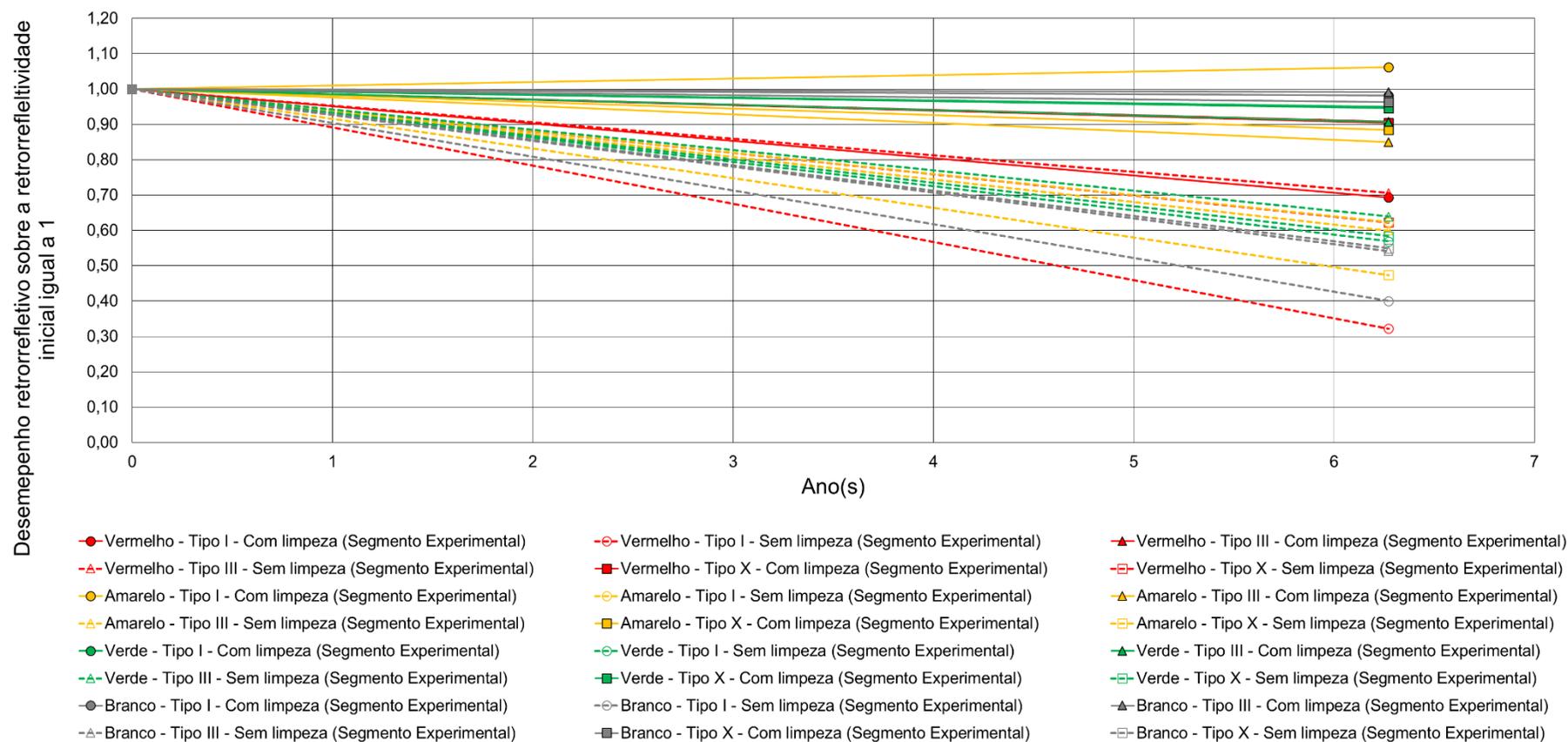
Com relação aos modelos lineares das cores verdes, as películas com limpeza também apresentaram pequena perda de retrorefletividade ao longo do tempo. As reduções anuais encontradas foram de 0,08%, 1,48% e 0,87%, para as películas com limpeza, e 6,87%, 5,75% e 6,63%, para as sem limpeza, respectivamente em relação aos tipos I, III e X.

Quanto aos modelos lineares das cores brancas, as perdas de retrorefletividade foram significativas nos modelos sem limpeza. Eles exibiram uma perda de 9,56%, 7,32% e 7,18% ao ano em relação à medida inicial para as películas dos tipos I, III e X, respectivamente. Nas películas com limpeza, as perdas foram de 0,28%, 0,13% e 0,60%.

Em suma, constatou-se que todas as películas sem limpeza tiveram uma perda maior no comparativo com os pares semelhantes que recebiam limpeza regular. A maior perda anual encontrada em relação à retrorefletividade inicial para os modelos com limpeza foi de 4,89% da película vermelha de tipo I, diferente do que foi usualmente encontrado nas outras películas do mesmo grupo (com limpeza). Já a segunda maior perda foi da película verde tipo I (2,4%), e as demais perdas foram menores que 1,85%, sendo observado um modelo com ganho de desempenho retrorefletivo. Já para as películas sem limpeza, a maior perda quanto à retrorefletividade inicial foi de 10,81%, e a menor de 4,69%, para, respectivamente, as películas vermelho dos tipos I e III.

No geral, os modelos sem limpeza apresentaram, em média, uma perda anual de 7,14% da capacidade retrorefletiva em relação à retrorefletividade inicial. Para os modelos com limpeza, essa média baixa para 1,28% de perda anual. Mediante análise das reduções com base nos modelos lineares, pode-se afirmar que, no que se refere à perda anual sobre a retrorefletividade inicial, as películas sem limpeza apresentaram uma perda de 7 vezes maior que as com limpeza.

Figura 45 – Modelos lineares de todas as películas do segmento experimental até a última medida realizada



Fonte: Autor.

#### **4.1.4 Análise de variância entre as porcentagens de perdas de retrorefletividade em relação à medida inicial**

Com a intenção de verificar os fatores mais significativos avaliados em campo (cor, tipo e limpeza) sobre a perda de desempenho da retrorefletividade ao longo do tempo, foi utilizada a análise de variância (ANOVA) com fator duplo com repetição nos dados das películas estudadas. Essa análise busca analisar se determinado parâmetro tem mais significância entre as variações dos resultados da variável dependente de interesse.

A variável dependente foi a perda, em porcentagem, de retrorefletividade em relação a seis meses entre uma medição e outra, já que é o intervalo no qual se tem maior quantidade de medidas para análise. Já as variáveis independentes foram a cor (vermelho, amarelo, verde e branco), o tipo de película (I, III e X) e a ocorrência ou não de limpeza na referida película.

Através dos testes ANOVA, a análise de variância fornece o valor F (FOBSERVADO), correspondente à razão entre a variância sistemática e a não-sistemática. Para determinar o quanto a variável independente é um fator significativo, compara-se o FOBSERVADO com o FCRÍTICO. Este (FCRÍTICO) é obtido através de tabelas estatísticas conforme o intervalo de confiança empregado e os graus de liberdade. Já aquele (FOBSERVADO), é calculado em relação à média quadrática dos resultados dentro do grupo e entre grupo. Aqui, “grupos” exemplificam o assunto da pesquisa, tais como o conjunto de medidas que representa, as cores, os tipos ou a limpeza. Considera-se uma associação estatisticamente significativa entre as variáveis independentes avaliadas quando o valor de FOBSERVADO for maior que o valor de FCRÍTICO (FIELD, 2009).

O valor-P, assim como explicado no item 4.1.2, avalia se há a ocorrência de uma associação estatisticamente significativa entre os parâmetros avaliados. Foi utilizado um intervalo de confiança de 95% para determinar a significância da variável, assim como visto para os modelos preditivos.

A Tabela 35 contém o resumo dos resultados da análise de variância (ANOVA) encontrados para as três variáveis independentes no intervalo de confiança de 5%.

Tabela 35 – Resultados da análise de variância (ANOVA)

Variável independente	Graus de Liberdade	Soma Quadrática	Média Quadrática	F <sub>OBSERVADO</sub>	F <sub>CRÍTICO</sub>	Valor-P
Limpeza	1	1,29E-01	1,29E-01	4,0724	3,875	0,044
Tipo de película	2	1,26E-02	6,30E-03	0,2011	3,028	0,820
Cor da película	3	4,85E-03	1,62E-03	0,0512	2,637	0,985

Fonte: Autor.

Quanto aos resultados encontrados na Análise de Variância (ANOVA) para a comparação de médias entre os três grupos, um valor de F elevado significa que há alguma diferença entre esses grupos que é capaz de ser expressa adequadamente por meio de um modelo de regressão. Nota-se que a limpeza foi o único fator que teve seu valor de F<sub>OBSERVADO</sub> maior que o F<sub>CRÍTICO</sub> nas ocasiões analisadas, podendo concluir que esse fator tem uma relação estatisticamente significativa com a perda de desempenho de retrorefletividade para o conjunto de dados do segmento experimental até o período de análise (75 meses).

As variáveis de cor e tipo de película tiveram a probabilidade de significância (valor-P) maiores do 0,05, significando que essas variáveis para esses dados não foram um fator significativo quanto ao ganho ou à perda de desempenho de retrorefletividade.

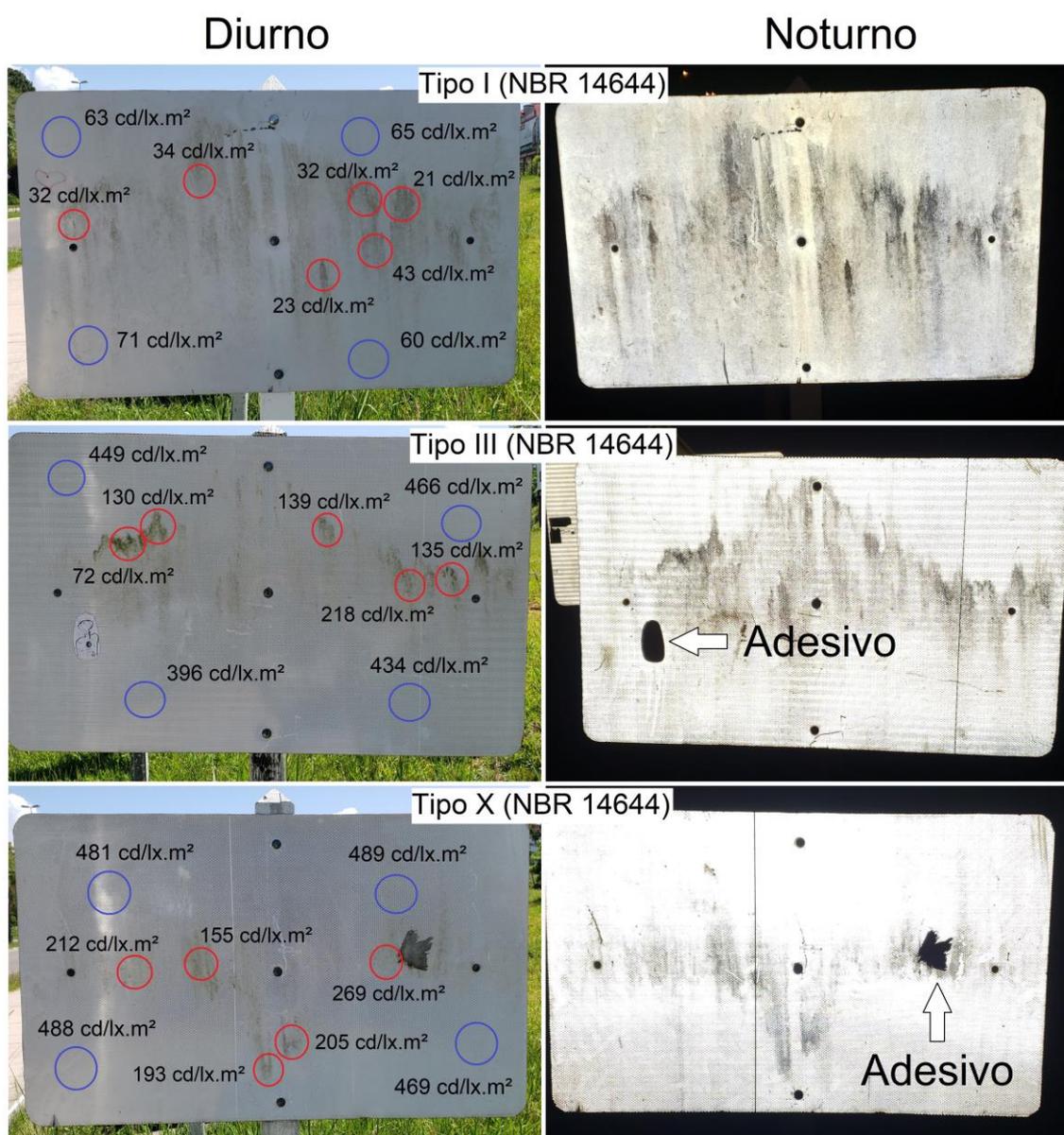
Já a variável limpeza, se comparar com a probabilidade de significância adotada (0,05), mostrou resultado diferente das demais. Entende-se que, das variáveis independentes analisadas, a limpeza da película em campo mostrou-se a única variável independente, dentre as comparadas, que mostrou-se significativo no que diz respeito ao ganho e à perda de desempenho, com a utilização do modelo ANOVA de análise para o conjunto de medidas até o presente momento do estudo.

A partir dessa análise, é possível verificar, com clareza, que as películas com e sem limpeza se separam em dois grupos distintos de perda de desempenho, sendo que as películas sem limpeza apresentam maior velocidade de redução de performance.

#### 4.1.5 Avaliação pontual das películas sujas do segmento experimental

Para uma avaliação mais pontual da influência da sujeira sobre as medidas retrorrefletivas, a Figura 46 apresenta as películas de cor branca para os três tipos, sem limpeza, encontradas no segmento. Serão mostradas somente as películas de cor branca, pois a sujeira é visualmente mais perceptível para verificação. Contudo, as análises feitas geram interpretações análogas para todas as outras cores. A coluna de fotos da esquerda foi realizada no turno diurno, e coluna da direita no turno noturno.

Figura 46 – Sujeira em películas brancas do segmento de Santa Maria/RS



Baseado na Figura 46, observa-se que grande parte da sujeira é acumulada no centro da película retrorrefletiva, localização em que normalmente é encontrada a informação da sinalização vertical. Percebe-se que existem pontos na região central que possuem os valores de retrorrefletividade bem abaixo dos encontrados nos cantos das placas. Verifica-se que esses pontos específicos de sujeira podem reduzir o valor médio de retrorrefletividade da película, fazendo com que algumas sejam condenadas à substituição. Comparando as medidas mais altas e as mais baixas realizadas nas películas, percebe-se uma diferença de aproximadamente duas a três vezes entre os valores.

Na Figura 46, observa-se, no turno noturno que as películas dos tipos III e X têm alguns pontos com adesivos colados a elas. Esses adesivos eliminam completamente a retrorrefletividade da película. Realizando a leitura nesses pontos, obtém-se a retrorrefletividade igual  $0 \text{ cd/lx.m}^2$ , demonstrando, de maneira singela, como o vandalismo e a depredação podem influenciar no desempenho retrorrefletivo da película.

Verifica-se, com os dados apresentados na Figura 46, que a não limpeza regular das películas retrorrefletivas acarreta em um aumento da dispersão dos resultados e, como efeito, obtém-se valores de retrorrefletividade média pouco representativa para a película que está sendo avaliada.

Observa-se, pela fotografia, que a análise visual, tanto de dia quanto à noite, é relevante para a avaliação funcional da película, visto que pouco se observa o efeito da sujeira sobre a retrorrefletividade no turno diurno. Além do mais, geralmente, o levantamento da retrorrefletividade é realizado durante o dia, em condições normais de monitoramento, assim, muitas vezes, podem ser avaliados índices muito baixos de retrorrefletividade, pois é intuitivo avaliar ao menos em um ponto central, segundo preconiza a norma NBR 15426 (2013). Até mesmo nesta pesquisa o ponto central sempre fora avaliado, contribuindo para a maior dispersão nos resultados, sobretudo das películas sem limpeza.

#### **4.1.6 Comparação dos modelos propostos neste estudo com os encontrados na literatura internacional**

Na literatura internacional, foram encontrados alguns modelos preditivos para películas de tipo I, III e XI padronizados pela norma D4956 da (ASTM, 2019) e apresentados no capítulo de revisão de literatura. Já as películas analisadas neste estudo são padronizadas segundo a norma NBR 14644 (ABNT, 2013) e, como já informado, são dos tipos I, III e X.

As duas normas, D4956 (ASTM, 2019) e NBR 14644 (ABNT, 2013), possuem alguns tipos de películas com requisitos mínimos iniciais de retrorrefletividade semelhante entre elas. Dos modelos internacionais encontrados, somente dois tipos de películas têm seus requisitos mínimos iniciais semelhantes às películas analisadas neste estudo. As películas dos tipos I e IX (ASTM, 2019) assemelham-se às películas dos tipos I e X (ABNT, 2013), nesta ordem. Entretanto, as películas de tipo III preconizadas pela norma D4956 (ASTM, 2019) são equiparadas, em valores iniciais de retrorrefletividade, com as de tipo II da (ABNT, 2013). Já a película de tipo III (ABNT, 2013) tem valores iniciais de retrorrefletividade igual à de tipo IV (ASTM, 2019).

Desse modo, para comparar as perdas de desempenho retrorrefletivo – independentemente da cor e do tipo de película – de todos os modelos encontrados na literatura internacional e com os gerados neste estudo, calcularam-se, em porcentagem, as perdas anuais dos modelos lineares internacionais, tendo sido confrontadas com as perdas neste estudo (já discutidas na seção 4.1.3 ).

Apresenta-se na Tabela 36 um resumo com todos os modelos preditivos internacionais usados para análise, já mostrados na revisão de literatura. Destaca-se que nem todos os modelos exibidos na Tabela 36 serão avaliados, posto que existem alguns condicionantes nas avaliações feitas, mas que serão melhor abordadas quando realizadas.

Para a análise em relação a perda desempenho retrorrefletivo, não foram utilizados os modelos preditivos internacionais de função logarítmica, polinômio de segundo grau e exponencial, pois será avaliada apenas a perda anual linear dos modelos (vide a Tabela 36). No total, foram avaliados 59 modelos preditivos, sendo 23 deste estudo e os outros 36 internacionais. Destaca-se que as expressões lineares que exibiram coeficiente linear positivo também não foram usadas na análise, como, por exemplo, a amarela tipo I deste estudo.

Tabela 36 – Resumo dos modelos internacionais utilizados nas análises entre os modelos deste estudo

(continua)

Cor	Autor(es)	Localização	Ano da publicação	Lavado ou não lavado	Modelo preditivo (cd/lx.m <sup>2</sup> )
Modelos preditivos para Tipo I (ASTM)					
Branco	Black et al.	EUA	1991	Lavado	$RA = 115,1 - 4,85 \times \text{Ano}(s)$
	Jenkins e Gennaoui	Austrália	1990	Lavado	$RA = 116 - 5,62 \times \text{Ano}(s)$
	Wolshon et al.	EUA	2002	Não lavado	$RA = 89,2 - 6,41 \times \text{Ano}(s)$
				Lavado	$RA = 101,7 - 6,10 \times \text{Ano}(s)$
Rasdorf et al.	EUA	2006	Não lavado	$RA = 68,8 - 1,41 \times \text{Ano}(s)$	
Amarelo	Black et al.	EUA	1991	Lavado	$RA = 88,2 - 3,39 \times \text{Ano}(s)$
	Jenkins e Gennaoui	Austrália	1990	Lavado	$RA = 96 - 5,07 \times \text{Ano}(s)$
	Wolshon et al.	EUA	2002	Não lavado	$RA = 61,7 - 2,73 \times \text{Ano}(s)$
				Lavado	$RA = 72 - 2,79 \times \text{Ano}(s)$
Rasdorf et al.	EUA	2006	Não lavado	$RA = 62,7 - 2,04 \times \text{Ano}(s)$	
Vermelho	Black et al.	EUA	1991	Lavado	$RA = 22,9 - 0,95 \times \text{Ano}(s)$
	Rasdorf et al.	EUA	2006	Não lavado	$RA = 13,1 - 0,63 \times \text{Ano}(s)$
Verde	Black et al.	EUA	1991	Lavado	$RA = 16,3 - 0,56 \times \text{Ano}(s)$
	Jenkins e Gennaoui	Austrália	1990	Lavado	$RA = 22 - 1,02 \times \text{Ano}(s)$
	Wolshon et al.	EUA	2002	Não lavado	$RA = 12,9 - 0,57 \times \text{Ano}(s)$
				Lavado	$RA = 15,9 - 0,62 \times \text{Ano}(s)$
Rasdorf et al.	EUA	2006	Não lavado	$RA = 13,25 - 0,45 \times \text{Ano}(s)$	
Modelos preditivos para Tipo III (ASTM)					
Branco	Black et al.	EUA	1991	Lavado	$RA = 311 - 4,61 \times \text{Ano}(s)$
	Jenkins e Gennaoui	Australia	1990	Lavado	$RA = 294 - 4,05 \times \text{Ano}(s)$
	Bischoff e Bullock	EUA	2002	Não lavado	$RA = 253,7 - 0,86 \times \text{Ano}(s)$
	Wolshon et al.	EUA	2002	Não lavado	$RA = 297,7 - 6,78 \times \text{Ano}(s)$
				Lavado	$RA = 317,9 - 3,66 \times \text{Ano}(s)$
	Rasdorf et al.	EUA	2006	Não lavado	$RA = 262,6 - 0,71 \times \text{Ano}(s)$
	Kipp e Fitch	EUA	2009	Não lavado	$RA = 436,8 \times \text{Ano}(s)^{-0,355}$
	Carlson et al.	EUA	2012	Não lavado	$RA = 265 - 6,2 \times \text{Ano}(s)$
Amarelo	Black et al.	EUA	1991	Lavado	$RA = 246,4 - 3,21 \times \text{Ano}(s)$
	Jenkins e Gennaoui	EUA	2002	Não lavado	$RA = 222,5 - 3,58 \times \text{Ano}(s)$
	Wolshon et al.	EUA	2002	Não lavado	$RA = 246,1 - 9,81 \times \text{Ano}(s)$
				Lavado	$RA = 279,7 - 10,06 \times \text{Ano}(s)$
Rasdorf et al.	EUA	2006	Não lavado	$RA = 216,4 + 1,27 \times \text{Ano}(s) - 0,251 \times \text{Ano}(s)^2$	
Amarelo	Kipp e Fitch	EUA	2009	Não lavado	$RA = 329,9 - 78,8 \times \ln(\text{Ano}(s))$
	Carlson et al.	EUA	2012	Não lavado	$RA = 251 - 6,8 \times \text{Ano}(s)$
Vermelho	Black et al.	EUA	1991	Lavado	$RA = 38,7 + 0,61 \times \text{Ano}(s)$
	Jenkins e Gennaoui	EUA	1990	Lavado	$RA = 16 + 3,1 \times \text{Ano}(s)$

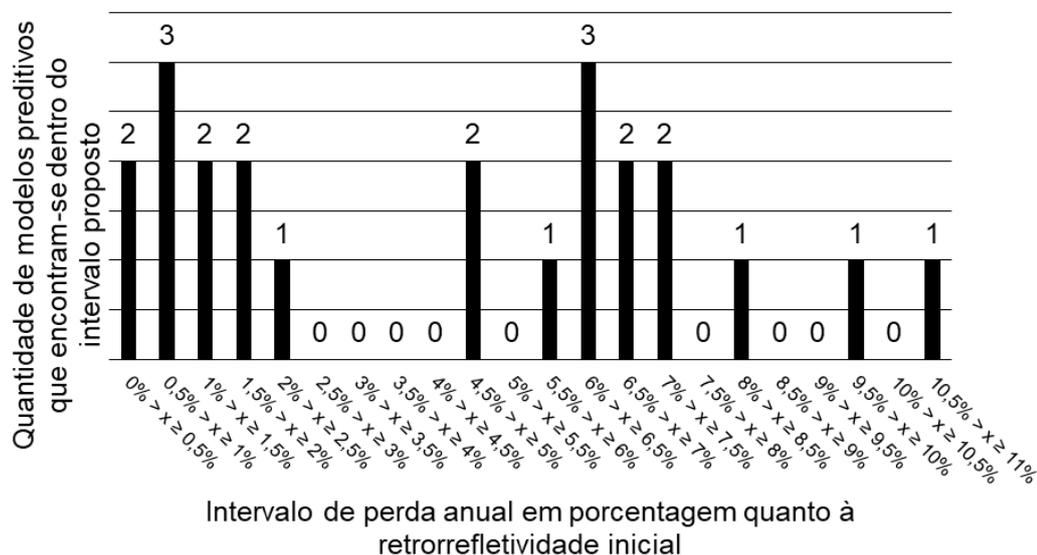
(conclusão)					
Cor	Autor(es)	Localização	Ano da publicação	Lavado ou não lavado	Modelo preditivo (cd/lx.m <sup>2</sup> )
Modelos preditivos para Tipo III (ASTM)					
Vermelho	Bischoff e Bullock	EUA	2002	Não lavado	$RA = 51,8 - 2,03 \times \text{Ano}(s)$
	Rasdorf et al.	EUA	2006	Não lavado	$RA = 59,6 - 2,66 \times \text{Ano}(s)$
	Kipp e Fitch	EUA	2009	Não lavado	$RA = 72,9 - 4,35 \times \text{Ano}(s)$
	Carlson et al.	EUA	2012	Não lavado	$RA = 52 - 1 \times \text{Ano}(s)$
Verde	Black et al.	EUA	1991	Lavado	$RA = 55,2 - 1,82 \times \text{Ano}(s)$
	Wolshon et al.	EUA	2002	Não lavado	$RA = 48 - 0,42 \times \text{Ano}(s)$
				Lavado	$RA = 61,8 - 0,75 \times \text{Ano}(s)$
	Rasdorf et al.	EUA	2006	Não lavado	$RA = 52 + 4,24 \times \text{Ano}(s) - 0,81 \text{Ano}(s)^2$
Kipp e Fitch	EUA	2009	Não lavado	$RA = 96,1 \times \text{Ano}(s)^{-0,204}$	
Modelos preditivos para Tipo XI (ASTM)					
Amarelo	Kipp e Fitch	EUA	2009	Não lavado	$RA = 310,74 \times \text{Exp}(-0,0192 \times \text{Ano}(s))$

Fonte: Autor.

Essa análise dos dados tem como intuito observar se os modelos gerados neste estudo e os encontrados na literatura internacional possuem perdas de retrorrefletividade, em relação a sua medida inicial, semelhante entre eles, e assim encontrar um valor que represente, com maior frequência, um resultado característico para a perda de retrorrefletividade inicial. Para isso foi estipulado intervalo de 0,5% para um espaço entre 0% a 11%, sendo esse espaçamento característico para todos os modelos analisados.

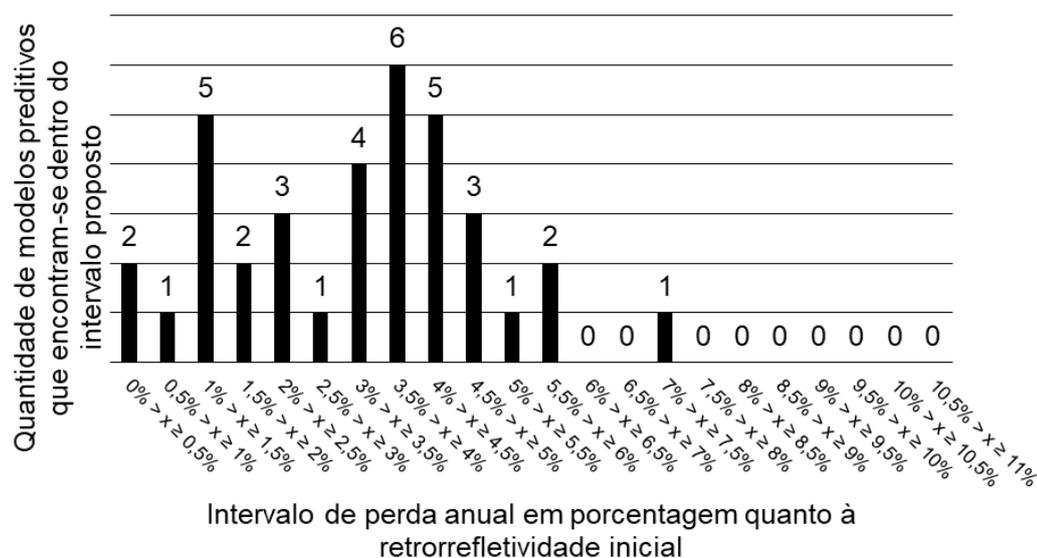
As Figura 47, Figura 48 e Figura 49 exibem a distribuição do número de modelos que estão dentro dos intervalos propostos de perda, em porcentagem, em relação a retrorrefletividade inicial anual, no qual as Figura 47 e Figura 48 separou-se a análise em apenas para os 23 modelos deste estudo (Figura 47) e os 36 internacionais (Figura 48). Já a Figura 49 apresenta a distribuição para todos os 59 modelos analisados.

Figura 47 – Distribuição do número de modelos preditivos que apresentam percentagem de perda de desempenho retrorrefletivo anual dentro de diferentes intervalos de perda propostos (somente para os modelos deste estudo)



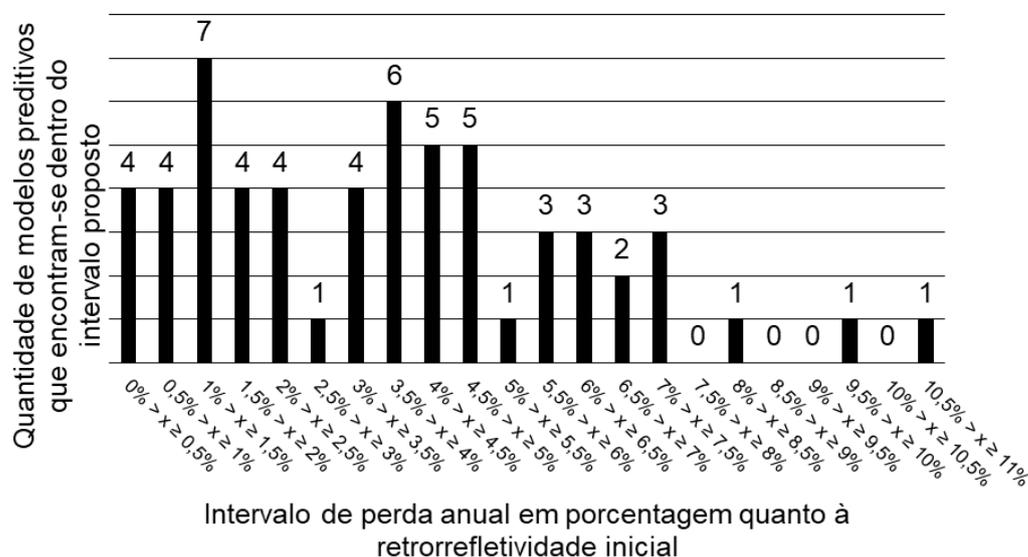
Fonte: Autor.

Figura 48 – Distribuição do número de modelos preditivos que apresentam percentagem de perda de desempenho retrorrefletivo anual dentro de diferentes intervalos de perda propostos (somente para os modelos internacionais)



Fonte: Autor.

Figura 49 – Distribuição do número de modelos preditivos que apresentam porcentagem de perda de desempenho retrorrefletivo anual dentro de diferentes intervalos de perda propostos (para todos os 59 modelos analisados)



Fonte: Autor.

Quanto às Figura 48 e Figura 47, observa-se que a organização dos resultados para as películas deste estudo tem uma frequência maior para dois intervalos de perda (Figura 47), verifica-se uma frequência maior dos dados nos intervalos de perda anual entre 0,5% e 1% e outra com o centro no intervalo de 6% a 6,5%. Essa distinção dos dados é explicada pelas películas com e sem limpeza regular. Porém a distribuição dos modelos encontrados na literatura internacional não mostrou-se haver uma perda retrorrefletiva característica para os modelos internacionais.

Quanto à Figura 49, observa-se que, comparando todas as perdas anuais, não houve um padrão entre os modelos confrontados para o intervalo proposto. Nota-se que a maioria dos modelos apresentou uma redução de desempenho entre 0% a 5%, e cerca de 75% dos modelos avaliados estão dentro desse intervalo. Com isso, nota-se que as películas retrorrefletivas não possuem uma diminuição da retrorrefletividade semelhante entre os modelos avaliados porém observa-se que dificilmente elas possuem decréscimo de retrorrefletividade maiores que 7,5%.

Assim como feito quanto as perdas, em porcentagem, de retrorrefletividade anuais sobre a medida inicial, avaliou-se, também, o ano em que houve maior frequência de falha dos modelos, deste estudo e os internacionais, em relação aos

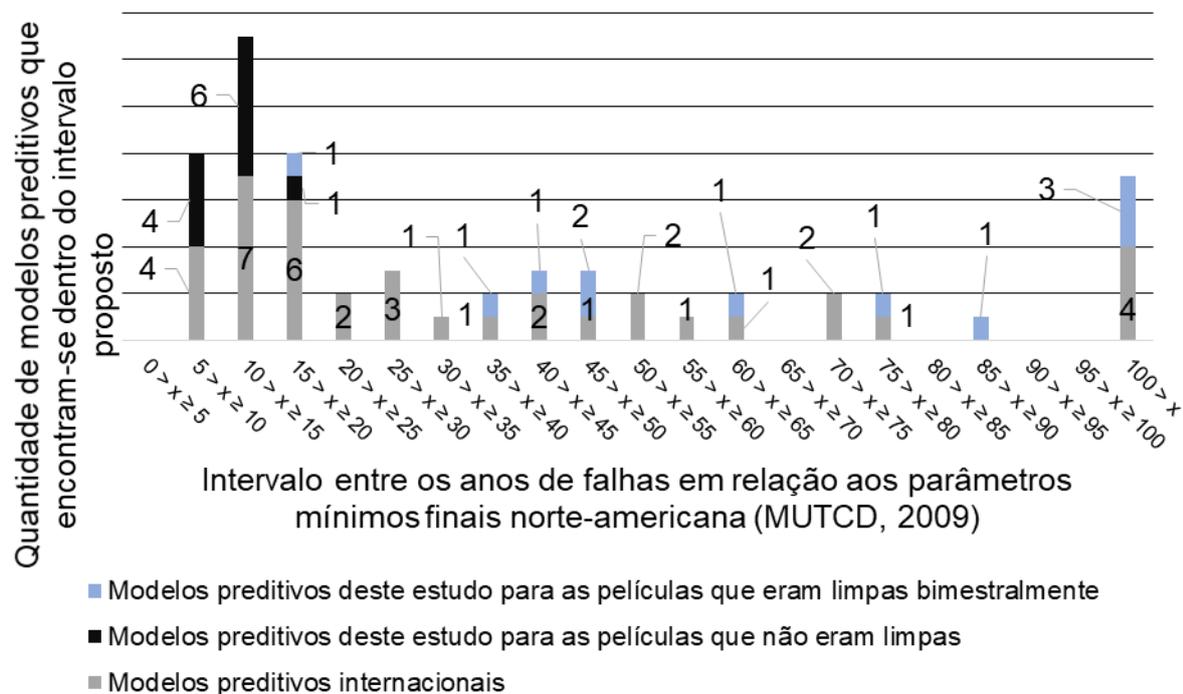
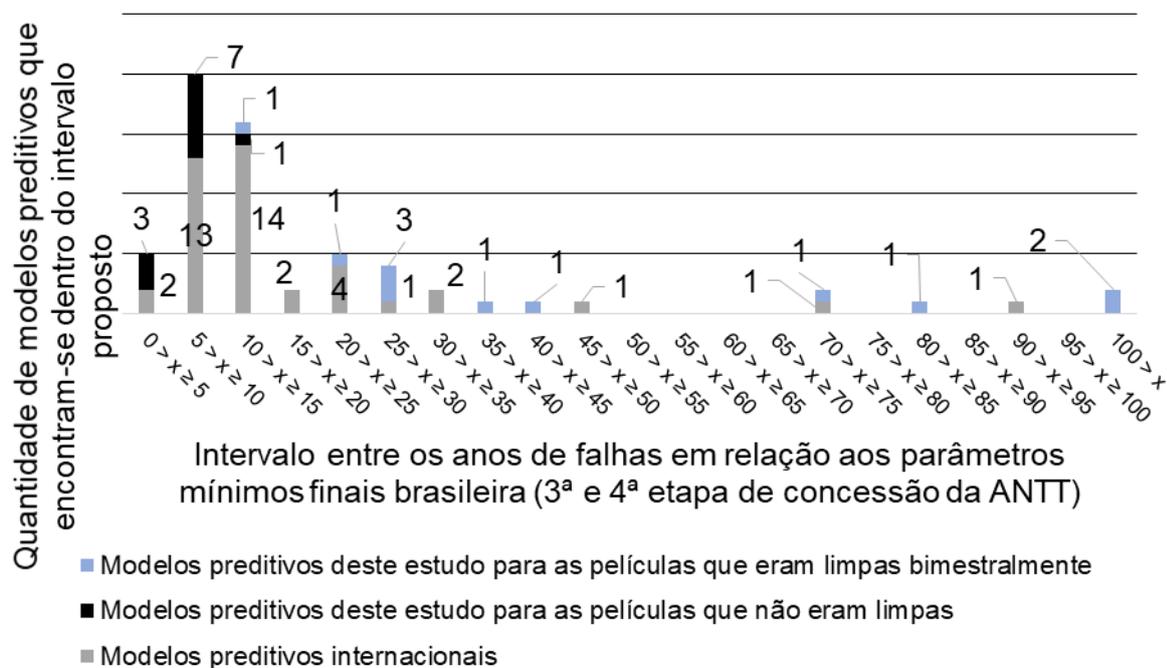
parâmetros mínimos finais requisitados pelos órgãos norte-americanos e brasileiros. Nessa análise, diferente da avaliação de perda de retrorrefletividade, foram usados os modelos com função polinomial de segundo grau, logarítmico e exponencial encontrados na literatura internacional. Foram avaliados 59 modelos para os parâmetros mínimos finais norte-americanos e 64 para os parâmetros mínimos brasileiros (3ª e 4ª etapa de concessões), pois, assim como a avaliação da perda anual em porcentagem, não foram utilizados modelos com coeficiente angular positivo. Além disso, não fez uso da cor amarela tipo I para os requisitos mínimos norte-americanos, já que a MUTCD (2009) indica que esse tipo de película não seja utilizada para esta cor.

Com a intenção de verificar um valor médio do tempo em que as películas deixam de ter medidas retrorrefletivas suficientes para estarem em serviço, foi calculado, com base nos modelos preditivos deste estudo e de literatura internacional, o ano de falha de cada modelo em relação a requisitos mínimos aceitos nos órgãos brasileiros e norte-americanos encontrados durante a pesquisa.

Os requisitos mínimos finais norte-americanos exibem diferentes critérios para a avaliação da retrorrefletividade, dependendo da cor e do tipo de película analisado. Logo, foi confrontado somente ao parâmetro mínimo final mais alto entre os requisitados, para que a Figura 50 fique mais sucinta na demonstração da análise.

Na comparação entre os parâmetros mínimos dos órgãos brasileiro e norte-americano (Figura 50), percebe-se, com base nos modelos, que as películas retrorrefletivas precisam ser substituídas com mais frequência para os requisitos mínimos finais brasileiros antes do que os norte-americanos. Nota-se que as películas apresentam a falha em maior frequência entre 5 a 10 anos de serviço para os parâmetros mínimos brasileiros – 21 dos 64 modelos analisados. Já para os norte-americanos, a falha se mostra com maior probabilidade entre 10 a 15 anos de serviço – 14 dos 59 modelos analisados. Nota-se, ainda, que os modelos deste estudo apresentaram retrorrefletividade abaixo dos parâmetros mínimos finais antes para os modelos sem limpeza do que comparado aos modelos com limpeza, uma vez que a maioria dos modelos sem limpeza exibiram falha antes dos 20 anos para os parâmetros brasileiros e 15 anos para os norte-americanos e os modelos com limpeza ficaram distribuídos acima dessas durações, exceto para a cor vermelha tipo I com limpeza deste estudo. Exibindo diferenças entre os anos de falha entre os modelos com e sem limpeza para as películas semelhantes acima de 15 anos.

Figura 50 – Distribuição do número de modelos preditivos que se encontram dentro de diferentes intervalos propostos, em anos, do momento em que película apresenta falha da função retrorrefletiva da película para os parâmetros mínimos finais da norma brasileira e norte-americana



Fonte: Autor.

Ré *et al.*(2011) comenta a importância desses modelos para uma previsão precisa de desempenho futuro das condições retrorrefletivas das películas; contudo, ressalta que esses modelos não fornecem valores exatos ou períodos de vida útil precisos. O estudo aponta inúmeros fatores que dificultam uma precisa previsão como, por exemplo, a geografia, o clima, o fornecedor do material e as práticas de manutenção. Os autores sugerem, ainda, em caráter exemplificativo que, em um modelo que indique uma vida útil de 12 anos para certa película, nem sempre essa longevidade se aplicará a todas a películas. Porém, a informação for usada do modo correto, pode-se ter uma estimativa básica e conservadora para vários métodos de gerenciamento de sinalização vertical. Os autores também sugerem a implantação de manutenção e inspeções visuais noturnas periódicas a fim de avaliar a necessidade de substituição da sinalização vertical.

Ademais, alguns modelos preditivos encontrados na literatura internacional apresentaram expressões características de medidas de retrorrefletividade com limpeza e sem limpeza. Quanto a isso, os autores não notaram nenhuma mudança em relação à perda de desempenho comparando os modelos preditivos com e sem limpeza. Por outro lado, para este estudo, mostrou-se uma grande alteração nos resultados entre as leituras com e sem limpeza, apresentando redução de retrorrefletividade muito menores para as películas limpas em comparação às películas que não eram limpas.

Porém, houve algumas diferenças entre os métodos de ensaios usados neste estudo com os verificados na literatura internacional. Uma das diferenças observada neste estudo em contraste aos achados de pesquisas internacionais foi que todos os autores que avaliaram a medida de retrorrefletividade em relação a uma mesma película executaram a leitura antes e depois da limpeza em uma mesma película retrorrefletiva, o que era diferentes deste estudo, que analisou uma película que era limpa e outra que não recebia a limpeza. Outro fator distinto foi que a avaliação das amostras dos estudos internacionais foi executada em placas de sinalização vertical em real operação. Logo, não houve a informação do modo que era feita a limpeza das películas nem a frequência – externa ao estudo –, já que isso é responsabilidade de outros órgãos de fiscalização (WOLSHON *et al.*, 2002; BISCHOFF E BULLOCK, 2002).

Com o intuito de verificar se existe alguma diferença em medidas antes e depois da limpeza em uma mesma película – como verificado nos estudos de Wolshon *et al.*

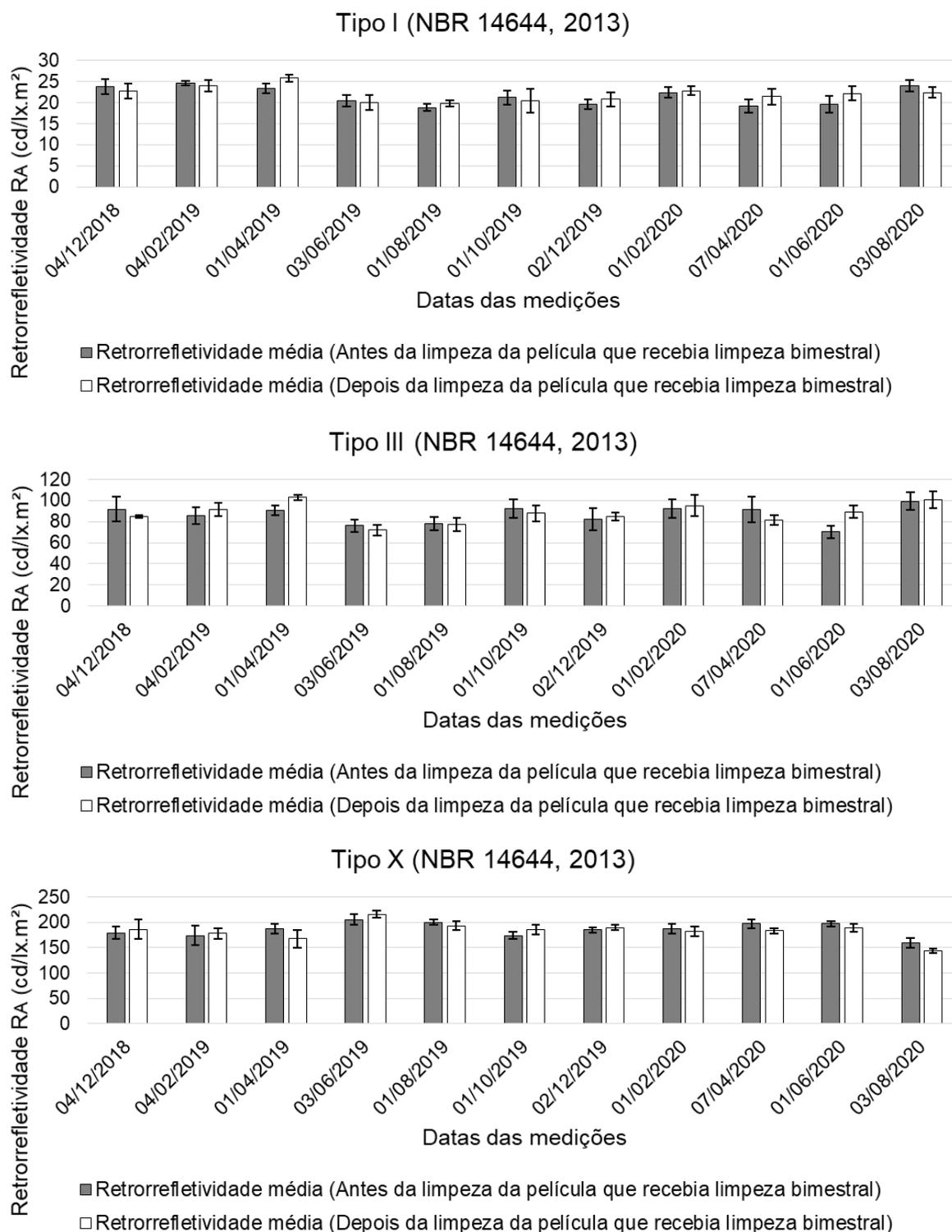
(2002) e Bischoff e Bullock (2002), em que não foi observado nenhuma influência significativa –, executou-se, neste estudo, algumas análises entre medidas antes e depois da limpeza para uma mesma película, conforme está apresentado entre as Figura 51 e Figura 54.

Percebe-se que não houve significativa mudança nas medidas antes e depois da limpeza das películas que eram regularmente limpas (limpeza bimestral). Foram realizados 11 ensaios antes e depois da limpeza com as 12 películas do segmento experimental, totalizando 132 comparações entre essas medidas. Dessas 132 comparações, 64,39% apresentaram que as medidas depois da limpeza tiveram superioridade em comparação às medidas antes da limpeza, e 35,61% mostrou superioridade das medidas antes da limpeza.

Os cálculos demonstram que a retrorrefletividade média das películas antes da limpeza, usualmente, são menores que a média de valores depois da limpeza; contudo, nota-se pela Figura 51 à Figura 54 que a média de retrorrefletividade das duas medidas comparadas se encontra, na maioria das vezes, dentro do desvio padrão, indicando que esse diferença de valores não é tão significativa e apenas está no erro padrão do ensaio que não foi possível mensurar.

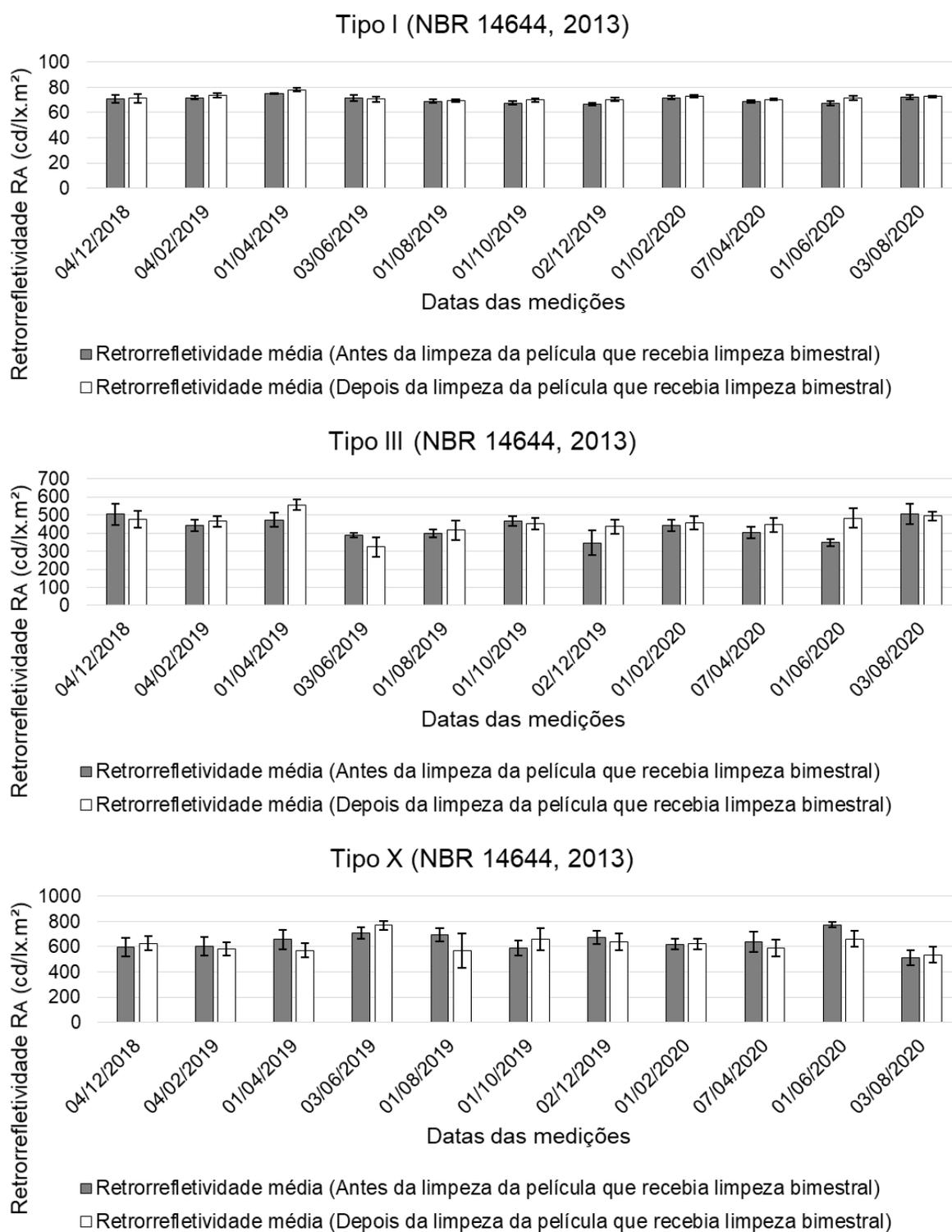
Deixa-se claro que esta análise é somente para películas que recebiam a limpeza regularmente com periodicidade bimestral. Pois, observando os resultados mostrados anteriormente, nota-se, que após um determinado tempo, geralmente de 1 a 2 anos, é que as películas que não eram limpas tinham uma perda significativa de retrorrefletividade maior que as películas que recebiam a limpeza.

Figura 51 – Medidas realizadas antes e depois da limpeza para películas de cor vermelha que recebiam regularmente a limpeza bimestral no segmento experimental



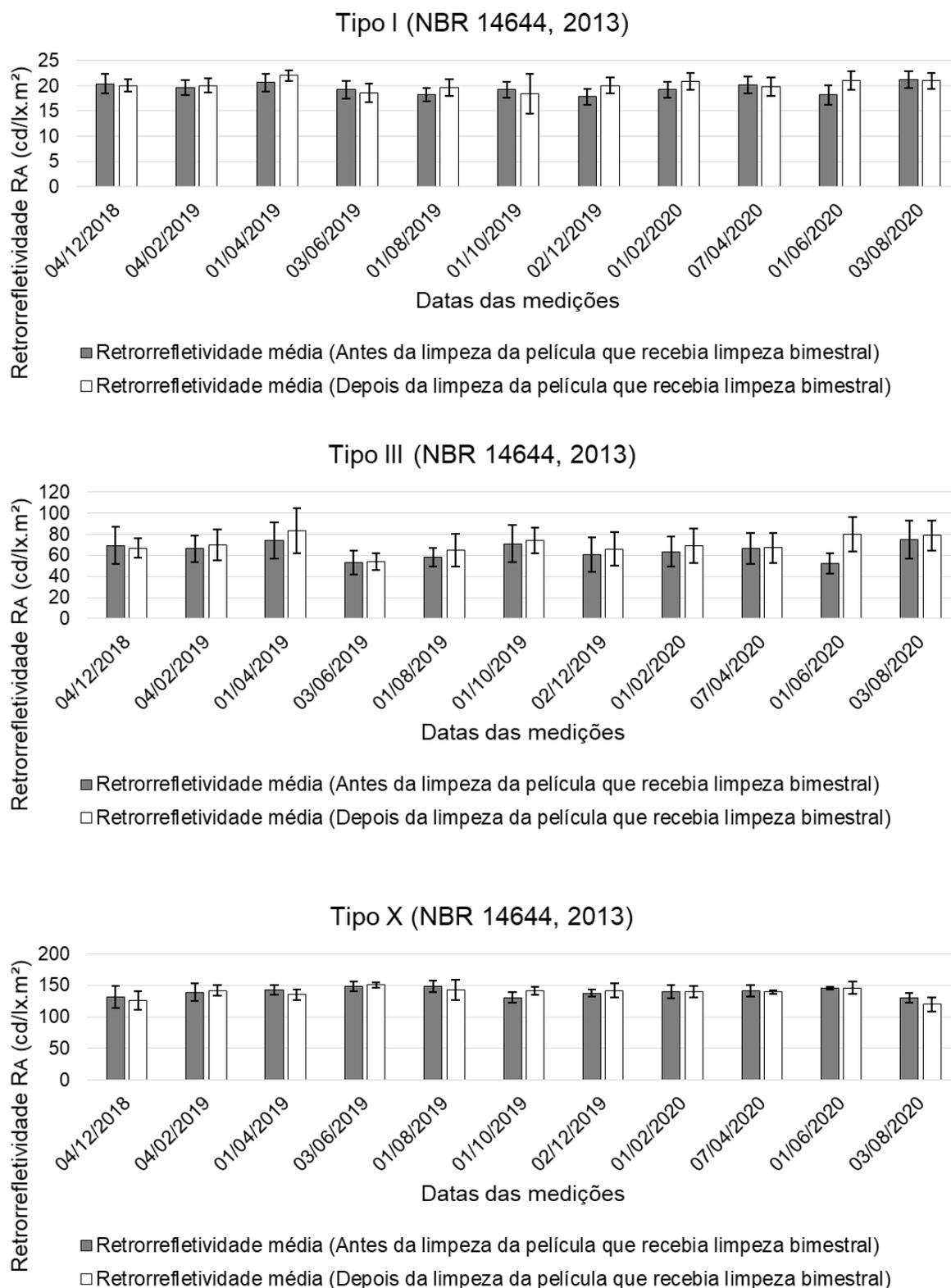
Fonte: Autor.

Figura 52 – Medidas realizadas antes e depois da limpeza para películas de cor amarela que recebiam regularmente a limpeza bimestral no segmento experimental



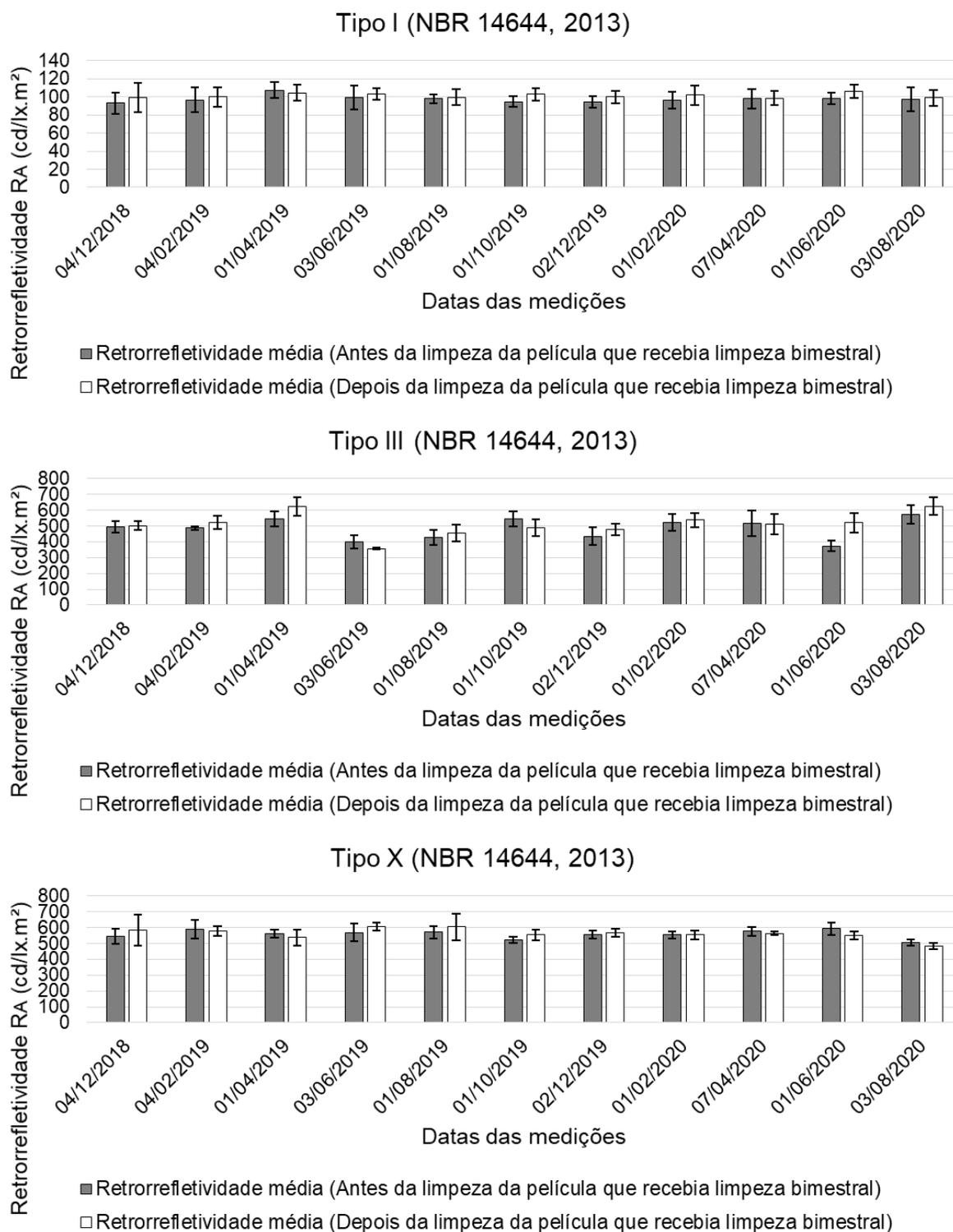
Fonte: Autor.

Figura 53 – Medidas realizadas antes e depois da limpeza para películas de cor verde que recebiam regularmente a limpeza bimestral no segmento experimental



Fonte: Autor.

Figura 54 – Medidas realizadas antes e depois da limpeza para películas de cor branca que recebiam regularmente a limpeza bimestral no segmento experimental



Fonte: Autor.

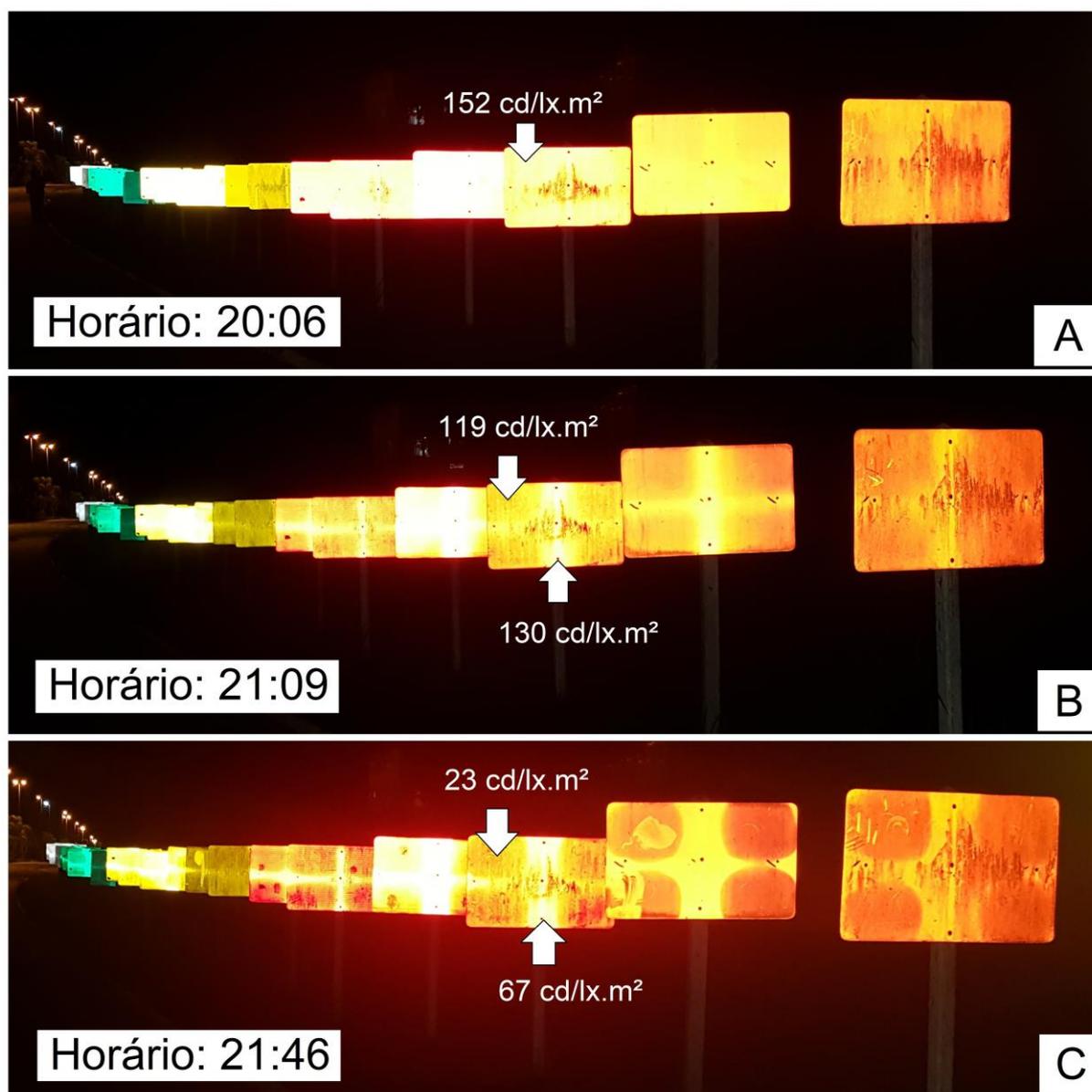
#### 4.1.7 Efeito do orvalho sobre as películas retrorrefletivas

Ao longo do estudo, em uma das campanhas de medidas de retrorrefletividade, foi verificado o fenômeno de orvalho nas películas retrorrefletivas no segmento experimental de Santa Maria/RS. Assim como observado por Hildebrand (2003), foi percebida uma redução de retrorrefletividade pela ação do efeito de orvalho na película.

Os níveis médios das medidas de retrorrefletividade medidos foram determinados para cada película, conforme pode ser visto na Figura 55 e na Tabela 37. A Figura 55 mostra três fotos que tiveram um intervalo de 1h e 03min entre primeira e a segunda, e de 37min minutos entre a segunda para terceira. Esse curto tempo de ocorrência do fenômeno do orvalho mostra que ele inicia e chega aos resultados encontrados rapidamente, o que acontece em um intervalo de menos de 2h. Esses horários estão apresentados no canto inferior de cada fotografia. Contudo, esse fenômeno não cessa depois desse intervalo de tempo, e verificou-se que ele durou até às 9 h da manhã do dia seguinte.

Na Tabela 37, os resultados de retrorrefletividade média de 5 leituras foram agrupados por cor e por tipo de película de sinalização, com ou sem limpeza, tendo sido comparados aos padrões mínimos brasileiros. Além disso, mostra-se a diferença, em porcentagem, das medidas entre as fotografias A e B e entre as fotografias A e C.

Figura 55 – Influência do orvalho no segmento monitorado de Santa Maria/RS



Fonte: Autor.

Tabela 37 – Retrorrefletividade medida em relação ao efeito do orvalho

Cor	Tipo de película (NBR 14644)	Limpeza	Retrorrefletividade média (cd/lx.m <sup>2</sup> )			Perda (A-B)	Perda (A-C)	85% valor inicial (NBR 14644)
			Condição em campo em relação à Figura 55					
			A	B	C			
Vermelho	I	Não	12	9	3	-24,19%	-74,19%	11,9
Vermelho	I	Sim	22	14	7	-35,71%	-70,54%	11,9
Vermelho	X	Não	157	102	26	-34,99%	-83,14%	90,1
Vermelho	X	Sim	205	140	32	-31,45%	-84,28%	90,1
Vermelho	III	Não	57	33	14	-41,96%	-75,17%	55,25
Vermelho	III	Sim	79	46	22	-42,13%	-71,83%	55,25
Amarelo	I	Não	46	23	13	-50,43%	-71,12%	42,5
Amarelo	I	Sim	71	37	20	-48,02%	-71,47%	42,5
Amarelo	X	Não	551	255	146	-53,72%	-73,47%	335,75
Amarelo	X	Sim	703	386	220	-45,14%	-68,74%	335,75
Amarelo	III	Não	330	183	114	-44,67%	-65,52%	229,5
Amarelo	III	Sim	376	209	129	-44,44%	-65,78%	229,5
Verde	I	Não	11	6	3	-42,59%	-75,93%	7,65
Verde	I	Sim	18	11	6	-38,46%	-64,84%	7,65
Verde	X	Não	101	69	38	-31,01%	-62,03%	44,2
Verde	X	Sim	151	73	39	-51,59%	-73,87%	44,2
Verde	III	Não	48	24	12	-50,41%	-74,38%	42,5
Verde	III	Sim	57	32	18	-43,31%	-68,31%	42,5
Branco	I	Não	54	28	17	-48,89%	-68,89%	59,5
Branco	I	Sim	102	48	29	-53,32%	-71,88%	59,5
Branco	X	Não	456	219	136	-52,00%	-70,25%	442
Branco	X	Sim	613	322	191	-47,44%	-68,85%	442
Branco	III	Não	264	153	91	-42,17%	-65,63%	306
Branco	III	Sim	423	227	147	-46,24%	-65,30%	306
Média						-43,51%	-71,06%	

Fonte: Autor.

As reduções de retrorefletividade devido ao orvalho (Tabela 37) variaram, da primeira para a segunda leitura, entre 24% e 53%, com média de 43%. Já as reduções resultantes da primeira para a terceira leitura oscilaram entre 62% e 88%, com média de 71% para todas as cores combinadas. Assim, como visto nos resultados de Hildebrand (2003), foram observados valores semelhantes de perda de desempenho. Contudo, assim como visto pelo autor, não foi verificada nenhuma correlação entre a redução de retrorefletividade e o tipo de película.

Nota-se, também, que o fenômeno de orvalho nas placas de sinalização vertical do segmento de Santa Maria/RS ocorreu com maior força aos cantos da placa. Como pode ser observado na Figura 55, existe, na parte central da película, um suporte de madeira em forma de cruz que se encontra atrás da placa de aço. Logo, esse efeito é explicado pela diferença calor específico entre os dois materiais, visto que a madeira, por ter maior calor específico, demora mais para diminuir sua temperatura se comparada ao aço, o que favorece a não condensação de umidade.

Para ilustrar o que fora mencionado, a Figura 55 mostra, como exemplo, a película de cor vermelha tipo X que não recebia limpeza regular (vide setas). Percebe-se que, em menos de duas horas, a medida de retrorrefletividade dos cantos, onde o efeito do orvalho é maior, reduz por volta de 85% do valor de 152 cd/lx.m<sup>2</sup> para 23 cd/lx.m<sup>2</sup>. No entanto, para a leitura realizada na região central da placa (67 cd/lx.m<sup>2</sup>), essa redução foi de 55%, inferior ao observado no canto da placa.

Comparando os valores observados a partir de levantamentos realizados nas placas umedecidas pelo orvalho com os requisitos mínimos estipulados por órgãos nacionais, a Figura 55-A apresenta apenas duas películas abaixo dos valores mínimos, o que seria a condição normal em que as películas (sem orvalho) são encontradas, sendo elas a branca dos tipos I e III e sem limpeza. Para a Figura 55-B, esse número aumenta para 17 das 24 películas do segmento com retrorrefletividade abaixo dos valores mínimos. Já na Figura 55-C, todas películas encontram-se abaixo do valor mínimo de retrorrefletividade. Esses resultados apontam que películas empregadas em sinalização vertical sujeitas ao efeito do orvalho reduzem sensivelmente seu desempenho, dificultando o retorno a luz incidente ao motorista, principalmente no período da noite, momento de maior necessidade da retrorrefletividade da sinalização ao motorista.

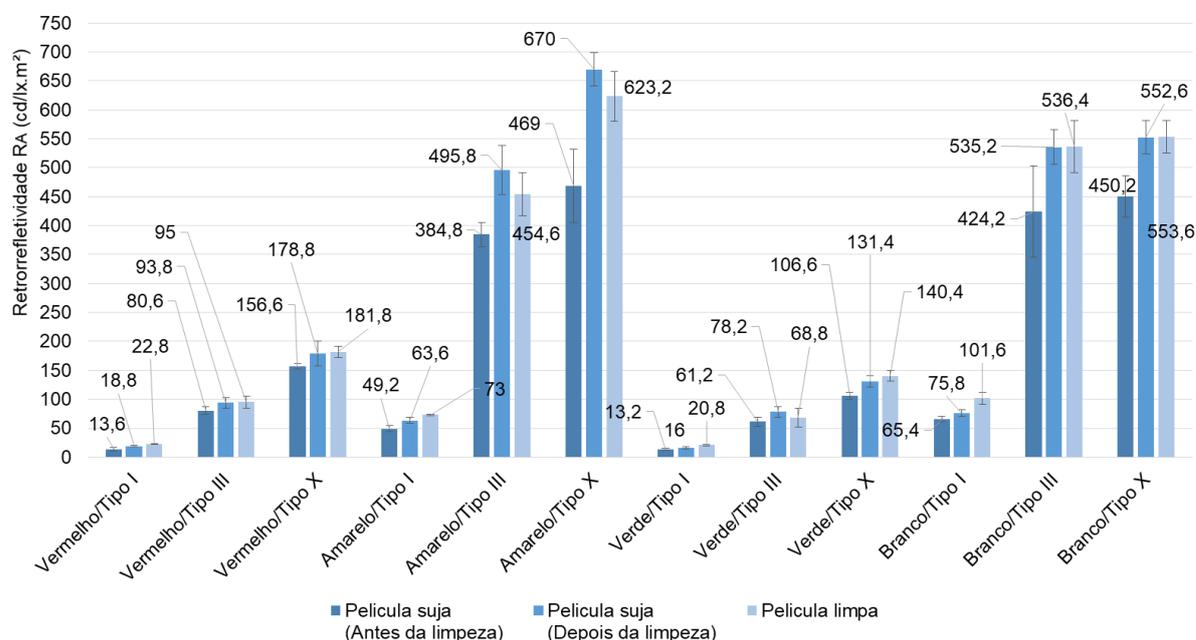
Recomenda-se, assim, verificar as regiões ou os meses do ano em que o efeito do orvalho prevaleça, com intuito de haver ciência sobre redução do efeito de retrorrefletividade da sinalização vertical, possibilitando o desenvolvimento de práticas que mitiguem esse efeito. Embora seja muito difícil os órgãos verificarem os efeitos localizados de orvalho, é indicado, então, desenvolver materiais mais avançados, como dissipadores de calor ou outras tecnologias para diminuir esse evento.

#### 4.1.8 Efeito da limpeza sobre a retrorrefletividade das películas que não recebiam limpeza regular

Após 75 meses analisando as películas que não recebiam limpeza e comparando-as com as que recebiam, decidiu-se realizar, no dia 1º de fevereiro de 2020, a limpeza de todas as películas que não recebiam limpeza no segmento de Santa Maria. Essa medida foi tomada com o intuito de verificar se a limpeza regular das películas causava algum tipo de dano a elas e se esse dano era ou não motivado pelo atrito exercido pela esponja na face da película. Também buscou-se verificar se a retrorrefletividade da película suja voltaria a apresentar resultados semelhantes aos observados nas películas usualmente limpas.

A Figura 56 expõe os resultados encontrados antes e depois da limpeza das películas que estavam sujas, assim como apresenta as leituras das películas frequentemente limpas, com intuito de confrontá-las.

Figura 56 – Medidas de retrorrefletividade antes e depois da limpeza das películas que usualmente não recebiam limpeza e das películas que recebiam a limpeza



Fonte: Autor.

Com base na Figura 56, percebe-se um aumento da retrorrefletividade após a efetuação da limpeza em todas as películas que não recebiam limpeza frequente. O aumento observado teve uma média de aproximadamente 25,6% em relação ao valor

antes da limpeza. A maior melhora da retrorrefletividade foi visto na película de cor amarela tipo X, e a menor para a cor vermelha tipo X, com acréscimo em torno de 42,86% e 14,18%, respectivamente.

Comparando com os valores das películas que recebiam limpeza frequente, apenas as películas de cor amarela tipo III e tipo X e verde tipo III apresentaram valores maiores de retrorrefletividade após a limpeza das películas sujas, correspondendo somente a 3 das 12 placas de sinalização vertical. Contudo, nota-se que as medidas ficaram muito próximas entre elas, exibindo resultados aproximadamente 9,85% menores em relação às leituras das películas com limpeza usual.

Após a limpeza geral, uma análise foi realizada comparando a diferença absoluta entre a primeira e a última medida (6,27 anos) de retrorrefletividade média realizada no segmento experimental e o desvio padrão encontrado no último levantamento. Com intuito de verificar se a diferença entre a primeira e última medida estão dentro do erro padrão das últimas medidas, averiguou-se que as medidas retrorrefletivas ao longo do tempo de avaliação não exibiram perda de retrorrefletividade, estando dentro da variação padrão de leituras retrorrefletivas.

Apresentam-se, na Tabela 38, os resultados da retrorrefletividade média obtida no dia 26 de novembro de 2013 e no dia 1º de fevereiro de 2020 (apresentando as medidas depois da limpeza), junto com a diferença entre os valores e seus desvios padrões.

Tabela 38 – Resumo da análise dos resultados de retrorrefletividade média obtida no dia 26 de novembro de 2013 (início das medições) e no dia 1º de fevereiro de 2020 (últimas medidas realizadas neste estudo)

(continua)

Cor	Tipo de película (NBR 14644)	Limpeza	Data		Diferença absoluta (Depois da limpeza geral) (cd/lx.m <sup>2</sup> )	Desvio padrão médio dos Levantamentos (cd/lx.m <sup>2</sup> )
			26/11/2013	01/02/2020		
			Ano(s)			
			0,00	6,27		
			RA média (cd/lx.m <sup>2</sup> )	RA média (Depois da limpeza geral) (cd/lx.m <sup>2</sup> )		
Vermelho	I	Não	33,60	18,80	<b>14,80</b>	<b>2,33</b>
		Sim	32,20	22,80	<b>9,4</b>	<b>2,08</b>
	X	Não	175,00	178,80	-3,8	16,56

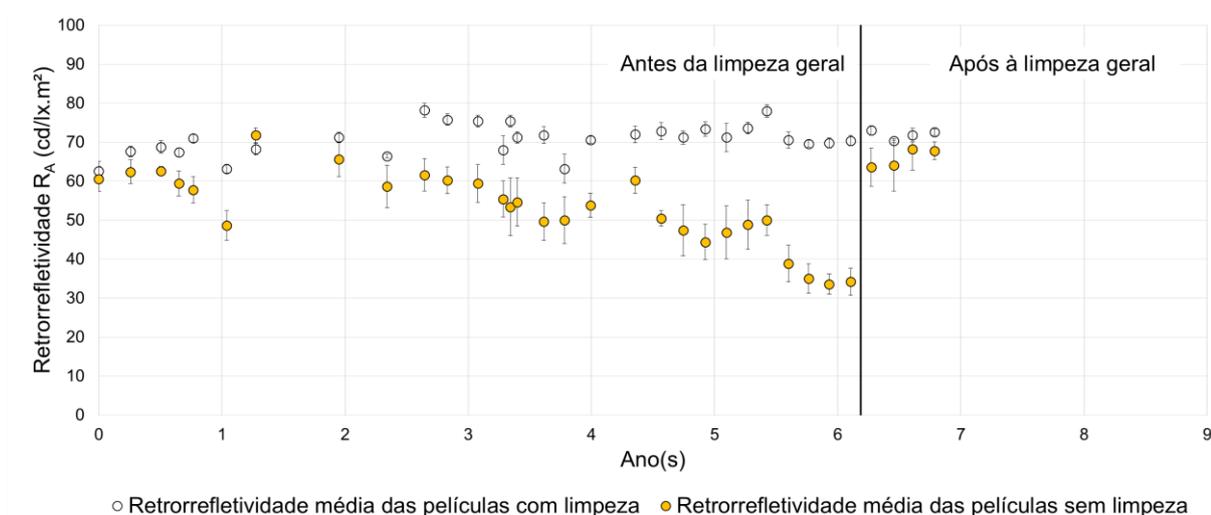
(conclusão)						
		Data	26/11/2013	01/02/2020		
		Ano(s)	0,00	6,27		
Cor	Tipo de película (NBR 14644)	Limpeza	RA média (cd/lx.m <sup>2</sup> )	RA média (Depois da limpeza geral) (cd/lx.m <sup>2</sup> )	Diferença absoluta (Depois da limpeza geral) (cd/lx.m <sup>2</sup> )	Desvio padrão médio dos Levantamentos (cd/lx.m <sup>2</sup> )
Vermelho	X	Sim	180,20	181,80	-1,6	12,34
		Não	85,40	93,80	<b>-8,4</b>	<b>7,48</b>
	III	Sim	90,00	95,00	-5	7,41
Amarelo	I	Não	60,60	63,60	-3	4,21
		Sim	62,60	73,00	<b>-10,4</b>	<b>1,74</b>
	X	Não	634,20	670,00	-35,8	58,96
		Sim	633,20	623,20	10	57,79
	III	Não	474,00	495,80	-21,8	44,70
		Sim	471,80	454,60	17,2	47,87
Verde	I	Não	22,00	16,00	<b>6</b>	<b>1,85</b>
		Sim	22,40	20,80	1,6	1,61
	X	Não	132,00	131,40	0,6	9,13
		Sim	141,20	140,40	0,8	10,25
	III	Não	77,60	78,20	-0,6	8,35
		Sim	71,60	68,80	2,8	14,34
Branco	I	Não	93,20	75,80	<b>17,4</b>	<b>5,77</b>
		Sim	92,40	101,60	-9,2	9,33
	X	Não	583,00	552,60	30,4	35,03
		Sim	560,80	553,60	7,2	40,09
	III	Não	487,40	535,20	<b>-47,8</b>	<b>38,71</b>
		Sim	474,00	536,40	<b>-62,4</b>	<b>41,24</b>

Fonte: Autor.

Os resultados encontrados na Tabela 38, mostram que apenas 8, destacadas em negrito na Tabela 38, das 24 películas tiveram diferença entre a primeira e última medida (depois da limpeza geral) menor do que o desvio padrão médio. Esse critério utilizado demonstra que, após 75 meses de avaliação, a maioria das películas ainda não tiveram perda de desempenho significativo de retrorefletividade – nem mesmo as películas que usualmente não eram limpas, pois, após a limpeza, as medidas retornaram a apresentar medidas semelhantes às iniciais – mostrando assim que esse tempo de análise pode ser considerado ainda insuficiente para análise de perda de retrorefletividade ao longo do tempo pois os valores de retrorefletividade estão, ainda, dentro do desvio padrão médio das campanhas de medições.

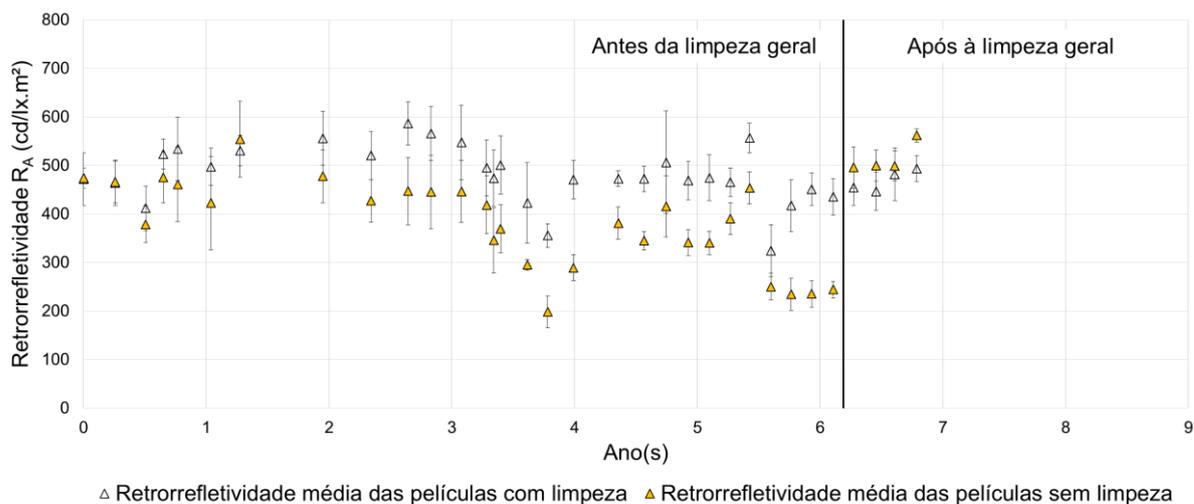
Além disso, houve mais 3 campanhas de leituras após a limpeza geral no qual se manteve realizando a limpeza geral. Pode-se observar, a partir disso, que os resultados de retrorrefletividade das películas que não recebiam limpeza regular bimestral mantiveram-se próximas das medidas das películas que usualmente recebiam limpeza após a limpeza geral das 24 películas. As Figura 57, Figura 58 e Figura 59 serão apresentados os resultados de retrorrefletividade média das películas de cor amarela, acrescentando as quatro medidas médias após a limpeza geral de todas as 24 películas. Sendo elas: a limpeza geral no dia 01 de fevereiro de 2020, e as medidas realizadas nos dias 07 de abril, 01 de junho e 04 de agosto de 2020. Destaca-se que será apresentado somente a cor amarela pois as outras cores analisadas (vermelho, branco e verde) também tiveram os mesmos comportamentos.

Figura 57 – Medidas de retrorrefletividade média em função do tempo de exposição da película de cor amarela tipo I (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS



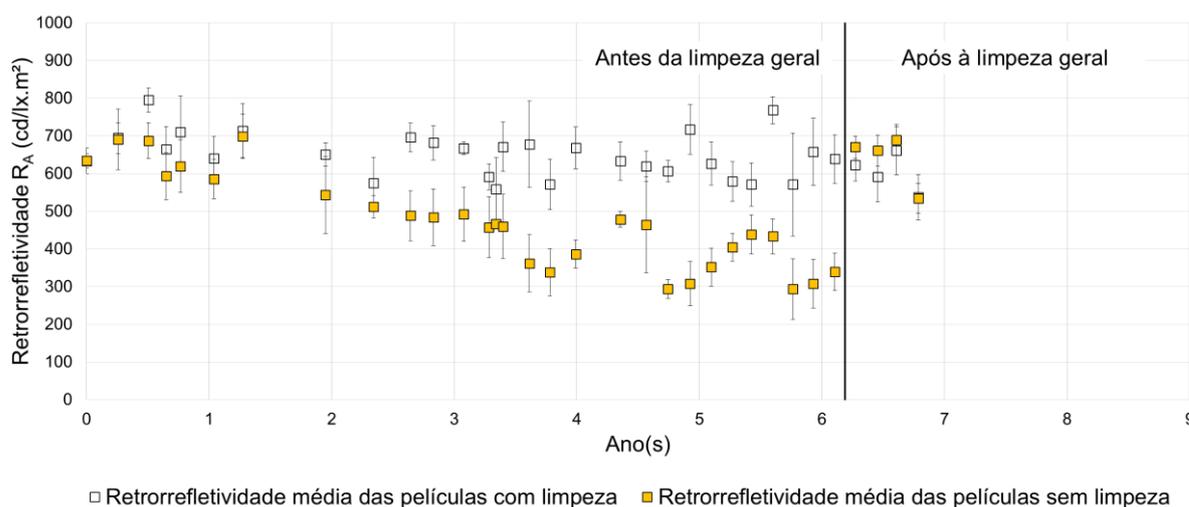
Fonte: Autor.

Figura 58 – Medidas de retrorrefletividade média em função do tempo de exposição da película de cor amarela tipo III (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS



Fonte: Autor.

Figura 59 – Medidas de retrorrefletividade média em função do tempo de exposição da película de cor amarela tipo X (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS



Fonte: Autor.

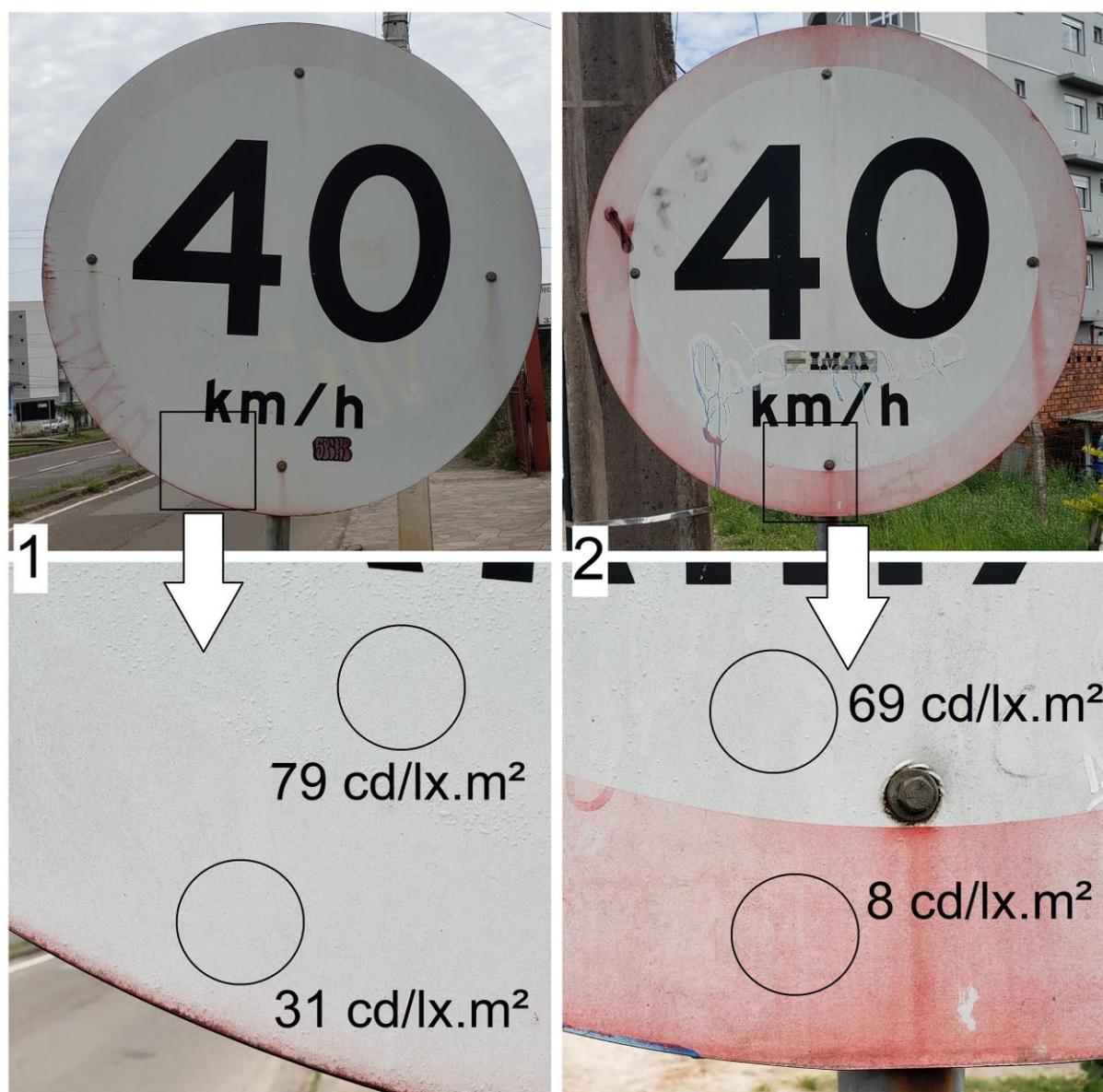
Verifica-se que para as películas de tipo I, e observado em todas as cores, as medidas médias das películas sem limpeza ficaram abaixo do valores das películas com limpeza nas 4 campanhas de leituras após a limpeza geral, entretanto as medidas mostraram-se próximas entre elas, além das medidas de retrorrefletividade médias,

usualmente, exibirem valores dentro dos desvios padrões do outro ponto. Esse fato é visto de semelhante forma para as medidas de retrorrefletividade média para o tipo III e X, contudo as películas sem limpeza apresentaram valores maiores que as películas com limpeza, antagônica da tipo I, todavia com seus valores muito próximos.

Um outro motivo que acredita-se que apenas 8 das 24 películas apresentaram a diferença absoluta entre a primeira e a última medida menor que o desvio padrão médio obtido entre todas as campanhas de medidas, é que algumas das películas tenham desbotado a sua cor ao longo do tempo e com isso alterado o resultado de retrorrefletividade motivado por essa ação. Autores como Bishoff e Bullock (2002) observaram esse mesmo efeito para a cor vermelha em seu estudo, onde observaram o desbotamento da cor vermelha em sinalizações verticais em serviço. A partir disso as películas vermelhas começaram apresentar um aumento de retrorrefletividade ao longo tempo motivado por sua cor tornar-se mais clara, mais próximo da tonalidade branca. Isso também foi observado em películas expostas na cidade de Santa Maria/RS, externa das películas analisadas neste estudo, mas que servem como exemplo ilustrativo.

Na Figura 60 exibe duas placas de sinalizações verticais localizadas na cidade de Santa Maria/RS com películas retrorrefletivas, de mesmo material (possivelmente tipo I com microesferas de vidro), que mostraram desbotamento da cor vermelha no decorrer do tempo de implantação.

Figura 60 – Desbotamento da cor vermelha de películas retrorrefletivas de diferentes placas de sinalização vertical localizadas em Santa Maria/RS



Fonte: Autor.

Observa-se pela Figura 60, as duas sinalizações verticais – (1) e (2) – a parte com a película retrorrefletiva de cor branca, apresentam resultados muito próximos entre elas. Contudo a fração em que havia a película de cor vermelha apresentou um desbotamento tanto para a primeira placa (1) quanto para a segunda (2), mas observa que o valor de retrorefletividade encontrado para a primeira sinalização vertical (31 cd/lx.m<sup>2</sup>) mostrou superior do que para a segunda sinalização (8 cd/lx.m<sup>2</sup>). Esse do aumento do valor de retrorefletividade entre as duas comparações é motivado pelo

desbotamento da cor vermelha em que está mais próximo da cor branca gerando uma retrorefletividade maior ocasionado pela cor mais clara.

Aproveita-se, ainda, as Figura 57, Figura 58 e Figura 59, para discorrer sobre o modo como é avaliado a retrorefletividade das películas quanto aos parâmetros mínimos finais. Usualmente, os órgãos, tanto os brasileiros quanto os internacionais, utilizam da média de diferentes pontos de avaliação, para uma mesma cor, para representar o valor característico para comparação entre os parâmetros mínimos finais. Entretanto, vide as Figura 57, Figura 58 e Figura 59, nota-se que ao longo do tempo as medidas média apresentam um oscilação significativa do seus valores médios e, com isso, dependendo do momento de medição, podem condenar uma sinalização vertical abaixo dos parâmetros mínimos finais e futuramente a mesma película, que havia apresentado falha, voltar a exibir resultados médios de retrorefletividade acima dos requisitos mínimos finais. Não foi encontrado respostas para a ocorrência dessas variações, nas revisões de literatura, que a justificassem, mas acredita-se que sejam motivadas por fatores climáticos, como precipitação pluviométrica e temperatura, que serão estudadas nas seções posteriores.

#### **4.1.9 Avaliação da retrorefletividade em relação à precipitação pluviométrica no segmento experimental**

De acordo com a metodologia apresentada na seção 3.5.2 , foram realizados períodos de leituras, de hora em hora, com intuito de observar o que ocorre com os valores de retrorefletividade ao longo do tempo em relação à precipitação pluviométrica. Já que, tem sido observada uma significativa variabilidade dos resultados de retrorefletividade obtidos no decorrer desses 75 meses de levantamentos no segmento experimental.

Acreditava-se que um dos fatores dessa variabilidade de resultados era a influência da precipitação pluviométrica sobre as películas retrorefletivas. Pensava-se que, após a chuva, as películas retrorefletivas eram limpas e sua retrorefletividade, consecutivamente, aumentava.

Porém, com o percorrer da pesquisa, notou-se que também poderia haver alguma variabilidade causada pela diferença de temperatura que se encontrava na película retrorefletiva no momento em que se realizava a medição. A partir disso,

juntamente ao ensaio para observar a variação de retrorrefletividade em relação à precipitação pluviométrica, foi realizada a medição da temperatura da película.

Contudo, a análise realizada acerca da influência da precipitação pluviométrica e de temperatura foi dividida em duas seções para uma melhor compreensão das considerações. Esta seção tem como foco a análise em relação à precipitação pluviométrica e, na próxima seção, será discutida a relação da temperatura nas medições.

Nesta pesquisa, houve três datas de medições, realizadas de hora em hora, as quais serão nomeadas como “Data 1”, “Data 2” e “Data 3”.

Os ensaios de avaliação de precipitação pluviométrica e temperatura foram feitos simultaneamente apenas nos dois primeiros períodos de teste (“Data 1” e “Data 2”). Na “Data 3”, foi realizado somente o ensaio em relação à temperatura da película, o que será abordado na próxima seção.

Assim como os valores de retrorrefletividade, três parâmetros climáticos foram mensurados, a fim de verificar alguma influência deles sobre as películas. Tais parâmetros foram: temperatura da película ( $^{\circ}\text{C}$ ), radiação solar ( $\text{kJ}/\text{m}^2$ ) e precipitação pluviométrica (mm).

As datas de cada ensaio – “Data 1”, “Data 2” e “Data 3” – correspondem aos dias 16 de março de 2019, 04 de abril de 2019 e 02 de agosto de 2019, respectivamente. Contudo, já que esta seção será focada apenas na avaliação da precipitação pluviométrica, serão apresentados somente os resultados da “Data 1” e da “Data 2”. As análises referentes à “Data 3”, serão apresentadas na próxima seção. No entanto, ressalta-se que os valores de temperatura das películas serão apresentados nos gráficos da “Data 1” e “Data 2”, nesta seção, para que essas informações não sejam repetidas posteriormente.

A temperatura média ambiente encontrada ao longo da série de medições, segundo o INMET, foi de  $23,3^{\circ}\text{C}$  para a “Data 1”,  $19^{\circ}\text{C}$  para a “Data 2” e  $11,4^{\circ}\text{C}$  para a “Data 3”.

Nas primeiras duas datas, foi iniciado o processo de medição de retrorrefletividade antes e depois da chuva, com o intuito de verificar sua influência sobre a retrorrefletividade das películas. Como comentado no item de métodos e técnicas, foram executadas inúmeras medidas antes de uma possível chuva, a fim de se ter uma leitura mais perto de uma precipitação pluviométrica.

Com isso, para as duas datas de medição, houve leituras antes da chuva, mas em tempos distintos. Para a “Data 1”, a medida antes da chuva foi realizada cerca de cinco horas antes do início da precipitação pluviométrica; já para a “Data 2”, a medição foi realizada aproximadamente uma hora antes. Essas leituras são expostas nos gráficos, no tempo de 0 hora, da Figura 61 à Figura 66.

Com base nos dados do INMET, a “Data 1” teve uma precipitação pluviométrica acumulada de 66,2mm, com uma duração de 36 horas de precipitação. Para a “Data 2”, verificou-se uma precipitação com um total de 104mm de chuva durante 17 horas, volumes de chuva bastante representativos se comparados à média mensal observada no mesmo ano. Em 2019, o volume de precipitação mensal, segundo dados do INMET, foi em torno de 154 mm.

Logo após o fim da chuva, foi aguardado o momento em que as placas estivessem secas naturalmente. Na “Data 1”, o tempo de secagem da película levou cerca de uma hora, uma vez que o término da precipitação ocorreu às 13 h do dia 18 de março de 2019, turno em que havia interferência do sol na secagem, e as leituras começaram a ser realizadas às 14h do mesmo dia.

Já para a “Data 2”, esse tempo de secagem foi maior em virtude de a precipitação ter findado no turno da noite, condicionando a secagem natural completa após o nascer do sol. O tempo de secagem para a “Data 2” foi de cerca de 4 horas. Isto é, a precipitação pluviométrica terminou às 4h do dia 5 de abril de 2019, e sua medição iniciou, aproximadamente, às 9h da manhã do mesmo dia.

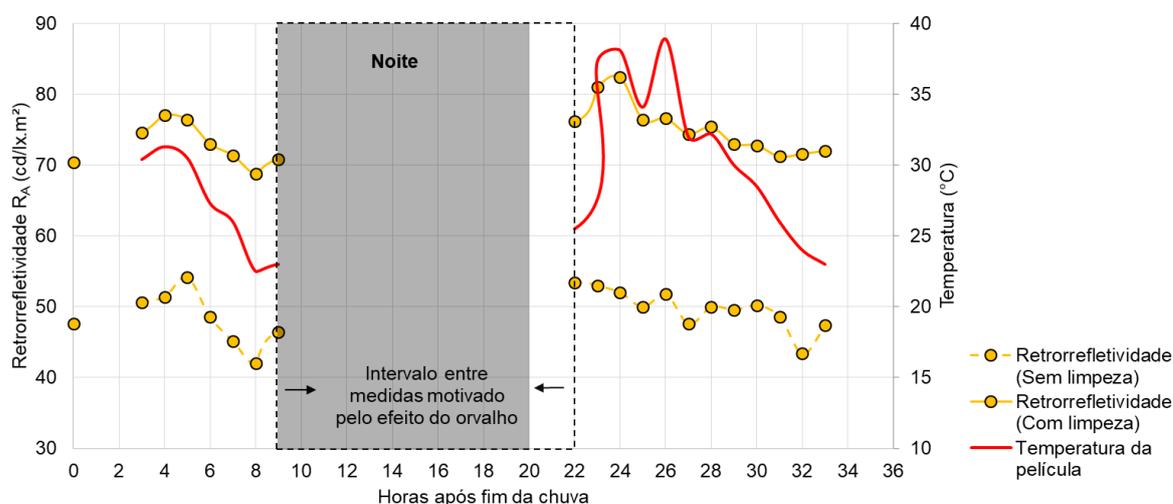
Então, após esse tempo de secagem natural das películas retrorrefletivas, foram iniciadas as leituras, espaçadas de hora em hora. Admitiu-se como parada das leituras o instante em que as medidas apresentassem constâncias de valor em leituras consecutivas.

Com relação ao número de medidas realizadas cada data, na “Data 1”, foram executadas 20 medidas, contando a medida pré-chuva. Nesse primeiro experimento, foram realizadas sete leituras até que foi observado o fenômeno de orvalho, cessando o processo. As leituras foram retomadas no dia posterior, quando as películas se encontraram secas e adequadas para a continuidade das leituras. Na “Data 2”, foram realizadas 31 medidas, totalizando, assim, 36 horas de medidas após o fim da precipitação.

No corpo do texto, serão apresentados apenas os resultados da cor amarela; os dados das outras cores estão dispostos no Apêndice A. Contudo, salienta-se que

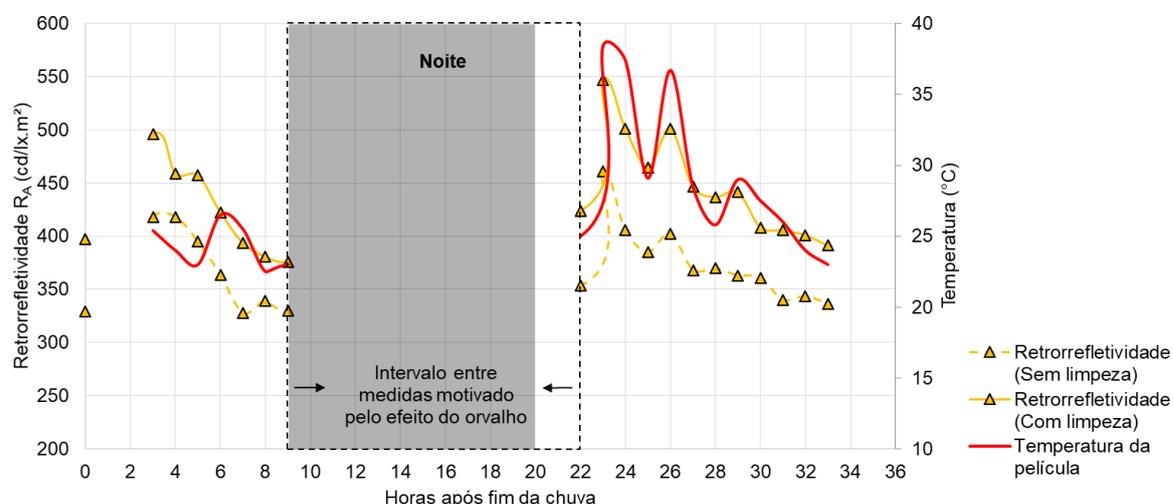
o comportamento encontrado para as outras cores foram semelhantes ao encontrado para a cor amarela, distinguindo apenas os tipos de película. Da Figura 61 à Figura 66, são apresentados os dados de retrorrefletividade obtidos para a “Data 1” e para a “Data 2” da cor amarela, expondo, em conjunto, os valores de temperatura da película (que será comentado no próximo item).

Figura 61 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor amarelo tipo I no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019)



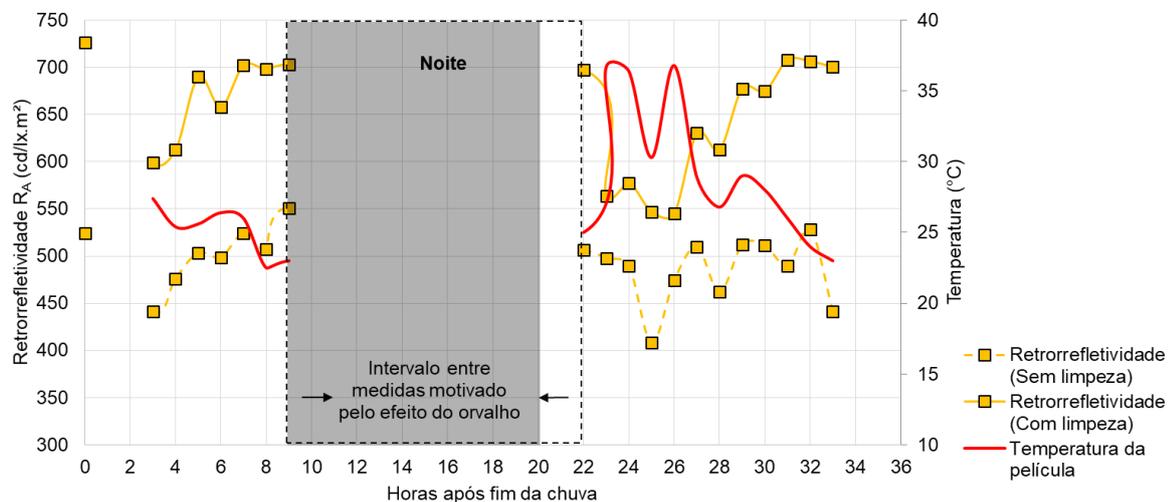
Fonte: Autor.

Figura 62 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor amarelo tipo III no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019)



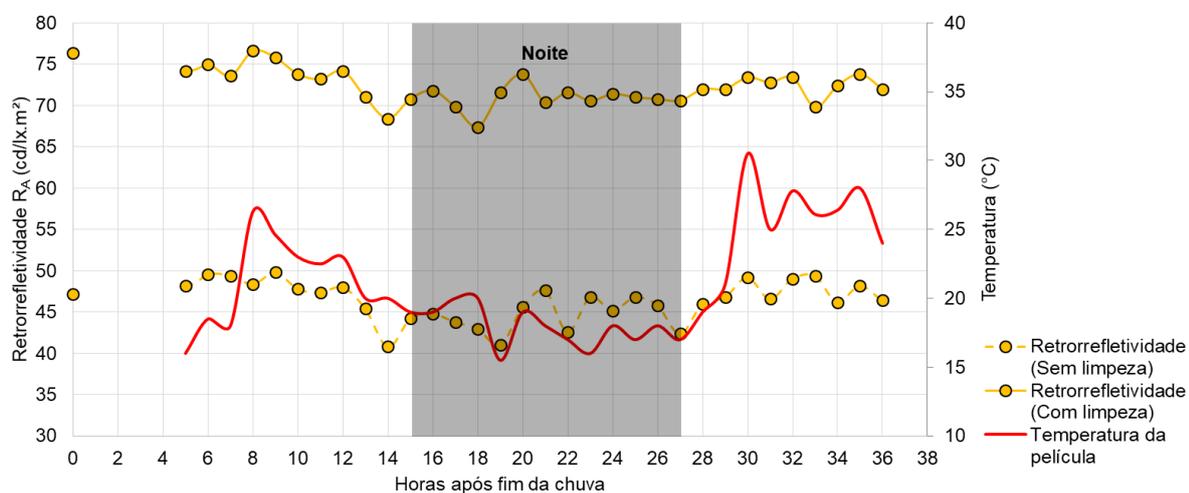
Fonte: Autor.

Figura 63 - Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor amarelo tipo X no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019)



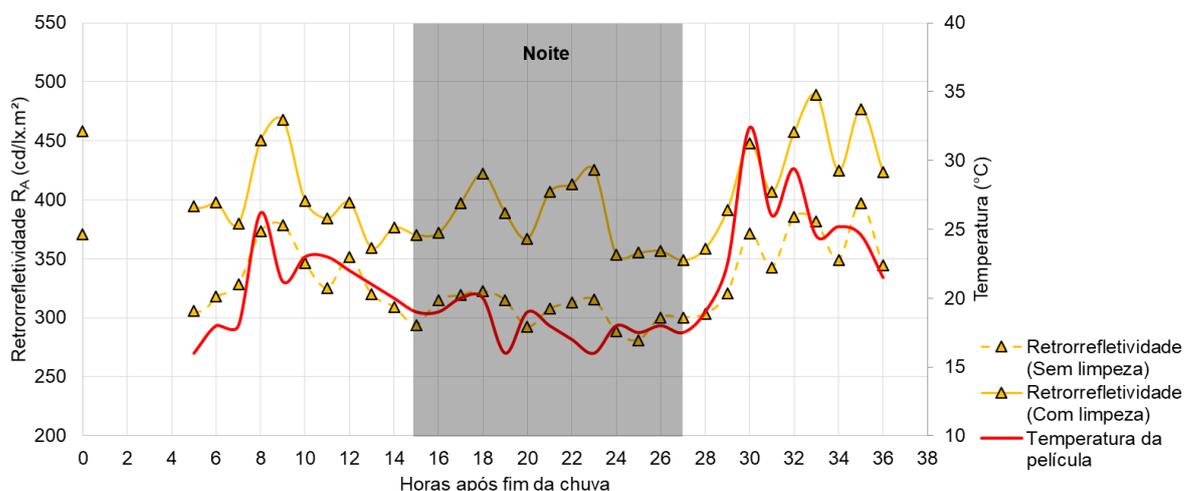
Fonte: Autor.

Figura 64 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor amarelo tipo I no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019)



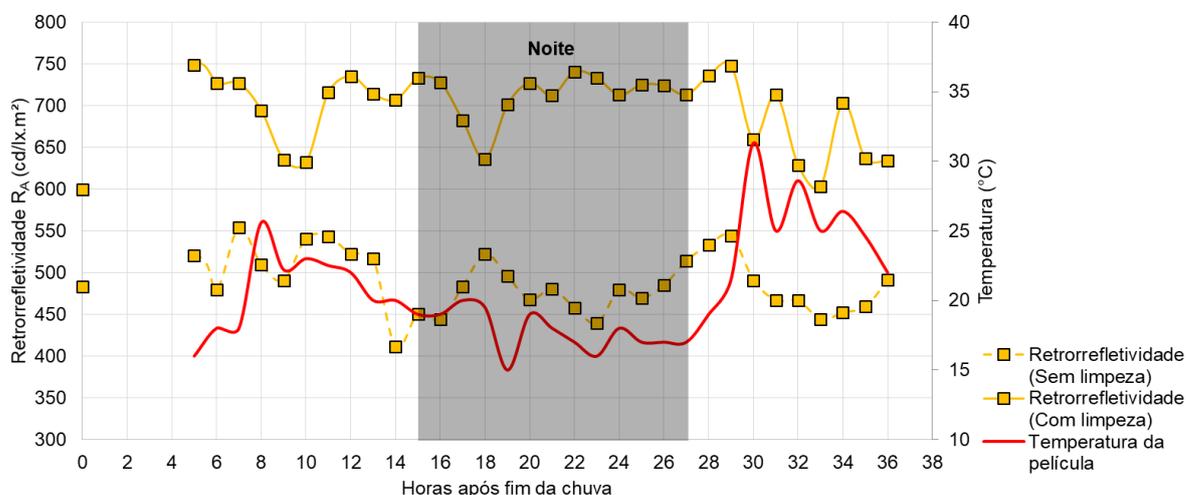
Fonte: Autor.

Figura 65 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor amarelo tipo III no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019)



Fonte: Autor.

Figura 66 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor amarelo tipo X no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019)



Fonte: Autor.

Salienta-se que as observações realizadas a seguir caracterizam para todas as cores do segmento experimental, posto que elas tiveram comportamentos semelhantes, diferenciando apenas nos tipos de películas.

No que concerne à ação da chuva sobre as medidas de retrorrefletividade, esperava-se que, após a chuva, ocorresse um aumento da retrorrefletividade em

comparação à medida no tempo zero, como consequência de uma limpeza natural em função da chuva.

Porém, ao observar os dados (Figura 61 à Figura 66), não verifica-se esse comportamento para as leituras obtidas tanto na “Data 1” quanto na “Data 2”, posto que os tipos de películas mostram respostas diferentes quanto aos resultados de retrorefletividade.

Observa-se que, na “Data 1”, as películas tipos I e III exibiram, usualmente, um aumento de retrorefletividade logo após a chuva e, no decorrer do dia, os valores foram diminuindo. Esse comportamento se repetiu após a volta das medições entre o fenômeno de orvalho nas películas retrorefletivas. Entretanto, para a “Data 2”, esses mesmos tipos de películas tiveram, em geral, a média de retrorefletividade antes da chuva menor que a medida média realizada após a chuva. Contudo, de forma análoga à “Data 1”, houve um pico de aumento do valor de retrorefletividade em um período do dia e os valores foram decrescendo com a chegada do turno noturno.

Entretanto, para película tipo X, verificou-se um comportamento antagônico das outras películas, pois o valor de retrorefletividade apresentou um vale em um momento do dia e foi aumentando ao longo do dia, com a chegada do turno noturno.

Quanto às medidas antes e depois da chuva para as películas tipo X, nota-se que, na “Data 1”, a leitura média de retrorefletividade realizada antes da chuva foi maior que após a chuva. Entretanto, na “Data 2”, houve um efeito contrário, apresentando a medida antes da chuva menor que após a chuva.

Esse desempenho de retrorefletividade pode ser justificado pelos diferentes horários do dia em que foram realizadas as medidas antes da chuva, já que, na “Data 1”, a medida foi obtida perto das 18h, horário mais próximo do anoitecer, quando as películas tipo I e tipo III já estão diminuindo seus valores. Na “Data 2”, as leituras foram realizadas próximo das 11h, horário perto do pico de temperatura do dia, mostrando correlação mais significativa com a temperatura da película no momento da medição do que com a precipitação pluviométrica.

Em síntese, não foi verificada influência significativa da precipitação pluviométrica sobre as medidas retrorefletivas nessas duas datas de avaliação. Todavia, os dados apresentados na “Data 1” e na “Data 2” apresentaram uma influência maior da temperatura da película sobre as medidas retrorefletivas do que a precipitação pluviométrica. Isso será melhor discutido após a análise da temperatura da película, apresentada na próxima seção.

#### **4.1.10 Avaliação da retrorrefletividade em relação à temperatura da película no segmento experimental**

Junto à análise da seção anterior, foram observadas, em leituras anteriores, mudanças significativas de valores de retrorrefletividade durante diferentes horários do dia, o que levou a considerar uma possível influência da oscilação da temperatura sobre tais leituras. Portanto, foi iniciada a verificação da temperatura da película no momento da medição, tentando observar se esse fator exercia alguma interferência sobre a retrorrefletividade.

Como não foi verificada nenhuma ação significativa nos resultados de retrorrefletividade em relação à precipitação pluviométrica, a terceira data foi destinada apenas para verificar se as películas respondiam da mesma maneira que às outras datas. No entanto, procurou-se realizar em um dia com temperatura mais baixa, já que as duas primeiras medições foram realizadas durante dias com temperatura mais altas em relação ao ano.

Para a obtenção das medidas de temperatura da película, foi utilizado o termômetro infravermelho MT-350 da marca *Minipa*.

Para os resultados das temperaturas das películas apresentados entre a Figura 61 à Figura 69, foi utilizada a média dos pares semelhantes – com e sem limpeza –, pois suas medidas exibiram valores muito próximos. As variações de temperatura das películas encontradas para as três datas foram: de 16 a 44°C na “Data 1”; de 15 a 37 °C na “Data 2”; e na “Data 3” de 1 a 34 °C.

Quanto à influência da temperatura nos dados apresentados entre as Figura 61 e a Figura 66, verifica-se um comportamento que explica melhor a variação dos dados de retrorrefletividade. Tanto para a “Data 1” quanto para a “Data 2”, observou-se que, nas placas do tipo I, há um aumento dos valores de retrorrefletividade paralelamente ao aumento de temperatura, comportamento também observado nas películas do tipo III. Entretanto, as películas do tipo X apresentam comportamento inverso, sendo verificada uma queda da retrorrefletividade com o aumento da temperatura. Assim, constatou-se que a temperatura da película influencia os diferentes tipos de película de distintas maneiras.

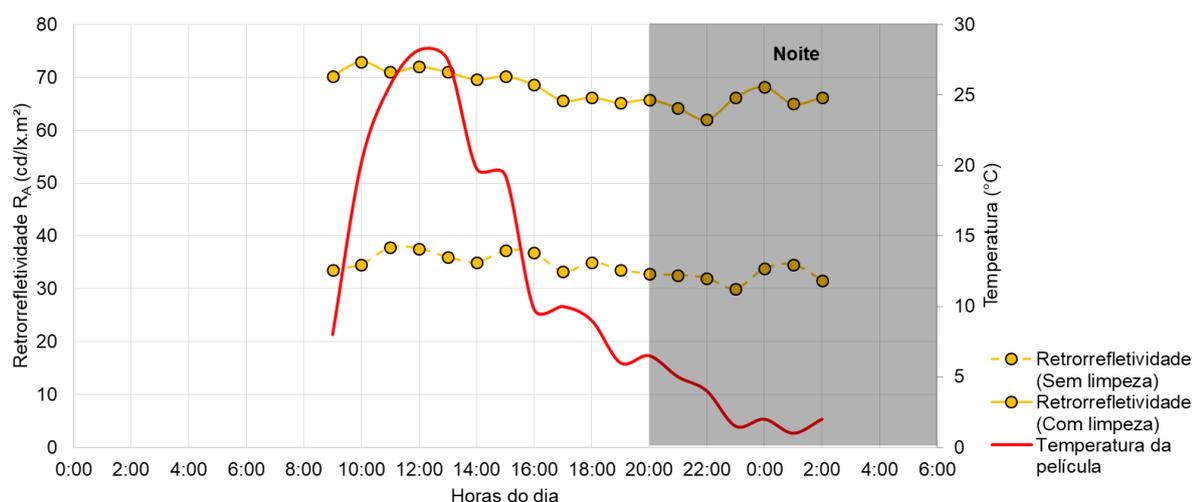
Não foi observada uma significativa conexão das medidas de retrorrefletividade com as linhas de radiação solar, além do fato de, com o aumento de radiação, haver

o aumento de temperatura. Contudo, quando se observa as medidas obtidas à noite, é possível detectar algumas variações de temperatura que convergem com os resultados de retrorrefletividade, mostrando existir maior equivalência dos parâmetros de temperatura da película com a retrorrefletividade do que com a variação da radiação solar.

Após analisar as duas primeiras datas do experimento e não verificar um significativo efeito da chuva sobre as medidas de retrorrefletividade, mas ter sido observado, a partir dos gráficos, um expressivo efeito da temperatura, decidiu-se repetir a avaliação em uma data com temperaturas mais baixas.

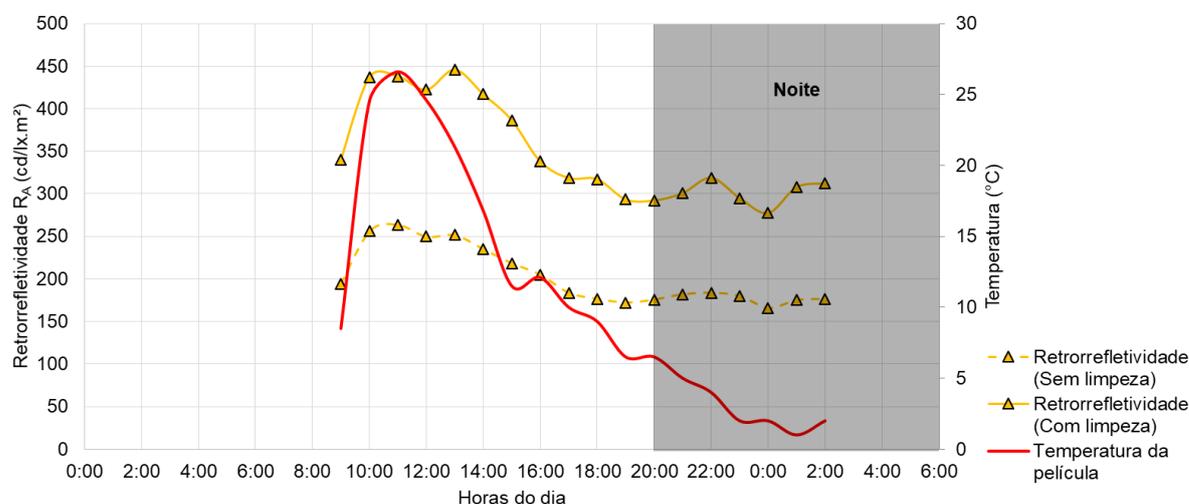
A “Data 3” obteve um total de 18 campanhas de leituras, totalizando 17 horas de avaliação. Assim como para a “Data 1” e para a “Data 2”, adotou-se a parada da campanha de avaliação assim que as medidas mostrassem uma constância nos resultados. Os resultados das medições relativas à “Data 3” (02/08/2019) estão apresentados entre a Figura 67 e a Figura 69. Do mesmo modo como na seção anterior, apresentou somente os resultados das películas de cor amarela, pois a análise realizada é semelhante as observadas nas outras cores. Os resultados das outras cores serão mostradas no Apêndice A juntamente com as “Data 1” e “Data 2”.

Figura 67 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor amarela tipo I (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019)



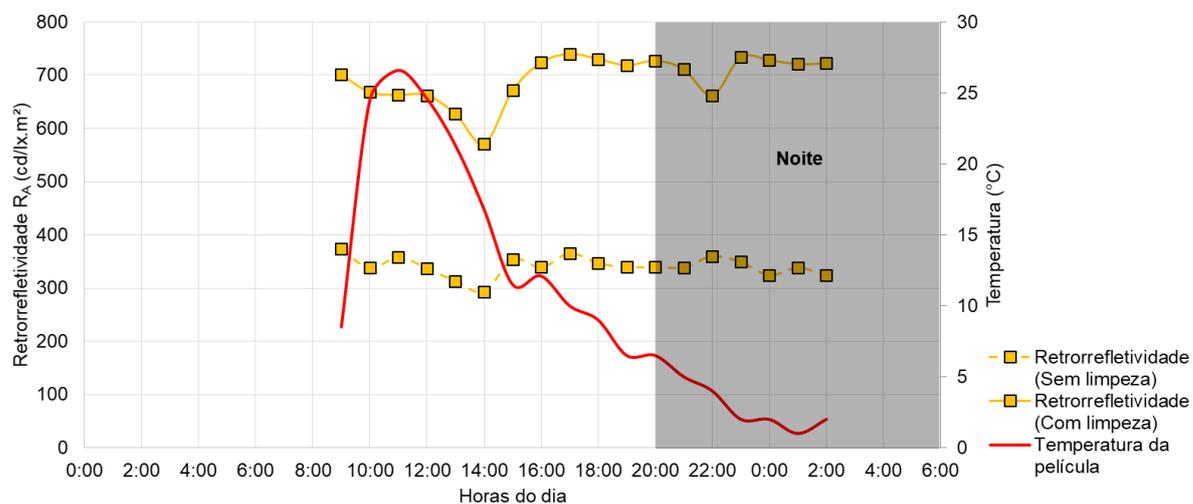
Fonte: Autor.

Figura 68 – Medida de retrorrefletividade média da película de cor amarela tipo III (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019)



Fonte: Autor.

Figura 69 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor amarela tipo X (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019)



Fonte: Autor.

Quanto as Figura 67 a Figura 69, percebe-se uma tendência semelhante entre as leituras obtidas na “Data 1” e na “Data 2” para as películas tipos I e III, observando-se uma diminuição da retrorrefletividade em temperaturas decrescentes, sendo mais suave para a película tipo I. Contudo, não se notou comportamento semelhante para

as películas tipo X quando foi verificado o descréscimo do valor de retrorrefletividade próximo ao pico de temperatura.

Com o intuito de analisar todas as três datas juntas, todos os resultados das medições de retrorrefletividade foram compilados em uma medida padrão a fim de melhor visualizar a correlação do valor de temperatura com as medidas de retrorrefletividade. Para isso, foi utilizada uma temperatura padrão de 25°C, pois foi a temperatura encontrada em todas as três datas. Adotou-se o valor 1 para a retrorrefletividade que tivesse tal temperatura ou, caso não houvesse o valor de retrorrefletividade para a temperatura padrão (25°C), fez-se o uso da interpolação linear dos resultados próximos para encontrar o valor de retrorrefletividade referência para essa temperatura de película.

Com a medida de retrorrefletividade padrão encontrada para as três datas, fez-se uso de interpolação linear para encontrar os valores das outras medidas feitas durante o dia em relação ao valor padrão (igual a 1) para as outras temperaturas, com o intuito de observar se houve uma tendência de ganho ou perda de retrorrefletividade com diferença de temperatura. Vale ressaltar que foi obtida uma medida padrão (25 °C) para cada data ensaiada a fim de evitar que a perda de desempenho em relação ao tempo de exposição entre as diferentes datas fosse inserido na compilação dos resultados.

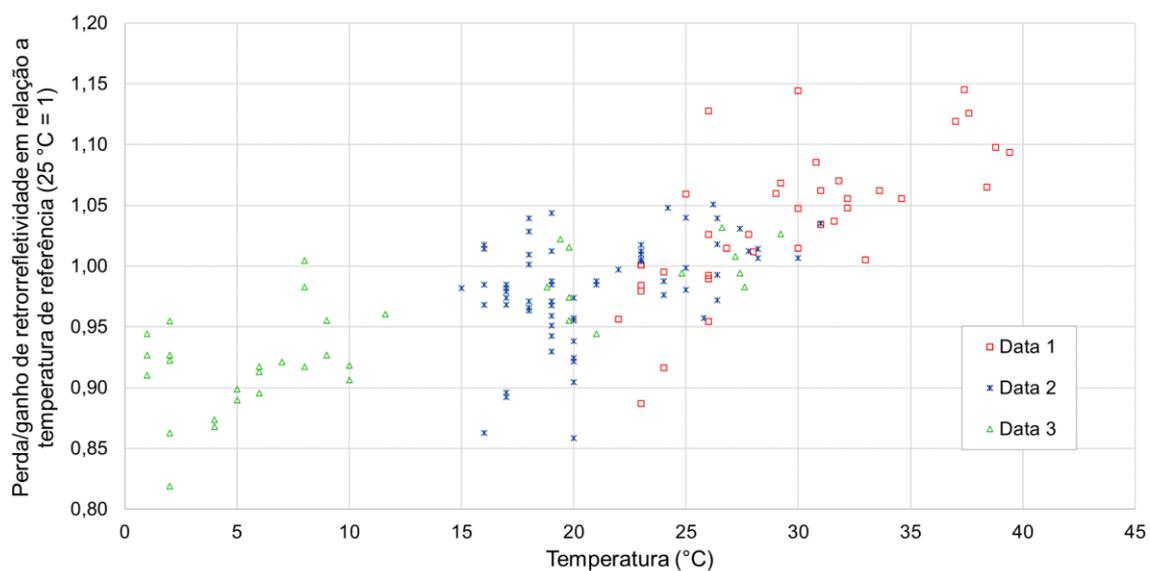
Destaca-se, ainda, que as medidas das películas que não recebiam a limpeza usual foram inseridas junto das que recebiam, dado que os dois pares semelhantes de películas sofrem o mesmo efeito de perda/ganho durante o dia. Contudo, os valores absolutos de retrorrefletividade das películas sujas são menores devido à sujeira. Com isso, estipularam-se valores padrões de temperaturas distintas para a película que não recebia limpeza e outro para aquelas que recebiam.

Um questionamento que pode ser realizado é sobre o modo como ficaria a disposição dos resultados transformados, visto que, para a “Data 1”, as leituras foram realizadas em um dia quente se comparado com as medidas realizadas na “Data 3”, um dia frio. Questionou-se se essa transformação das medidas tende a um mesmo comportamento, independentemente da data e da variação de temperatura da película em que foi realizada.

Para isso, serão apresentados os dados com as medidas das três diferentes datas para uma mesma cor, com o intuito de verificar se existe um padrão de perda/ganho de retrorrefletividade para os diferentes tipos de películas. Desse modo,

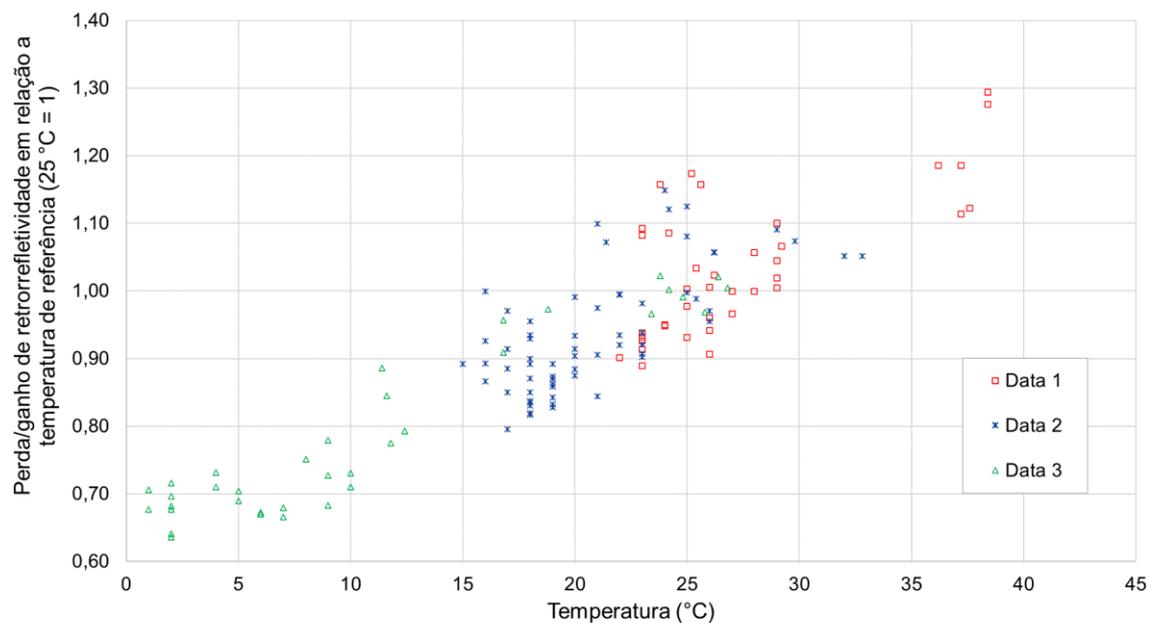
a cor amarela foi a escolhida para exemplificar a variação, dado que a análise é equivalente para todas as cores. Entre as Figura 70 a Figura 72, encontra-se a disposição dos resultados para as leituras de película amarela de tipo I, tipo III e tipo X, respectivamente.

Figura 70 – Resultados de perda/ganho de retrorefletividade para a cor amarela de tipo I entre as diferentes datas



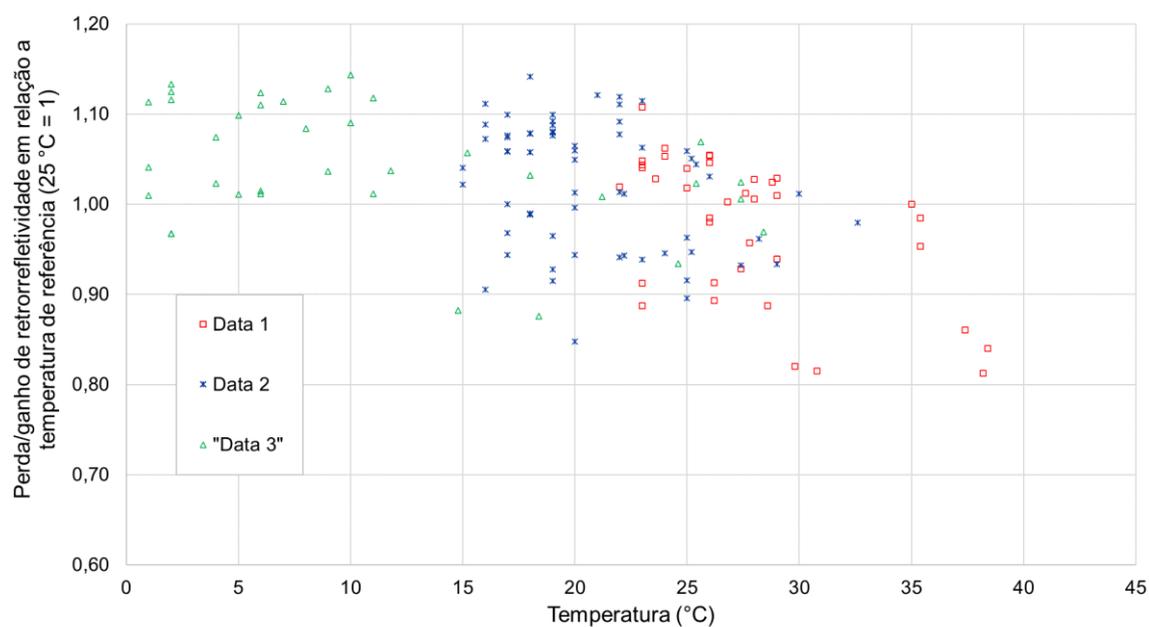
Fonte: Autor.

Figura 71 – Resultados de perda/ganho de retrorrefletividade para a cor amarela de tipo III entre as diferentes datas



Fonte: Autor.

Figura 72 – Resultados de perda/ganho de retrorrefletividade para a cor amarela de tipo X entre as diferentes datas

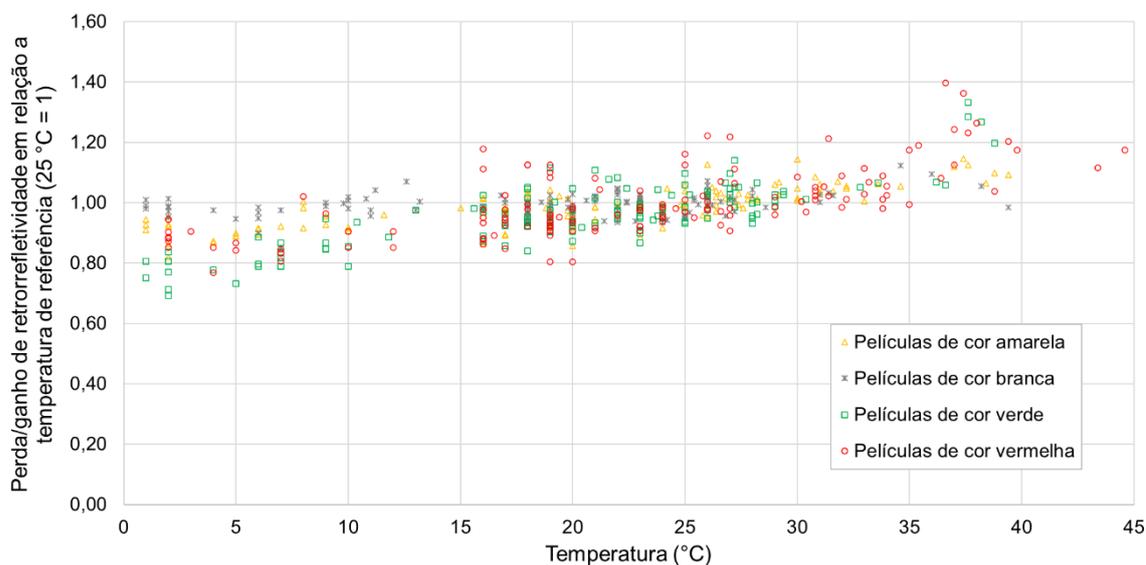


Fonte: Autor.

Os dados das Figura 70, Figura 71 e Figura 72 mostram que, para películas tipo I e III, os dados mostram um comportamento semelhante para as três datas. Verifica-se que a inclinação nas três datas se complementam para as películas tipo I e III, observando-se uma inclinação semelhante para as três datas. Entretanto, isso não é verificado da mesma forma para o tipo X, tendo em vista que as medidas para a “Data 1” não apresentam comportamento semelhante à “Data 2” e à “Data 3”. Essa análise será complementada após a análise dos dados a partir da correlação de Pearson, que será realizada posteriormente.

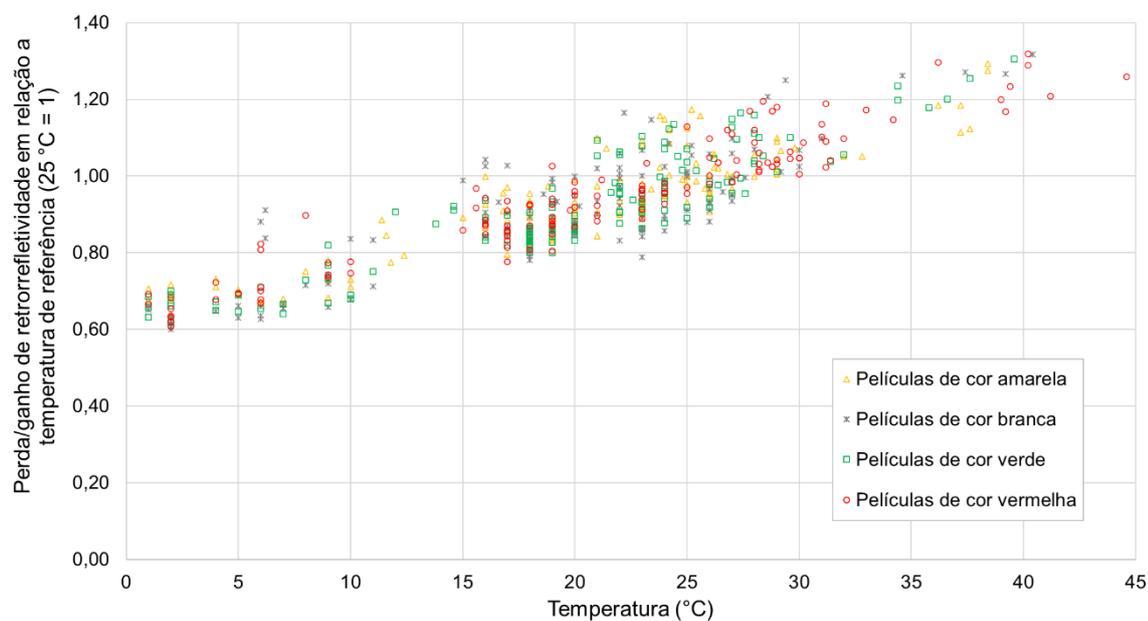
A seguir, serão apresentados os resultados de perda/ganho de retrorrefletividade em relação à temperatura referencial (25°C) para o conjunto das três datas para todas as cores, diferenciando cada gráfico de acordo com o tipo de película (Figura 73 à Figura 75).

Figura 73 – Resultado de perda/ganho das medidas de retrorrefletividade de todas as três datas em relação à temperatura de referência (25°C) de tipo I (NBR14644)



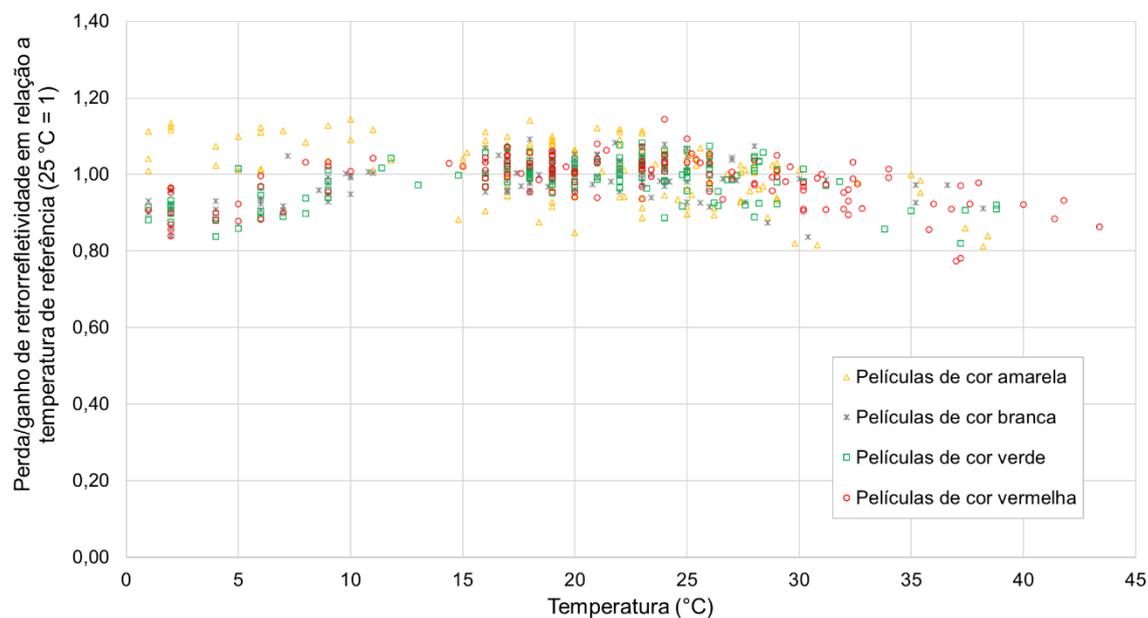
Fonte: Autor.

Figura 74 – Resultado de perda/ganho das medidas de retrorrefletividade de todas as três datas em relação à temperatura de referência (25°C) de tipo III (NBR14644)



Fonte: Autor.

Figura 75 – Resultado de perda/ganho das medidas de retrorrefletividade de todas as três datas em relação à temperatura de referência (25°C) de tipo I (NBR14644)



Fonte: Autor.

A partir dos dados apresentados entre as Figura 73 à Figura 75, verifica-se que as películas de tipo I e III apresentam uma inclinação positiva (aumento da retrorrefletividade com o aumento da temperatura), sendo que a película tipo III

apresenta uma maior inclinação em comparação à tipo I. Já para a película de tipo X, não se observa uma tendência tão clara dos resultados.

Tais dados foram tratados estatisticamente a partir da Correlação de Pearson, sendo encontrados os valores de correlação de Pearson (r) entre os tipos diferentes de películas. Consta, na Tabela 39, o valor de correlação de Pearson que mede o grau de correlação entre duas variáveis, podendo resultar em valores entre -1 e 1. Quanto mais próximos de -1 e 1, demonstra-se que há uma correlação entre as variáveis; no caso, para valores de -1, existe uma correlação negativa perfeita, isto é, se uma aumenta, a outra sempre diminui. Já para valores iguais a 1, existe proporcionalidade direta.

Tabela 39 – Correlações de Pearson entre os resultados de ganho/perda de retrorrefletividade e temperatura das leituras realizadas no segmento experimental

Cor	Coeficiente de correlação de Pearson (r)					
	Tipo I	Correlação*	Tipo III	Correlação*	Tipo X	Correlação*
Vermelho	0,68	Grande	0,94	Grande	-0,07	Nenhuma
Amarelo	0,76	Grande	0,89	Grande	-0,47	Média
Verde	0,82	Grande	0,90	Grande	0,26	Pequena
Branco	0,33	Média	0,85	Grande	0,32	Média

\*Conforme Cohen (1988): 0,1 – < 0,3 (Pequeno) 0,3 – < 0,5 (Médio) ≥ 0,5 (Grande)

Fonte: Autor.

A análise estatística realizada corrobora a afirmação de boa correlação encontrada entre os valores perda/ganho de retrorrefletividade em relação à temperatura para os tipos I e III no segmento experimental. Contudo, nas películas do tipo X, não foram encontradas correlações semelhantes entre as cores. Salienta-se, como visto entre as Figura 73 e a Figura 74, que, para os tipos I e III, os coeficientes de correlação foram positivos para todas as cores, indicando que a variável retrorrefletividade aumenta com o aumento da temperatura. Verifica-se, também, que as correlações encontradas para o tipo III foram superiores ao tipo I.

O coeficiente de Pearson para o tipo X mostrou média correlação apenas para duas cores, sendo elas amarelo e branco. Cabe salientar que os dados aqui apresentados seguem a mesma tendência do trabalho apresentado por Khrapova (2019) que, em sua pesquisa, obteve pouca variação de retrorrefletividade com a mudança de temperatura para películas com altas retrorrefletividades.

De acordo com os resultados da pesquisa realizada por Khrapova (2019), houve influência da temperatura e umidade do ambiente nas leituras de retrorrefletividade em sinalização vertical. Com base na análise de 1400 leituras, o autor verificou uma variação de 10% na retrorrefletividade em uma mudança de temperatura de 25°C. Esses valores encontrados pelo autor são semelhantes ao encontrados nesta pesquisa, dado que há variações de 25°C da temperatura da película em relação à temperatura de referência (25°C) e, em relação a esse valor, nota-se que a retrorrefletividade obteve uma variação de cerca de 20% quanto à retrorrefletividade medido à temperatura de referência (25°C) para os tipos I e X, e de 40% para o tipo III.

#### 4.2 AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA EM LABORATÓRIO

A fim de verificar se a temperatura da película tem influência sobre a retrorrefletividade e abordar de forma mais sistêmica o que fora observado em campo, realizaram-se medições em laboratório utilizando uma câmara térmica. Isso foi feito para que fosse possível controlar a temperatura das películas e neutralizar a influência de outros parâmetros sobre a amostra, como a radiação solar, a precipitação pluviométrica ou qualquer outro fator que pudesse interferir, de alguma forma, sobre a retrorrefletividade.

Fez-se uso, então, da câmara de acondicionamento de amostras de concreto asfáltico de uma prensa UTM-25. Foi possível regular a temperatura de ensaio das películas entre 0°C e 50°C, simulando as condições térmicas sazonais do RS, observadas também em campo.

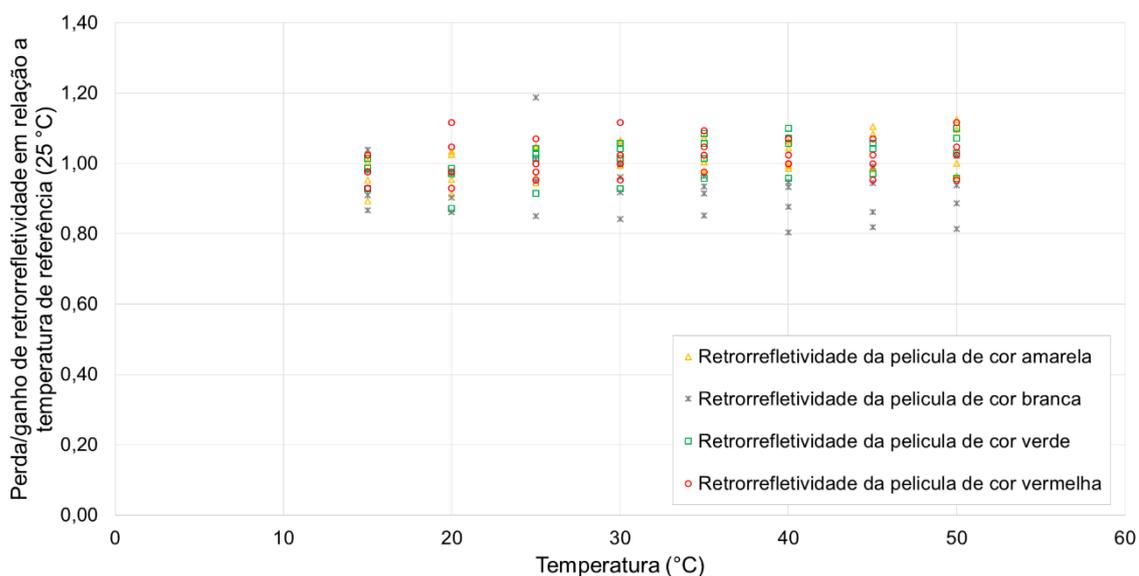
Como discutido na seção 3.5.3 decidiu-se por não utilizar as medidas das temperaturas de 0°C, 5°C e 10°C, posto que as medidas de retrorrefletividade dessas temperaturas apresentaram uma alta variação dos resultados, causada pela umidade que se formou na superfície da película. Mesmo tentando secar a superfície com pano seco, observou-se uma alta variabilidade.

Vale lembrar que as películas retrorrefletivas analisadas em laboratório não são dos mesmos fornecedores daquelas de campo, mas são dos mesmos tipos de películas, conforme preconiza a norma NBR 14644 (ABNT, 2013).

Da mesma maneira como foi exposto para as medidas no segmento experimental (item anterior), os resultados estão apresentados entre as Figura 76 e a

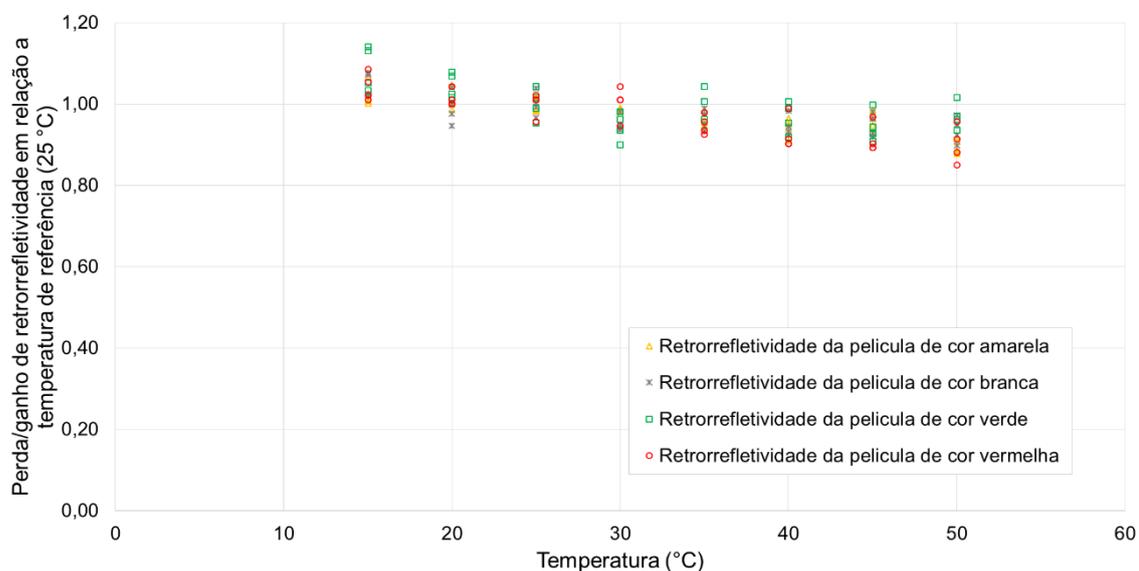
Figura 78. Cada figura apresenta o conjunto de 4 medidas de retrorrefletividade de cada cor para o mesmo tipo de película, cujos resultados foram transformadas através do valor de referência de temperatura (25°C), do mesmo modo como foi executado para as medidas apresentadas nas Figura 73 à Figura 75.

Figura 76 - Resultado de perda/ganho das medidas de retrorrefletividade em relação à temperatura de referência (25°C) de tipo I (NBR14644) realizadas em laboratório



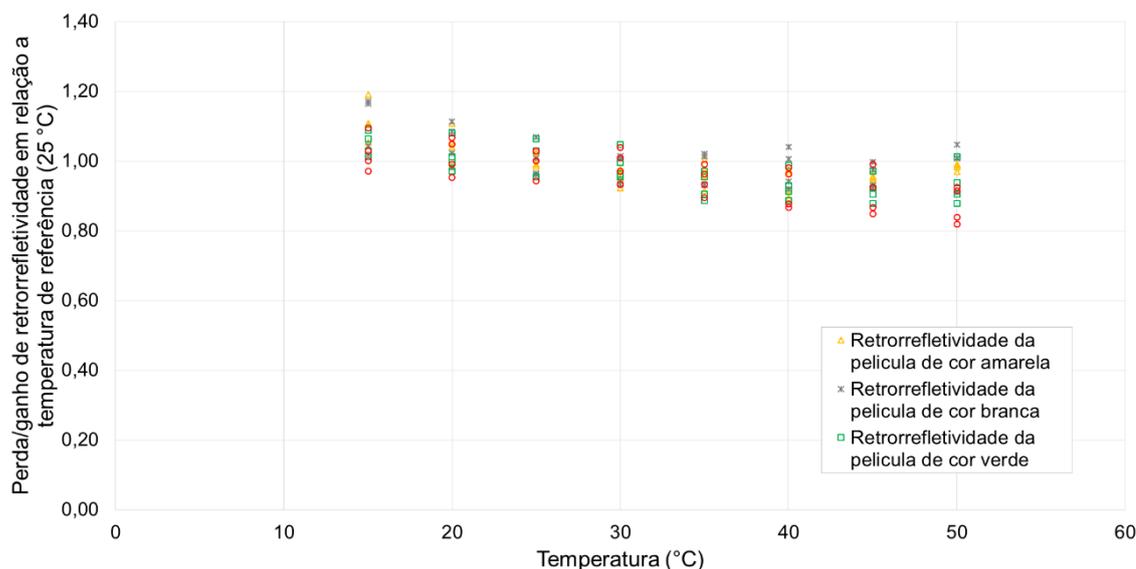
Fonte: Autor.

Figura 77 – Resultado de perda/ganho das medidas de retrorrefletividade em relação à temperatura de referência (25°C) de tipo III (NBR14644) realizadas em laboratório



Fonte: Autor.

Figura 78 – Resultado de perda/ganho das medidas de retrorefletividade em relação à temperatura de referência (25°C) de tipo X (NBR14644) realizadas em laboratório



Fonte: Autor.

Como pode ser percebido por meio das Figura 76 a Figura 78, verifica-se uma certa alteração nos valores de retrorefletividade motivados pela temperatura. Contudo, os resultados de laboratório mostram não haver correlação completa entre comportamento e o tipo de película quando comparadas ao comportamento de campo, uma vez que as películas do tipo III do segmento experimental mostraram um aumento de retrorefletividade com o aumento de temperatura e, para as películas no laboratório, a influência observada foi antagônica.

A seguir, serão apresentados os valores do coeficiente de correlação de Pearson (r) encontrados para as películas ensaiadas em laboratório (Tabela 40) quanto aos valores de retrorefletividade e às medidas de temperatura da película.

Tabela 40 - Correlações de Pearson entre os resultados de ganho/perda de retrorefletividade e temperatura das leituras realizadas em laboratório

(continua)

Cor	Coeficiente de correlação de Pearson (r)					
	Tipo I	Correlação*	Tipo III	Correlação*	Tipo X	Correlação*
Vermelho	0,27	Pequena	-0,83	Grande	-0,74	Grande

(conclusão)

Cor	Coeficiente de correlação de Pearson (r)					
	Tipo I	Correlação*	Tipo III	Correlação*	Tipo X	Correlação*
Amarelo	0,45	Média	-0,86	Grande	-0,68	Grande
Verde	0,48	Média	-0,65	Grande	-0,71	Grande
Branco	-0,25	Pequena	-0,72	Grande	-0,53	Grande

\*Conforme Cohen (1988): 0,1 – < 0,3 (Pequeno) 0,3 – < 0,5 (Médio) ≥ 0,5 (Grande)

Fonte: Autor.

Com base nos dados de análise estatística (Correlação de Pearson) apresentados na Tabela 40, verifica-se que as películas tipo I apresentaram a menor correlação entre os valores de retrorrefletividade e temperatura. Contudo, houve comportamento distinto dos outros tipos de películas, os quais apresentaram um aumento de retrorrefletividade com o aumento da temperatura da película, o que é observado para todas as cores analisadas do tipo I – exceto à cor branca. Para as películas tipo III e X, a correlação entre os dois parâmetros mostra-se contrária, pois há diminuição da retrorrefletividade com o aumento da temperatura da película. Em relação aos coeficientes de correlação de Pearson (r), todas as outras películas apresentaram grande correlação entre as duas propriedades, segundo a proposta de Cohen (1988).

Comparando os resultados de correlação de Pearson entre as obtidas na Tabela 39, correlações de Pearson observadas no segmento experimental, e Tabela 40, nota-se que para as películas de tipo I no segmento experimental houve 3 das 4 cores analisadas uma grande correlação e 1 média correlação entre os valores de temperatura e retrorrefletividade, no qual todas apresentaram um aumento de retrorrefletividade com o aumento de temperatura; já para as analisadas no laboratório houve 2 das 4 cores com média correlação e 2 com pequena correlação entre os valores de retrorrefletividade e temperatura e, assim como vista no segmento experimental, houve um aumento de retrorrefletividade com o aumento de temperatura exceto para a cor branca.

Além disso, para as películas de tipo III, nos dois casos avaliados teve grande correlação entre as medidas de retrorrefletividade e temperatura, entretanto o comportamento de aumento de retrorrefletividade com o aumento de temperatura somente foi visto nas avaliações com as películas no segmento experimental, para as películas no laboratório foi observado uma grandeza inversamente proporcional.

Quanto as películas de tipo X, para os resultados encontrado no segmento experimental houve uma variação entre as situação de correlação entre

retrorefletividade e temperatura alternando entre médio, pequeno e nenhuma correlação além disso variou na questão da grandeza proporcional onde apresentou aumento de retrorefletividade com o aumento de temperatura para 2 cores e diminuição da retrofletividade com o aumento da temperatura para as outras 2 cores. Porém, para os resultados do tipo X observados em laboratório foram mais singulares, no qual mostrou-se uma correlação grande para todas as cores avaliadas e uma diminuição de retrorefletividade com o aumento de temperatura.

Contudo, embora tenha o condicionante das películas serem de diferentes empresas entre as avaliações de laboratório e segmento experimental, as análises mostraram que existe um efeito da temperatura sobre as medidas de retrorefletividade, por vezes com grandezas proporcionais diferentes, todavia usualmente mostraram correlações de média a grande correlação entre as duas variáveis.

Acredita-se que a influência da temperatura sobre as medidas de retrorefletividade talvez esteja atrelada ao material ou formato em que estão arrançados os micropismas ou microesferas, fazendo com a variação da temperatura faça com que o material dilate ou comprima rearranjando modo como a luz é refletida, porém necessita maiores estudos sobre o assunto para verificar o que realmente ocorre com a película.

#### 4.3 AVALIAÇÃO DA PERDA DE DESEMPENHO RETRORREFLETIVO DAS PELÍCULAS CONDICIONADAS NA CÂMARA ÚMIDA

Com intuito de analisar a perda de desempenho retrorefletivo das películas condicionadas na câmara úmida, foram desenvolvidos, neste trabalho, modelos lineares em função do tempo para os dados de retrorefletividade obtidos a partir das películas condicionadas na câmara úmida, semelhante à forma como foram gerados os modelos a partir do segmento experimental.

A explicação da maneira como os modelos foram produzidos está na seção 4.1.2 e, assim como os modelos gerados a partir do segmento experimental, os modelos estão transformados em um equação que resulta na porcentagem em relação à retrorefletividade inicial em que se encontra as medidas ao longo do tempo.

Foram utilizados os mesmos critérios empregados para a modelagem dos resultados do segmento experimental. Logo, usou-se como probabilidade de

significância o valor de 0,05%. E, assim, como para os modelos do segmento experimental, apenas o tempo foi utilizado como variável independente para análise.

As películas avaliadas, como comentado nos métodos e técnicas, são das cores vermelho, amarelo, verde e branco, semelhantes às cores analisadas no segmento experimental. Os tipos de películas ensaiados foram dos tipos III e X, segundo a NBR 14644 (ABNT, 2013), sendo as películas microprismáticas, da mesma forma que películas encontradas no segmento experimental. Entretanto, as empresas de confecção são distintas.

Cada uma das películas condicionadas na câmara úmida completou 4,66 anos de ensaio na sua última campanha de leituras, realizada no dia 15 de julho de 2020, adotado como fim da análise para este estudo. Ao fim da análise, foi obtido um total de 90 campanhas de medidas, sendo realizadas 3 leituras por campanha.

A Tabela 41 resume, junto com os resultados da análise de variância (ANOVA) das regressões lineares, os modelos lineares encontrados para o banco de dados das medidas de retrorrefletividade das películas condicionadas na câmara úmida. Cada um dos modelos apresenta, em função do tempo, o quanto de retrorrefletividade foi reduzida ao longo do tempo de exposição, sendo adotado como 1 a sua retrorrefletividade inicial.

Tabela 41 - Modelos preditivos das películas condicionadas na câmara úmida

Grupo(s)	Modelos Lineares	Modelo	Erro padrão de estimativa	R <sup>2</sup>
Vermelho - Tipo III	$RA\%_{VLH-III-Umid.} = 1 - 0,0941 \times \text{Ano}(s)$	(25)	0,1174	0,60
Vermelho - Tipo X	$RA\%_{VLH-X-Umid.} = 1 - 0,1023 \times \text{Ano}(s)$	(26)	0,1257	0,60
Amarelo - Tipo III	$RA\%_{AML-III-Umid.} = 1 - 0,1219 \times \text{Ano}(s)$	(27)	0,1167	0,72
Amarelo - Tipo X	$RA\%_{AML-X-Umid.} = 1 - 0,1168 \times \text{Ano}(s)$	(28)	0,0982	0,76
Verde - Tipo III	$RA\%_{VRD-III-Umid.} = 1 - 0,1143 \times \text{Ano}(s)$	(29)	0,1257	0,65
Verde - Tipo X	$RA\%_{VRD-X-Umid.} = 1 - 0,0969 \times \text{Ano}(s)$	(30)	0,0972	0,70
Branco - Tipo III	$RA\%_{BRC-III-Umid.} = 1 - 0,1438 \times \text{Ano}(s)$	(31)	0,0953	0,84
Branco - Tipo X	$RA\%_{BRC-X-Umid.} = 1 - 0,0942 \times \text{Ano}(s)$	(32)	0,1146	0,61

Fonte: Autor.

Nota-se que o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) encontrado para os modelos preditivos das películas condicionadas na câmara úmida são superiores aos verificados no segmento experimental e encontrados por outros autores na literatura

mundial. Isso demonstra que os modelos de perda de retrorrefletividade ao longo do tempo da ação da umidade se ajustam bem aos dados obtidos na pesquisa, o que também foi verificado para os modelos gerados para as películas no segmento experimental que não recebiam limpeza.

Sobre o erro padrão de estimativa apresentado pelos modelos lineares, verifica-se medidas muito próximas na comparação entre todos os modelos, sendo apresentado um erro padrão de estimativa médio de 0,11 para os 8 modelos lineares.

Em relação à perda de retrorrefletividade anual em relação à medida inicial, os modelos lineares gerados mostraram semelhança entre a perda anual entre os tipos de películas. As películas de tipo III tiveram, em média, uma perda de 11,85% ao ano e, a da película tipo X foi de 10,26%, perdas médias muito semelhantes entre os dois tipos de películas. Para o tipo III, a película com menor perda anual foi a película de cor vermelha (9,41%), e a maior foi a branca (14,38%). Já para tipo X, a menor perda observada foi a branca (9,42%) e a maior foi a amarela (11,68%).

Ressalta-se que as películas condicionadas na câmara úmida sempre receberam limpeza ao longo do tempo. Diferentemente, das películas expostas no segmento experimental, as medidas após a lavagem da película sempre foram analisadas, não havendo qualquer redução por sujeira.

Em comparação com às perdas observadas nos modelos lineares gerados para o segmento experimental, nota-se que, ao analisar a perda de desempenho das películas condicionadas na câmara úmida em comparação com as do segmento experimental que também recebiam a limpeza regular, percebe-se que a perda de desempenho das películas condicionadas na câmara úmida foi significativamente superior. Isso porque as películas limpas no segmento experimental tiveram, em média, uma perda anual de 1,28%, ao passo que, na câmara úmida, observou-se uma perda média anual de 11,05% sobre a retrorrefletividade inicial.

Já a comparação entre os modelos lineares para as películas sem limpeza regular no segmento experimental, a perda anual de retrorrefletividade anual torna-se mais equivalente, posto que as películas sem limpeza apresentaram um perda média anual de 7,14%. Contudo, em média, as películas condicionadas na câmara úmida apresentaram uma perda de desempenho anual superior quanto à retrorrefletividade inicial. Além disso, percebeu-se que, para a danificação das películas retrorrefletivas, foi mais agressiva a influência da umidade do que a sujeira, uma vez que as películas

expostas ao ambiente no segmento experimental voltaram a ter os mesmos valores da retrorrefletividade inicial após a limpeza geral.

Sobre o condicionamento da câmara úmida, vale observar que as amostras foram mantidas em uma umidade elevada (95% de umidade no ar) e temperatura constante, sem qualquer exposição à radiação solar, em que tiveram uma perda de desempenho retrorrefletivo da amostra, a qual foi motivada exclusivamente pela umidade do ambiente. Talvez a falta de luz solar, associada à umidade, tenha favorecido a formação de fungos que, mesmo com a limpeza das películas, persistiram em sua superfície, provocando uma sensível perda de retrorrefletividade.

Ainda, as películas retrorrefletivas apresentaram danificação superficial em razão da infiltração de umidade. Verifica-se que essa danificação foi iniciada nos cantos das películas, avançando para região central. Como as películas retrorrefletivas possuem espaço com ar dentro do material, possivelmente a umidade deve ter infiltrado nesse espaço, causando, conseqüentemente, a redução das medidas de retrorrefletividade. As Figura 79 e Figura 80 mostram a deterioração causada pela umidade nas amostras dos tipos I, III e X estudadas nesta pesquisa.

Figura 79 - Películas de tipo III (NBR 14644) expostas na câmara úmida após quatro anos e meio de condicionamento



Fonte: Autor.

Figura 80 – Películas de tipo X (NBR 14644) expostas na câmara úmida após quatro anos e meio de condicionamento



Fonte: Autor.

#### 4.4 ENSAIO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO *VERSUS* MEDIDAS EM CAMPO

Com o uso do aparelho de envelhecimento artificial (Suntest XLS+), como discutido no capítulo de métodos e técnicas, películas foram expostas a uma lâmpada de arco de xenônio com comprimentos de onda similares aos encontrados na radiação solar. Além disso, elas ficaram condicionadas em uma temperatura constante de 63°C. Com intuito de ajustar os dados de retrorefletividade em relação à radiação acumulada recebida pelas películas no equipamento Suntest XLS+ e à exposição à radiação solar em campo na tentativa de encontrar uma correlação entre velocidade de perda de retrorefletância entre laboratório e campo. Assim, serão correlacionados os comportamentos das leituras de retrorefletividade quanto às radiações acumuladas nos dois ensaios.

A radiação acumulada está em quilojoule por metro quadrado ( $\text{kJ/m}^2$ ) e representa a quantidade de radiação para espectro de luz de 300-800 nanômetro (nm). Esse espectro de luz é equivalente à porcentagem de luz visível somado à ultravioleta, sendo a ultravioleta a principal responsável por danificar materiais expostos à luz solar.

O ensaio realizado no Suntest possibilitou uma leitura a cada 24 horas de experimento, atingindo 162 campanhas de leituras das películas expostas ao ambiente, sendo elas mensais – como estipulado nos métodos e técnicas. Já as leituras em exposição ambiental (campo) iniciaram no dia 6 maio de 2019 e finalizaram no dia 02 de julho de 2020, obtendo um total de 15 campanhas.

Em cada campanha, foram realizadas 3 leituras por amostra, visto que o aparelho retrorrefletômetro consegue medir todo o exemplar apenas com essas leituras. Isso porque a amostra possui um tamanho reduzido suficiente para que essas medições sejam representativas.

Com o intuito de analisar a velocidade e o potencial correlação entre as perdas de retrorrefletividade das películas expostas às intempéries ambientais (Campo) e das películas ensaiadas no aparelho de envelhecimento acelerado artificial (Suntest XLS+), geraram-se modelos lineares acerca do banco de dados de medidas de retrorrefletividade realizadas nos dois ensaios.

Para o desenvolvimento dos modelos lineares dos dois ensaios, foram utilizados os mesmos critérios para gerar os polinômios de primeiro grau, tanto para as películas do segmento experimental quanto para as expostas na câmara úmida, conforme já explicado na seção 4.1.2 .

Contudo, como o objetivo é verificar a correlação entre os ensaios das películas expostas no Suntest XLS+ e nas intempéries ambientais, os modelos lineares serão feitos em função da radiação acumulada, com comprimento de onda entre 300-800nm. Essa é a única diferença dos modelos preditivos encontrados para o segmento experimental e expostos na câmara úmida.

Nas Tabela 42 e Tabela 43, está exibido o resumo de todos os modelos preditivos lineares do ensaio feito no equipamento Suntest XLS+ e da exposição em campo. Ademais, também são apresentados os resultados da análise de variância realizada para cada uma das regressões.

Tabela 42 – Resumo dos modelos preditivos e dos resultados da análise de variância (ANOVA) das regressões (Suntest XLS+)

Grupo(s)	Modelo preditivo linear	Modelo	Erro padrão de estimativa	R <sup>2</sup>	Valor-P
Vermelho - Tipo I	RA%_VLH-I-Sunt. = 1 - 1,0269E-10xRad	(33)	0,0640	0,00	0,00
Vermelho - Tipo III	RA%_VLH-III-Sunt. = 1 + 1,6960E-08xRad	(34)	0,0512	0,52	0,00
Vermelho - Tipo X	RA%_VLH-X-Sunt. = 1 + 8,8063E-09xRad	(35)	0,0508	0,23	0,00
Amarelo - Tipo I	RA%_AML-I-Sunt. = 1 - 2,3272E-08xRad	(36)	0,0503	0,67	0,00
Amarelo - Tipo III	RA%_AML-III-Sunt. = 1 - 2,6144E-08xRad	(37)	0,0663	0,60	0,00
Amarelo - Tipo X	RA%_AML-X-Sunt. = 1 - 3,0042E-09xRad	(38)	0,0358	0,06	0,00
Verde - Tipo I	RA%_VRD-I-Sunt. = 1 - 1,8821E-08xRad	(39)	0,0735	0,39	0,00
Verde - Tipo III	RA%_VRD-III-Sunt. = 1 - 1,8185E-08xRad	(40)	0,0660	0,42	0,00
Verde - Tipo X	RA%_VRD-X-Sunt. = 1 - 2,0727E-08xRad	(41)	0,0486	0,64	0,00
Branco - Tipo I	RA%_BRC-I-Sunt. = 1 - 5,8186E-09xRad	(42)	0,0616	0,08	0,00
Branco - Tipo III	RA%_BRC-III-Sunt. = 1 - 1,5858E-08xRad	(43)	0,0330	0,69	0,00
Branco - Tipo X	RA%_BRC-X-Sunt. = 1 - 1,0916E-08xRad	(44)	0,0436	0,38	0,00
Azul - Tipo I	RA%_AZL-I-Sunt. = 1 - 2,2942E-08xRad	(45)	0,1837	0,13	0,00
Azul - Tipo III	RA%_AZL-III-Sunt. = 1 - 1,2747E-08xRad	(46)	0,0466	0,42	0,00
Azul - Tipo X	RA%_AZL-X-Sunt. = 1 - 4,1145E-08xRad	(47)	0,1719	0,36	0,00

Rad é a radiação acumulada para espectro de luz de 300-800nm

Fonte: Autor.

Tabela 43 – Resumo dos modelos preditivos e dos resultados da análise de variância (ANOVA) das regressões (Campo)

Grupo(s)	Modelo preditivo linear	Modelo	Erro padrão de estimativa	R <sup>2</sup>
Vermelho - Tipo I	RA%_VLH-I-Camp. = 1 + 1,775E-08xRad	(48)	0,0903	0,11
Vermelho - Tipo III	RA%_VLH-III-Camp. = 1 - 5,212E-09xRad	(49)	0,0598	0,02
Vermelho - Tipo X	RA%_VLH-X-Camp. = 1 - 2,241E-09xRad	(50)	0,0477	0,01
Amarelo - Tipo I	RA%_AML-I-Camp. = 1 + 3,581E-09xRad	(51)	0,1074	0,00
Amarelo - Tipo III	RA%_AML-III-Camp. = 1 - 1,170E-08xRad	(52)	0,0641	0,10
Amarelo - Tipo X	RA%_AML-X-Camp. = 1 - 1,192E-08xRad	(53)	0,0544	0,13
Verde - Tipo I	RA%_VRD-I-Camp. = 1 - 5,889E-09xRad	(54)	0,1091	0,01
Verde - Tipo III	RA%_VRD-III-Camp. = 1 - 2,170E-08xRad	(55)	0,0628	0,27
Verde - Tipo X	RA%_VRD-X-Camp. = 1 - 1,603E-08xRad	(56)	0,0710	0,14
Branco - Tipo I	RA%_BRC-I-Camp. = 1 - 4,438E-08xRad	(57)	0,1287	0,27
Branco - Tipo III	RA%_BRC-III-Camp. = 1 - 3,643E-08xRad	(58)	0,0428	0,70
Branco - Tipo X	RA%_BRC-X-Camp. = 1 - 2,975E-08xRad	(59)	0,0537	0,49
Azul - Tipo I	RA%_AZL-I-Camp. = 1 + 9,902E-10xRad	(60)	0,2090	0,00
Azul - Tipo III	RA%_AZL-III-Camp. = 1 - 2,313E-08xRad	(61)	0,0880	0,18
Azul - Tipo X	RA%_AZL-X-Camp. = 1 - 2,366E-08xRad	(62)	0,0486	0,43

Rad é a radiação acumulada para espectro de luz de 300-800nm

Fonte: Autor.

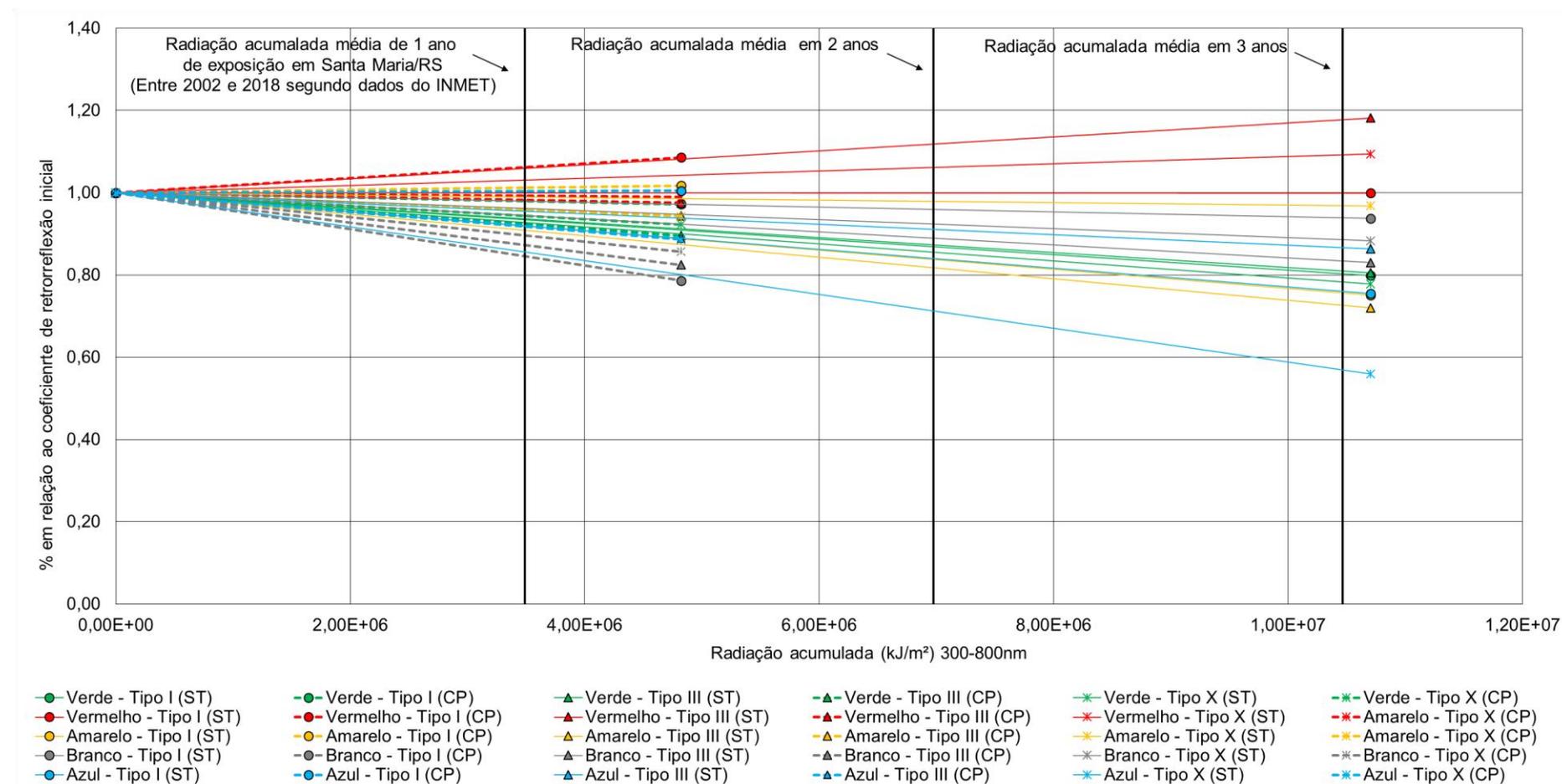
Aos resultados apresentados na Tabela 42 e Tabela 43, quanto aos coeficiente de determinação ( $R^2$ ), nota-se que os resultados foram variados porém houve uma superioridade entre os coeficientes encontrados na exposição ao Suntest XLS+ em comparação ao Campo. Já os resultados para o erro padrão de estimativa ficaram muito próximos entre eles, visto que a média entre os erros padrões de estimativas para o Suntest XLS foi de 0,08 e Campo 0,07 com desvio padrão em relação à média de 0,04 e 0,05, respectivamente.

A Figura 81 exhibe os modelos preditivos lineares apresentados nas Tabela 42 e Tabela 43 quanto ao desempenho retrorrefletivo dos dois ensaios (Suntest XLS+ e campo) ao longo do período de radiação acumulada ensaiado, 10.702.854 kJ/m<sup>2</sup> para o Suntest XLS+ sendo e 4.822.369,14 kJ/m<sup>2</sup> para a exposição em campo. Ressalta-se que os resultados estão representados por sua respectiva cor e tipos de películas através de diferentes símbolos, dividindo as películas expostas em campo por “CP” (linha pontilhada) e as películas expostas no Suntest XLS+ por “ST” (linha contínua).

Quanto à Figura 81, nota-se que os modelos se sobrepõem entre eles ao longo do acúmulo de radiação. Entretanto, não se verifica um comportamento semelhante ao confrontar a mesma cor e o mesmo tipo de película, a exemplo da película branca tipo I ensaiada em campo e a película azul tipo X ensaiada no Suntest XLS+, as quais teve perdas próximas de retrorrefletividade – mas elas não são da mesma cor nem do mesmo tipo de película. Também não se verifica semelhança de performance se comparadas todas as amostras.

Além disso, percebe-se que, para os dois ensaios, as películas de cor vermelha tiveram as menores perdas. Até mesmo as películas do tipo I (Campo) e dos tipos III e X (Suntest XLS+ demonstraram um ganho de retrorrefletividade ao longo do acúmulo de radiação.

Figura 81 – Modelos lineares das películas ensaiadas no Suntest XLS+ e das expostas à intempéries ambientais entre o ponto inicial ao final de cada ensaio



Fonte: Autor.

Para confrontar o desempenho retrorrefletivo dos modelos preditivos, apresentado na Tabela 42 e Tabela 43, exibe-se, na Tabela 44, a porcentagem de perda/ganho de retrorrefletividade no instante em que atinge à radiação acumulada final em campo ( $4,82E+06$  kJ/m<sup>2</sup> para 300-800nm) em Santa Maria/RS sobre as funções de primeiro grau. Destaca-se que os valores negativos significa que houve perda de retrorrefletividade e positivo ganho.

Tabela 44 – Perda/ganho de retrorrefletividade no instante em que atinge à radiação acumulada final em campo ( $4,82E+06$  kJ/m<sup>2</sup> para 300-800nm), em porcentagem, em relação a medida inicial de retrorrefletividade

Cor	Tipo de película segundo NBR 14644 (ABNT, 2013)	Perda/ganho quanto ao modelo das películas ensaiadas no Suntest XLS+	Perda/ganho quanto ao modelo das películas ensaiadas no Campo	Modulo da diferença entre a perda/ganho do Sunstest XLS+ e Campo
Vermelho	I	-5,69%	4,85%	10,54%
	III	9,34%	-1,32%	10,67%
	X	0,07%	-0,54%	0,61%
Amarelo	I	-19,78%	2,97%	22,75%
	III	-19,13%	-2,17%	16,95%
	X	-6,53%	-5,88%	0,66%
Verde	I	-18,61%	-14,73%	3,88%
	III	-14,66%	-18,02%	3,36%
	X	-19,12%	-12,96%	6,16%
Branco	I	-8,11%	-24,39%	16,28%
	III	-7,18%	-13,26%	6,08%
	X	-7,31%	-15,50%	8,18%
Azul	I	-21,52%	-11,80%	9,72%
	III	-4,48%	-15,66%	11,18%
	X	-26,93%	-13,56%	13,37%

Fonte: Autor.

Sobre a Tabela 43, comparando a performance de retrorrefletância das mesmas cores e dos mesmos tipos de películas entre os ensaios realizados para o Suntest XLS+ e em campo, não foi notado um comportamento semelhante entre as películas. Uma vez que a diferença entre a perda/ganho entre os resultados encontrados pela exposição ao Suntest XLS e as observadas em campo mostrou uma variação de

29,63% e 0,76% para a maior e menor variação entre os dois resultados de perda/ganho, respectivamente.

Segundo Ketola (1999), mesmo que os dispositivos tenham sistemas para controlar varios parâmetros, esses testes acelerados demonstram grande variabilidade entre os resultados. O autor obteve diferentes perdas de desempenho para um único rolo de folha retrorrefletiva em diferentes ciclos de ensaio, tendo obtido uma alta variação em seus resultados.

Ademais, foi verificado se as películas tiveram um perda significativa de retrorefletividade nos dois ensaios analisados. Para isso foi confrontado a diferença entre o primeiro e o último valor de retrorefletividade média de cada uma das películas avaliadas entre o desvio padrão de todas as campanhas de medida, assim como foi realizado para as películas no segmento experimental, com intuito de observar se os resultados de retrorefletividade obtidos entre a primeira e ultima medida estão apenas dentro do desvio padrão do ensaio e conseqüentemente não ter mostrado nenhuma perda/ganho de retrorefletividade ao longo do ensaio. A Tabela 45 estão expostos um resumo com as diferenças entre o primeiro e ultimo valor absoluto de retrorefletividade média de cada uma das 30 películas avaliadas (15 do Suntest XLS+ e 15 do campo) e, juntamente, a média do desvio padrão das campanhas de medições para cada uma delas. Os valores da diferença absoluta entre o primeiro e último resultados de retrorefletividade média apresentam medidas com sinal negativo para perda de retrorefletividade e positivo para ganho.

Tabela 45 – Resumo dos valores da diferença absoluta entre a primeira e a última medida de retrorefletividade média e desvio padrão médio de todas campanhas de leituras das películas ensaiadas no Suntest XLS+ e Campo.

(continua)

Cor	Tipologia (NBR 14644)	Diferença absoluta entre a primeira e a última medida média (Campo)	Desvio padrão médio (Campo)	Diferença absoluta entre a primeira e a última medida média (Suntest XLS+)	Desvio padrão médio (Suntest XLS+)
		Retrorefletividade (cd/lx.m <sup>2</sup> )			
Verde	I	-12,00	2,23	-16,00	3,37
	III	-22,33	2,36	-29,67	7,56
	X	-9,00	3,45	-37,67	3,97
Azul	I	-3,67	2,61	-9,00	0,76
	III	-8,67	3,56	-6,33	2,94

Cor	Tipologia (NBR 14644)	Diferença absoluta entre a primeira e a última medida média (Campo)	Desvio padrão médio (Campo)	Diferença absoluta entre a primeira e a última medida média (Suntest XLS+)	(conclusão)
					Desvio padrão médio (Suntest XLS+)
Retrorefletividade (cd/lx.m <sup>2</sup> )					
Azul	X	-12,33	2,38	-38,33	13,42
	I	3,67	1,60	-6,00	2,26
Vermelho	III	-7,33	6,19	24,67	5,59
	X	<b>-3,33</b>	<b>4,09</b>	10,33	5,24
	I	<b>-3,67</b>	<b>14,05</b>	-135,67	9,01
Amarelo	III	<b>-17,67</b>	<b>23,58</b>	-163,33	29,63
	X	-34,00	16,65	-40,33	9,03
	I	-168,00	19,02	-32,00	12,00
Branco	III	-79,67	12,81	-78,67	12,40
	X	-98,33	19,77	-92,00	24,51

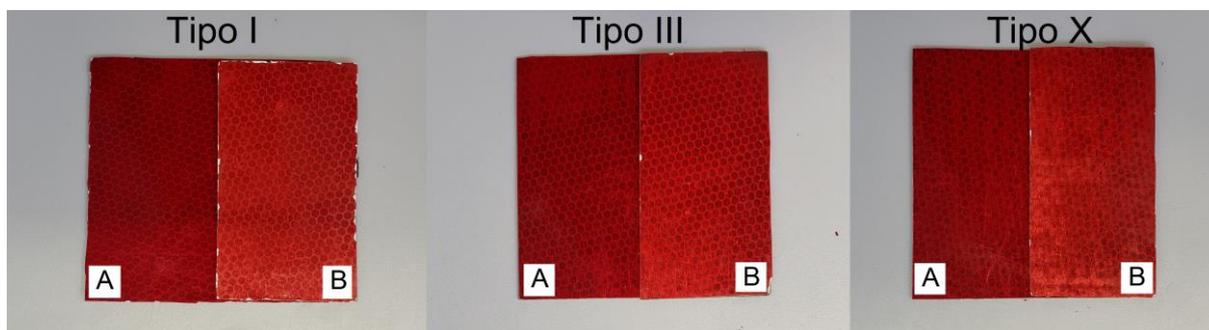
Fonte: Autor.

Quanto a Tabela 45, percebe-se que somente 3 películas, expostas em campo, tiveram a diferença absoluta entre a primeira e última retrorefletividade média dentro do desvio padrão médio das campanhas de leituras, sendo elas vermelho tipo X e amarelo tipo I e III. Com isso, mostra que a maioria das películas apresentaram perdas significativas de retrorefletividade durante os ensaios, tanto para as películas expostas em campo quanto no Suntest XLS+.

Outra investigação observada foi que algumas películas expostas no Suntest XLS+ obtiveram um significativo aumento da retrorefletividade ao longo tempo de ensaio, principalmente a cor vermelha. Acredita-se que isso tenha ocorrido por causa do desbotamento da cor, motivado pela exposição ao ensaio, clareando-a, conseqüentemente, auxiliando no aumento da retrorefletividade, visto que cores mais claras possuem valores de retrorefletividade maior que as escuras.

Para maior veracidade do argumento anterior, fez-se a comparação entre uma película nova e as películas expostas no Suntest XLS+ por 162 dias. A Figura 82 apresenta as películas de cor vermelha para os três tipos de películas ensaiadas, exibindo a película nova (A) e uma película após exposição no Suntest XLS+ (B).

Figura 82 – Confronto entre as películas de cor vermelha novas (A) e as películas ensaiadas no Suntest XLS+ (B) para três os tipos de películas



Percebe-se, pela Figura 82, que, visualmente, a película exposta no Suntest XLS+ (B) apresenta uma cor mais clara do que a película nova (A). Esse fato pode ter sido auxiliado pelo aumento das leituras de retrorrefletividade ao longo do tempo de exposição no equipamento Suntest XLS+.

Da mesma forma, para a análise de correlação entre os valores de temperatura da película e de retrorrefletividade, usou-se a correlação de Pearson ( $r$ ) para o banco de dados do ensaio executado no Suntest XLS+ e da exposição em campo, a fim de verificar se houve correlação entre a radiação acumulada e as medidas de retrorrefletividade (Tabela 46 e Tabela 47).

Tabela 46 – Resumo dos resultados da correlação de Pearson entre as medidas de retrorrefletividade ( $\text{cd/lx.m}^2$ ) e a radiação acumulada ( $\text{kJ/m}^2$ ) para o espectro de onda entre 300-800 nm (Campo)

Cor	Coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ )					
	Tipo I	Correlação*	Tipo III	Correlação*	Tipo X	Correlação*
Vermelho	0,33	Média	0,40	Média	0,25	Pequena
Amarelo	0,05	Nenhuma	-0,23	Pequena	-0,06	Nenhuma
Verde	-0,06	Nenhuma	-0,40	Média	-0,16	Pequena
Branco	-0,32	Média	-0,80	Grande	-0,68	Grande
Azul	0,05	Nenhuma	-0,28	Pequena	-0,63	Grande

\*Conforme Cohen (1988): 0,1 – < 0,3 (Pequeno) 0,3 – < 0,5 (Médio)  $\geq$  0,5 (Grande)

Fonte: Autor.

Tabela 47 – Resumo dos resultados da correlação de Pearson entre as medidas de retrorrefletividade ( $\text{cd/lx.m}^2$ ) e a radiação acumulada ( $\text{kJ/m}^2$ ) para o espectro de onda entre 300-800 nm (Suntest XLS+)

Cor	Coeficiente de correlação de Pearson (r)					
	Tipo I	Correlação*	Tipo III	Correlação*	Tipo X	Correlação*
Vermelho	-0,01	Nenhuma	0,87	Grande	0,62	Grande
Amarelo	-0,86	Grande	-0,94	Grande	-0,29	Pequena
Verde	-0,74	Grande	0,87	Grande	-0,87	Grande
Branco	-0,34	Média	-0,89	Grande	-0,80	Grande
Azul	-0,79	Grande	-0,82	Grande	-0,91	Grande

\*Conforme Cohen (1988): 0,1 – < 0,3 (Pequeno) 0,3 – < 0,5 (Médio)  $\geq$  0,5 (Grande)

Fonte: Autor.

Quanto aos resultados da correlação de Pearson encontrados entre as medidas de retrorrefletividade e a radiação acumulada do espectro do comprimento de onda de 300-800 nm (Tabela 46 e Tabela 47), mostrou-se que as correlações encontradas para as películas expostas às intempéries ambientais foram bastante variáveis. As películas expostas ao ambiente, segundo Cohen (1988), tiveram 4 películas com nenhuma, 4 com média, 4 com pequena e 3 com grande correção. Entretanto, para as películas ensaiadas no Suntest XLS+, houve 1 com nenhuma, 1 com pequena, 1 com média e 12 com grande correlação. Essa diferença na qualificação das correlações pode estar atrelado ao nível de energia que as películas recebem nos distintos ensaios, visto que as películas ensaiadas no Suntest XLS+ tiveram, em aproximadamente 162 dias, a radiação acumulada semelhante à observada em 3 anos em Santa Maria/RS. Isso possivelmente fez com que as películas expostas no Suntest XLS+ apresentassem um envelhecimento distinto ao verificado em campo.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresenta-se, neste capítulo, as conclusões dos resultados obtidos na pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

### 5.1 CONCLUSÕES

A pesquisa objetivou investigar o comportamento de diferentes cores e tipos de películas retrorrefletivas em relação à perda de desempenho ao longo do tempo. Com base no objetivo geral e nos objetivos específicos e após apresentar os resultados e as análises, foi possível concluir que:

- a) Verificou-se, com auxílio da ferramenta estatística análise de variância (ANOVA), para os fatores como cor, tipo de película retrorrefletiva e limpeza regular, que apenas o fator de limpeza regular apresentou uma perda estatisticamente significativa quanto ao desempenho retrorrefletivo dos dados ao longo de 75 meses (6,27 anos) de monitoramento.
- b) Com base nos modelos preditivos lineares gerados neste estudo para o segmento experimental, à média de redução da retrorrefletividade anual sobre a medida inicial dos modelos com e sem limpeza foi determinado que as películas sem limpeza tiveram, em média, cerca de 7 vezes mais perda de retrorrefletância anual, do que as leituras com limpeza, onde os modelos com limpeza e sem limpeza obtiveram em média perdas de 1,28% e 7,14% sobre o valor inicial, respectivamente.
- c) Quanto ao tempo estipulado de limpeza com periodicidade bimestral, mostrou-se ser um intervalo curto para limpeza das películas avaliadas no segmento experimental, posto que as películas que não recebiam limpeza começaram a apresentar valores significativamente inferiores aos dos pares de películas semelhantes com limpeza em um período de 1 a 2 anos após a implantação, indicando períodos de limpeza superior ao deste estudo, como semestralmente ou maior.
- d) Sobre os modelos de previsão de retrorrefletividade ao longo do tempo encontrados na literatura – quando o decréscimo de retrorrefletividade anual em relação a medida de retrorrefletividade inicial dos modelos vistos na literatura internacional é confrontado com os gerados neste estudo –, não

houve tendência única do valor de perda entre eles. Todavia, 75% dos modelos comparados apresentaram uma perda de retrorefletividade anual entre 0 e 0,05 quanto ao valor inicial de retrorefletividade estipulado de 1.

- e) No que diz respeito à análise sobre o tempo que os modelos preditivos apresentam medidas de retrofletividade abaixo dos parâmetros mínimos finais aceitos no Brasil e Estados Unidos da América, constatou-se que:
- a. Para os parâmetros mínimos finais aceitos no Brasil, dos 64 modelos avaliados, a maior quantidade de modelos falhou entre 0 e 15 anos de atividade, ou seja, cerca de 65,6%. A maior quantidade de modelos exibiu falha entre os intervalos de 5 a 10 anos (32,8%) e de 10 a 15 anos (25%);
  - b. Para os parâmetros mínimos finais aceitos no Estados Unidos da América, dos 59 modelos avaliados, a maior frequência de falha ocorreu no intervalo de 5 a 20 anos, aproximadamente 55,9%. A maior quantidade de modelos exibiu falha entre os intervalos de 10 a 15 anos (23,7%) e de 15 a 20 anos (18,6%).
  - c. Para a avaliação somente dos modelos gerados neste estudo: mostrou distinção significativa dos anos de falhas dos modelos com e sem limpeza, posto que películas que não receberam limpeza apresentaram falha antes dos 15 anos e 20 anos para os requisitos mínimos finais aceitos no Brasil e Estados Unidos da América; e os modelos que receberam limpeza bimestral exibiram anos de falha acima de 20 anos para os brasileiros e 35 anos para os norte-americanos, exibindo diferenças entre os anos de falha entre os modelos com e sem limpeza para as películas semelhantes acima de 15 anos.
- f) Quanto à influência da precipitação pluviométrica sobre as medidas de retrorefletividade, acreditava-se que a ação da chuva sobre as películas retrorefletivas auxiliaria na limpeza das películas e que, conseqüentemente, haveria uma elevação das medidas de retrorefletividade. Contudo, com base nos resultados das leituras feitas no segmento experimental antes e depois da chuva, não houve uma influência significativa desse parâmetro meteorológico.

- g) Quanto à influência da temperatura da película sobre as medidas de retrorrefletividade, a variação de temperatura da película mostrou-se haver influência significativa nos valores de retrorrefletividade, no qual observou-se uma maior correlação com a variação da retrorrefletividade ao longo do dia. Notou-se, em um dia de monitoramento, uma mudança de 25°C da temperatura da película, o que levou a uma variação das películas tipo I e X de cerca de 20% da medida de retrorrefletividade, ao passo que a tipo III variou cerca de 40%. Destaca-se, ainda, a importância de estabelecer condições para avaliação da retrorrefletividade para que não haja métodos para beneficiar-se da ação da temperatura sobre a mudança das leituras de retrorrefletividade.
- h) Verificou-se que, motivado pelo efeito do orvalho sobre as películas retrorrefletivas, foi reduzido, em média, cerca de 71% do valor de retrorrefletividade em relação à medida sem influência do orvalho, em consequência disso, todas as 24 películas analisadas apresentaram valores abaixo dos parâmetro mínimos finais da 3ª e 4ª etapa de concessões da ANTT. Isso mostra o interesse de evitar a avaliação da retrorrefletividade em horários que haja a ocorrência do fenômeno ou desenvolver produtos ou métodos que inibam o efeito do orvalho sobre as películas retrorrefletivas, como dissipadores de calor ou outras tecnologias.
- i) Quanto às películas condicionadas na câmara úmida, as películas estudadas apresentaram uma diminuição anual de 11,85% para o tipo III e 10,26% para o tipo X, num período de 4,47 anos de condicionamento, em relação à medida inicial. A redução da retrorrefletividade se mostrou motivada pela infiltração de umidade no interior do material, sendo observada uma absorção dos cantos da película em direção ao centro. Além disso, confrontando com as médias de perda anual de retrorrefletividade das películas com limpeza (1,28%) e sem limpeza (7,14%) no o segmento experimental, nota-se uma superioridade de perda retrorrefletiva quanto a essas comparações, apontando que existe uma maior danificação do material em ambientes com alta porcentagem de umidade.
- j) No que concerne aos ensaios das películas expostas no Suntest XLS+ e ao ambiente, os resultados de retrorrefletividade medidos para uma mesma cor e tipo de película não apresentaram uma correlação significativa entre os

dois ensaios em relação ao desempenho retrorrefletivo. Já ao avaliar somente a correlação entre as variáveis, retrorrefletividade e radiação acumulada (300-800nm), as películas ensaiadas no Suntest XLS+ apresentaram maiores correlações entre as duas variáveis quando comparadas com as películas ensaiadas em campo. As películas expostas ao ambiente, segundo Cohen (1988), tiveram 4 películas com nenhuma, 4 com média, 4 com pequena e 3 com grande correção, e para as películas ensaiadas no Suntest XLS+, houve 1 com nenhuma, 1 com pequena, 1 com média e 12 com grande correlação, apontando que a radiação acumulada de 300-800nm foi muito mais significativa no desempenho retrorrefletivo no aparelho de aceleração artificial Suntest XLS+ do que observada em campo.

- k) Observou-se a ação do desbotamento da cor em algumas películas analisadas ao longo da pesquisa, que em função disso houve mudanças dos valores de retrorrefletividade ao longo dos ensaios, como por exemplo as ensaiadas no Suntest XLS+, sendo essas mais perceptíveis. Verificou-se que algumas cores, como por exemplo as películas de cor vermelha, apresentaram uma tonalidade mais esbranquiçada de sua tonalidade, que, em consequência disso, as películas começaram a apresentar um aumento dos valores de retrorrefletividade. Entretanto, não se notou esse mesmo resultado para todos os padrões de cores analisados podendo, assim, apresentar distintas tendências dos valores de retrorrefletividade, mas que esse fato demandam um maior estudo sobre.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com intuito de complementação e continuidade deste estudo, sugere-se os seguintes trabalhos:

- a) Dar continuidade ao monitoramento dos valores de retrorrefletividade do segmento experimental, a fim de ampliar a base de dados com idades mais avançadas e assim aperfeiçoar os modelos de previsão já encontrados;
- b) Realizar, com amostras de mesma cor e tipo de película, uma exposição ao aparelho de envelhecimento artificial (Suntest XLS+) com as mesmas configurações utilizadas neste estudo para verificar se o comportamento frente

exposição é igual para todos os modelos semelhantes;

- c) Desenvolvimento de uma maneira em que ensaiasse duas películas retrorrefletivas em que uma delas sejam expostas ao ambiente e outra em que inibisse somente a precipitação pluviométrica para verificar se a longo prazo há alguma mudança da retrorrefletividade para uma película que nunca teve influência da precipitação pluviométrica e outra não;
- d) Realizar a limpeza das películas em diferentes intervalos de tempo com objetivo de examinar o período de limpeza mais eficiente para películas de sinalização vertical.
- e) Implementar diferentes segmentos experimentais por distintos locais no Brasil para analisar o comportamento das películas retrorrefletivas em diferentes geografias nacionais.
- f) Desenvolver produtos que mitiguem ou anulem o efeito que o orvalho tem sobre as medidas de retrorrefletividade das películas empregadas em sinalização vertical, já que foi observado nesta pesquisa que o efeito do orvalho reduz consideravelmente esses valores.

## REFERÊNCIAS

3M. **O que afeta o desempenho das placas de trânsito?** Disponível em: <[https://www.3m.com.br/3M/pt\\_BR/213inalizaçãoo/3mmobiliza/detalhesdoartigo/~desempenho-placas/?storyid=790121f5-7b34-4<sup>a</sup>1d-b39b-5491b7595ddf](https://www.3m.com.br/3M/pt_BR/213inalizaçãoo/3mmobiliza/detalhesdoartigo/~desempenho-placas/?storyid=790121f5-7b34-4<sup>a</sup>1d-b39b-5491b7595ddf)> Acesso em: 22 de abril. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. **Programa de exploração de rodovias.** 2014.

\_\_\_\_\_. **PROGRAMA DE EXPLORAÇÃO DA RODOVIA (PER) – Viasul (Grupo CCR).** 2018.

AGUDO, J. et al. **A low-cost real color picker based on arduino.** Sensors, v. 14, n. 7, p. 11943-11956, 2014.

AI, C.; TSAI, Y. J. **An automated sign retroreflectivity condition evaluation methodology using mobile LIDAR and computer vision.** Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 63, p. 96-113, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9479:** Argamassa e concreto-Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 14644:** Sinalização vertical viária – Películas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 14891:** Sinalização vertical viária – Placas. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 15426:** Sinalização vertical viária – Método de medição da retrorrefletividade utilizando retrorrefletômetro portátil. Rio de Janeiro, 2013.

AS/NZS 1906.1: **Retroreflective materials and devices for road traffic control purposes, Part 1: Retroreflective sheeting.** 2007

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4956-19:** Standard Specification for Retroreflective Sheeting for Traffic Control, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

\_\_\_\_\_. **E808:** Standard Practice to Describing Retroreflection ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.

\_\_\_\_\_. **E810:** Test Method for Coeficients of Retroreflection for Retroreflective Sheeting utilizing Coplanar. ASTM International, West Conshohocken, 2005.

\_\_\_\_\_. **E1709-16e1:** Standard Test Method for Measurement of Retroreflective Signs Using a Portable Retroreflectometer at a 0.2 Degree Observation Angle, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

\_\_\_\_\_. **E2540-16:** Standard Test Method for Measurement of Retroreflective Signs

Using a Portable Retroreflectometer at a 0.5 Degree Observation Angle, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

\_\_\_\_\_. **G7M-13: Standard Practice for Atmospheric Environmental Exposure Testing of Nonmetallic Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ATLAS. **Fundamentals of Wethering: Part 1 – Factors of Weathering**. Atlas Online Seminar. 9 feb. 2017.

AUSTIN, R. L.; SCHULTZ, R. J. **Guide to Retroreflection Safety Principles and Retrroreflective Measurements**. Gamma Scientific, 2002.

BELISLE, L. C.; BORDEN, T. R.; GRUNZINGER JR, Raymond E. **Retroreflective sheeting**. U.S. Patent n. 4,721,649, 26 jan. 1988.

BISCHOFF, A. L.; BULLOCK, D. M. **Sign retroreflectivity study**. 2002. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2002.

BLACK, K. L. et al. **Service life of retroreflective traffic signs**. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., 1991.

BRASIL. **Código de Trânsito Brasileiro: – CTB, Anexo I – Dos Conceitos e Definições**. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997

BRIMLEY, Bradford; CARLSON, Paul J. **The current state of research on the long-term deterioration of traffic signs**. In: Transportation Research Board 92nd Annual Meeting. 2013.

CARLSON, P. J.; HAWKINS, H. G. (2002). **Minimum Retroreflectivity for Overhead Guide Signs and Street Name Signs**. Transportation Research Record n. 1794, p. 38 – 48.

CARLSON, P. J. et al. **Developing updated minimum in-service retroreflectivity levels for traffic signs**. Transportation research record, v. 1824, n. 1, p. 133-143, 2003.

CARLSON, P. J. et al. **Research and recommendations for a statewide sign retroreflectivity maintenance program**. Texas Department of Transportation, Austin, Texas, 2012.

CARLSON, P. J. et al. **Guidelines for Nighttime Visibility of Overhead Signs**. 2016. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, DC: The National Academies, 2016.

CIE 085-1989. **Solar spectral irradiance**. ISBN 978 3 900734 22 0; 1989.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. Lawrence Erlbaum Associates, Inc. Mahwah, NJ, 1988.

COLE, S. **How glass bead and micro-prismatic reflective tape are made**. In: Reflective Inc. 11 jan. 2016. Disponível em <<https://reflectivetape.info/how-is-reflective-tape-made-glass-bead-and-micro-prismatic/>> Acesso em: 22 fev. 2019.

COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO (CEN). **EN 12899-1: Fixed, vertical road traffic signs - Part 1: Fixed signs**, 2007.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume I, Sinalização Vertical de Regulamentação**. Contran-Denatran. 2ª edição – Brasília: Contran, 2007a. 220 p.

\_\_\_\_\_. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume II, Sinalização vertical de advertência**. Contran-Denatran. 1ª edição – Brasília: Contran, 2007b. 218 p.

\_\_\_\_\_. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume III, Sinalização vertical de indicação**. Contran-Denatran. 1ª edição – Brasília: Contran, 2014a. 343 p.

\_\_\_\_\_. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume IV, Sinalização horizontal**. Contran-Denatran. 1ª edição – Brasília: Contran, 2007c. 128 p.

\_\_\_\_\_. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume V, Sinalização semaforica**. Contran-Denatran. 1ª edição – Brasília: Contran, 2014b. 312 p.

\_\_\_\_\_. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume VI, Sinalização temporária**. Contran-Denatran. 1ª edição – Brasília: Contran, 2017. 215 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Painel CNT de Consultas Dinâmicas dos Acidentes Rodoviários**. Brasília, 2020.

\_\_\_\_\_. **Acidentes Rodoviários e a Infraestrutura**. Brasília, 2018.

COSTA, M. et al. **Looking behavior for vertical road signs**. Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, v. 23, p. 147-155, 2014. 412 p.

CREDER, H. **Instalações Elétricas**. 15º. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, Editora SA, 2010.

DELTA. Danish Electronics, Light & Acoustics. **User's manual: Retrosign retroreflectometer GR1/GR3**. Venlighedsvej 4, Hørsholm. Denmark. 15 ago. 2012.

DELTA. Danish Electronics, Light & Acoustics. **User's manual: RetroSign GRX Retroreflectometer**. Venlighedsvej 4, Hørsholm. Denmark. 10 jul. 2018.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (DERSP). **Manual de Sinalização rodoviária – Volume III: Obras, serviços de conservação e emergência**. São Paulo: Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo, 2006. 215 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Manual de Sinalização Rodoviária**. 3.ed. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. Guia Prático – Programa Nacional de Segurança e Sinalização Rodoviária – BR-LEGAL – Versão 1.0 – janeiro de 2015.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). **Manual on uniform traffic control devices: For streets and highways**. Washington, DC, 2009.

\_\_\_\_\_. **Training for Conducting Visual Sign Retroreflectivity Inspections and Measuring Retroreflectivity of Traffic Signs**. 2019.

FERREIRA, J. C.; PATINO, C. M. **O que realmente significa o valor-p?**. Jornal Brasileiro de Pneumologia, v. 41, n. 5, p. 485-485, 2015.

FUJII, W. Y. **Análise da Relação entre a Observância aos Padrões de Projeto de Sinalização e a Ocorrência de Acidentes de Trânsito em Rodovias** – Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo USP, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, Brasil, 2004. 242 p.

FUJII, W. Y. **Avaliação do desempenho dos elementos de sinalização viária em rodovias**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, SP, 2017. 169p.

GARCIA, P. **Avaliação da retrorrefletividade de películas aplicadas à sinalização viária**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia a Civil)– Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

GIL, E. M. **Vias romanas de la provincia de Córdoba**: Enrique Melchor Gil. Publicaciones Obra Social y Cultural Cajasur, 1995.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>> Acesso em: 05 nov. 2018

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER J. **Fundamentos de física, volume 4: óptica e física moderna**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 416 p.

HAWKINS, H. G.; CARLSON, P. J. **Sign retroreflectivity: Comparing results of nighttime visual inspections with application of minimum retroreflectivity values**. Transportation research record, v. 1754, n. 1, p. 11-20, 2001.

HILDEBRAND, E. D. **Reductions in traffic sign retroreflectivity caused by frost and dew**. Transportation research record, v. 1844, n. 1, p. 79-84, 2003.

JENKINS, S. E.; GENNAOUI, F. R. **National survey of the photometric performance of retroreflective traffic signs**. Municipal Engineering in Australia, v. 17, n. 5, 1990.

KANG, B.; YONG, B.; PARK, K. **Performance evaluations of LED headlamps**. International journal of automotive technology, v. 11, n. 5, p. 737-742, 2010.

KHALILIKHAH, M.; HEASLIP, K.; SONG, Z. **Can daytime digital imaging be used for traffic sign retroreflectivity compliance?** *Measurement*, v. 75, p. 147-160, 2015.

KIPP, W. M. E.; FITCH, J. M. V. **Evaluation of measuring methods for traffic sign retroreflectivity.** Vermont Agency of Transportation, Montpelier, VT, 2009.

KHRAPOVA, M. **Determining the influence of factors on retroreflective properties of traffic signs.** Czech University of Life Sciences Prague (CULS), Faculty of Engineering, Department of Vehicles and Ground Transport, 2019.

LAIGNIER, P.; FORTES, R. (Ed.). **Introdução à história da comunicação.** Editora E-papers, 2009.

MACE, D. J.; PERCHONOK K.; POLLACK L. E. **Traffic Signs in Complex Visual Environments.** FHWA-RD-82-102. FHWA, U.S. Department of Transportation, 1982.

MACE, D. J.; KING R. B.; DAUBER G. W. **Sign Luminance Requirements for Various Background Complexities.** FHWA-RD-85-056. FHWA, U.S. Department of Transportation, 1985.

MACE, D. J.; HOSTETTER R. S.; POLLACK L. E.; ZWEIG W. D. **Minimal Luminance Requirements for Official Highway Signs.** FHWA-RD-86-151. FHWA, U.S. Department of Transportation, 1986.

MARTINS, M. R. **Avaliação da retrorrefletividade de películas aplicadas à sinalização viária.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

MCGEE, H. W., MACE D. J. **Retroreflectivity of Roadway Signs for Adequate Visibility: A Guide.** FHWA-DF-88-001. FHWA, U.S. Department of Transportation, 1988.

MCGEE, H. W. et al. **Maintenance of signs and sign supports: a guide for local highway and street maintenance personnel.** VHB/Vanasse Hangen Brustlin, Inc., 2010.

MCGREER, Matthew. **Weathering testing guidebook.** Chicago, USA: Atlas Electric Devices Company, 2003.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Disponível em: <<http://portalms.saude.gov.br/noticias/agencia-saude/43593-10-anos-de-lei-seca-obitos-por-acidentes-de-transito-diminuem-2>>. Acesso em: 19 dez. 2018.

NOVICKI, J. M.; MARTINEZ, R. **LEDs para iluminação pública.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2008.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica, 4: ótica, relatividade, física quântica.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2014. 359 p.

ORAFOL. **Retroreflective Materials**. Disponível em: <<https://www.orafol.com/en/americas/products/reflective-solutions/technology>>. Acesso em: 23 de fevereiro. 2020.

PAULINO, C. D. et al. **Glossário Inglês-Português de Estatística**. Glossário Inglês-Português de Estatística. 2ª ed. Sociedade Portuguesa de Estatística e Associação Brasileira de Estatística. 2011.

PATINO, Cecilia Maria; FERREIRA, Juliana Carvalho. **Intervalos de confiança: uma ferramenta útil para estimar o tamanho do efeito no mundo real**. *Jornal brasileiro de Pneumologia*, São Paulo, v. 41, n. 6, p. 565-566, Dec. 2015.

PRICONE, R. M.; ROBERTS, William N.; ZANOTTI, Richard. **Retroreflective sheeting and methods for making same**. U.S. Patent n. 4,618,518, 21 out. 1986.

RASDORF, William J. et al. **Designing an efficient nighttime sign inspection procedure to ensure motorist safety**. North Carolina Department of Transportation, Raleigh, North Carolina, 2006.

SENIORDRIVING.AAA; American Automobile Association Inc. **Light Requirements**. Disponível em <<https://seniordriving.aaa.com/understanding-mind-body-changes/vision/light-requirements/>> Acesso em: 29 de mar. 2019.

SHCUKANEC, Andjelko; BABIC, Dario; SOKOL, Hrvoje. **Methodology for measuring traffic signs retroreflection**. *European Scientific Journal*, ESJ, v. 10, n. 7, 2014.

SILVA, M. A. R. **Avaliação da influência da precipitação na retrorrefletividade de películas aplicadas à sinalização viária**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

TAORI, S.; MCGEE, H. W. (1998). **Impacts of Maintaining Traffic Signs Within Minimum Retroreflectivity Guidelines**. *Transportation Research Record* n. 1650, p. 19 – 27.

TEIXEIRA, J. A. **Revisão da Sinalização Vertical de Orientação, nos eixos rodoviários, do Município de Câmara de Lobos: Relatório de Estágio na Associação Insular de Geografia**. Dissertação (Mestrado em Riscos, Cidades e Ordenamento do Território)–Universidade do Porto, Porto, 2017.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros. Vol. 2: eletricidade e magnetismo, óptica**. Grupo Gen-LTC, 2000.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física IV: Sears e Zemansky's: ótica e física moderna**. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016. 531 p.

WOLSHON, B.; DEGEYTER, R.; SWARGAM, J.. **Analysis and predictive modeling of road sign retroreflectivity performance**. In: 16th Biennial Symposium on Visibility

and Simulation Transportation Research Board; University of Iowa, Center for Computer Aided Design, Operator Performance Laboratory. 2002.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Global status report on road safety 2018**. Geneva: World Health Organization; 2018.

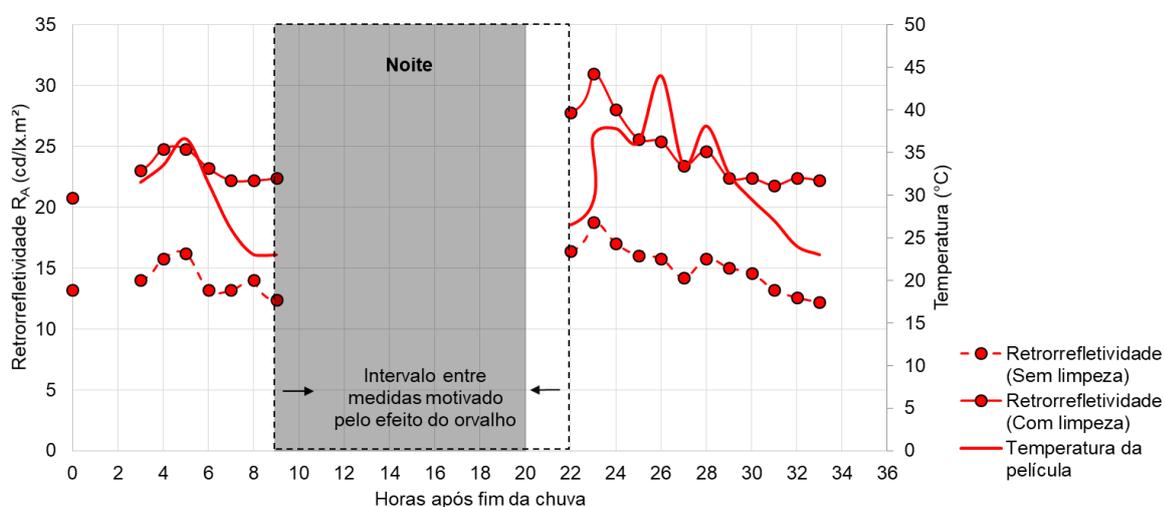
WRIGHT, W. D. **Professor Wright's Paper from the Golden Jubilee Book: The historical and experimental background to the 1931 CIE system of colorimetry**. Colorimetry: Understanding the CIE System, p. 9-23, 2007.

XU, Z.; GUAN, H.; YAN, H. **Incorporating Saliency Map into Prediction of Drivers' Eye Fixations on Traffic Signs**. In: 11th International Conference of Chinese Transportation Professionals (ICCTP) American Society of Civil Engineers National Natural Science Foundation of China. 2011.

## APÊNDICE A – RESULTADOS DE RETRORREFLETIVIDADE DAS “DATA 1”, “DATA 2” E “DATA3”

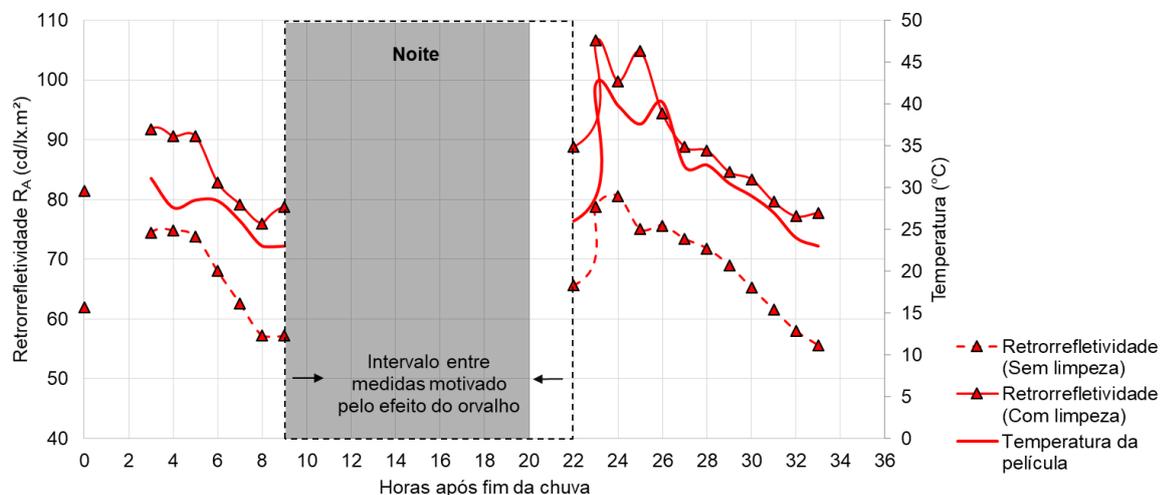
Da Figura 83 à Figura 109, são apresentados os dados de retrorrefletividade média obtidos para a “Data 1”, “Data 2” e para a “Data 3” da cor vermelha, verde e branco, expondo, em conjunto, os valores de temperatura da película.

Figura 83 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor vermelho tipo I no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019)



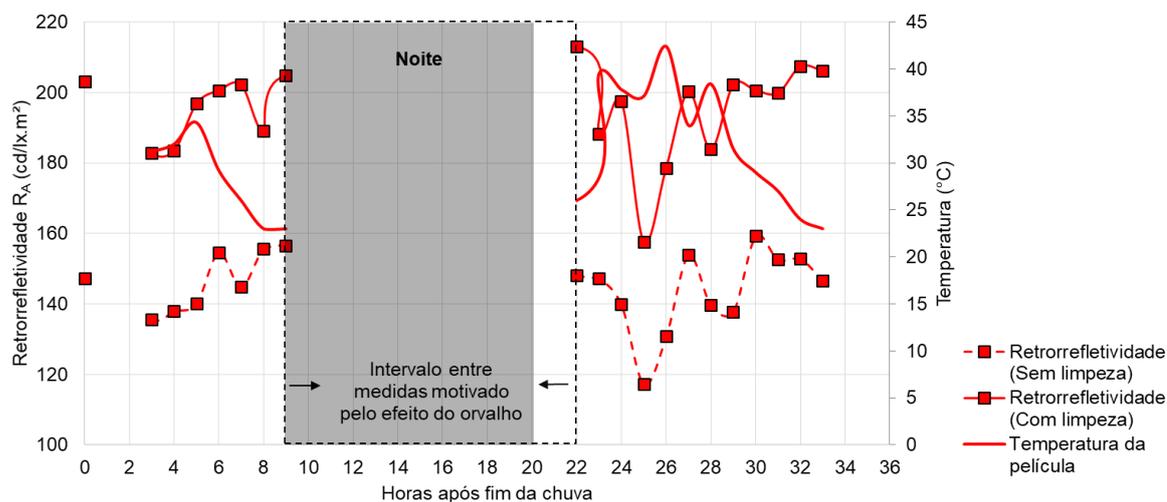
Fonte: Autor.

Figura 84 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor vermelho tipo III no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019)



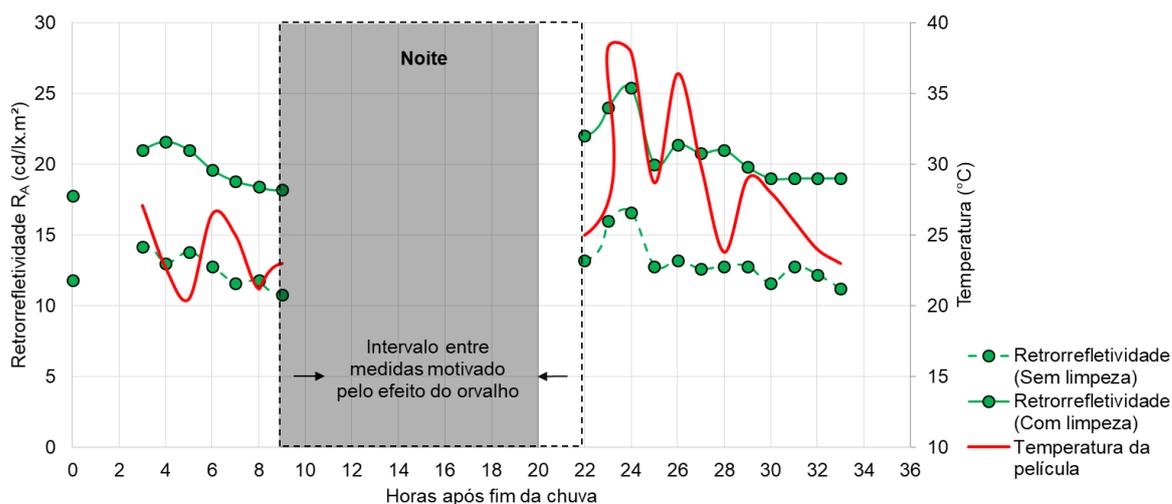
Fonte: Autor.

Figura 85 - Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor vermelho tipo X no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019)



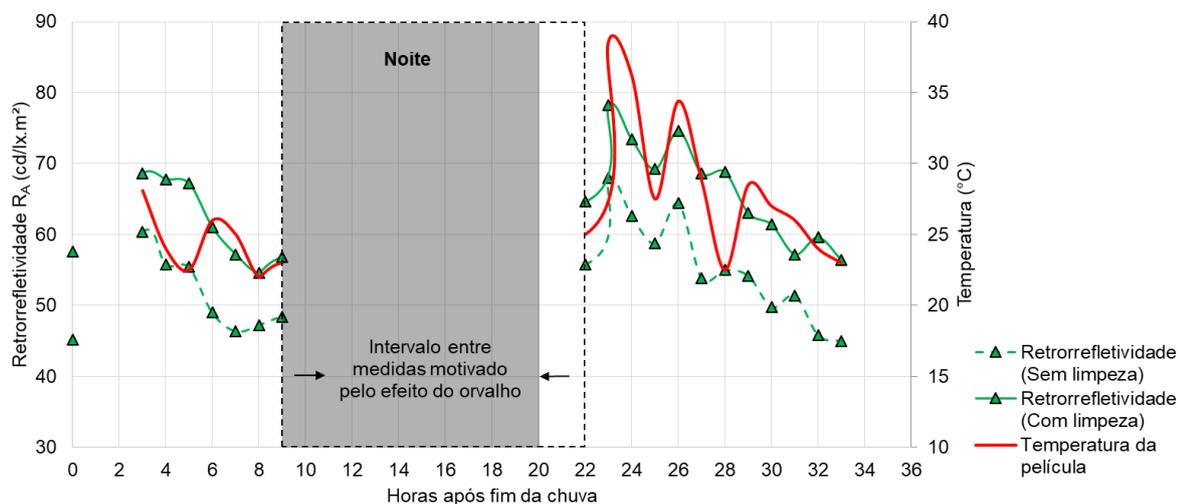
Fonte: Autor.

Figura 86 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor verde tipo I no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019)



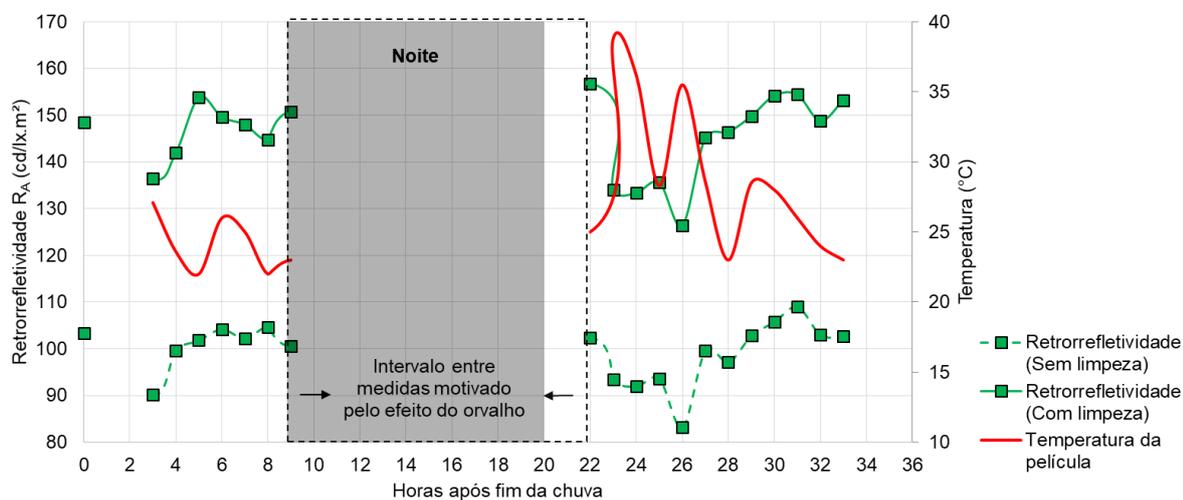
Fonte: Autor.

Figura 87 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor verde tipo III no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019)



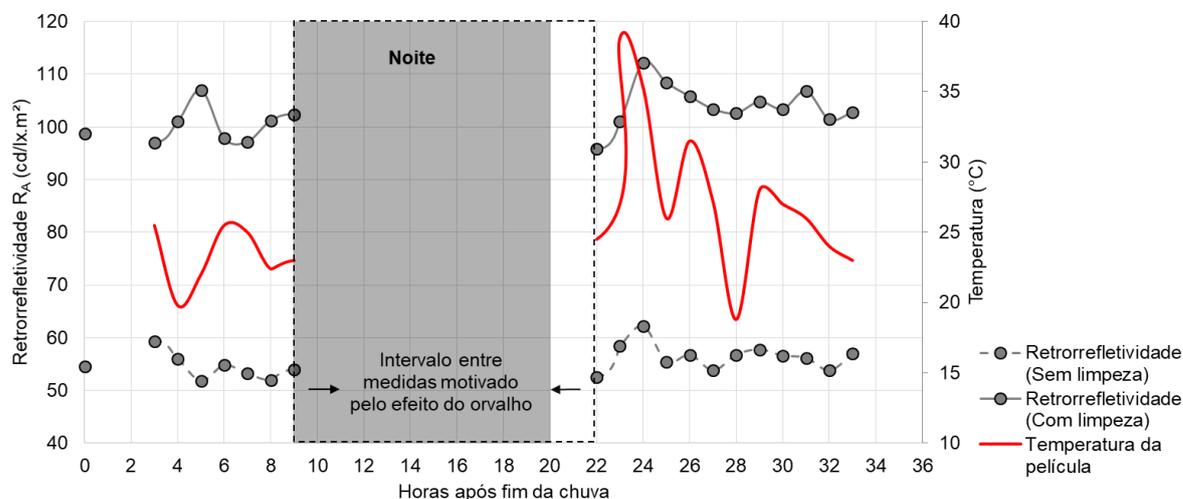
Fonte: Autor.

Figura 88 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor verde tipo X no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019)



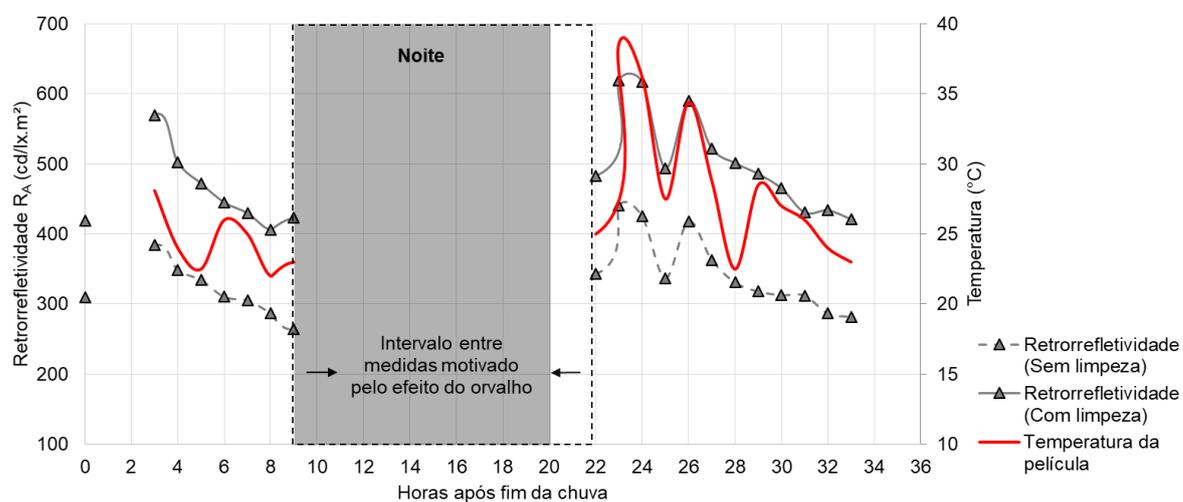
Fonte: Autor.

Figura 89 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor branco tipo I no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019)



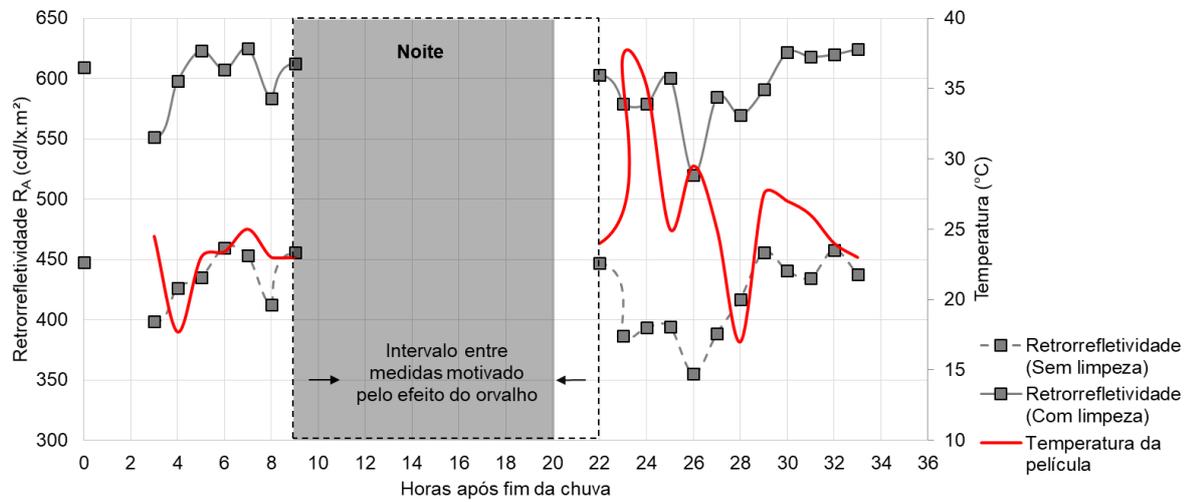
Fonte: Autor.

Figura 90 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor branco tipo III no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019)



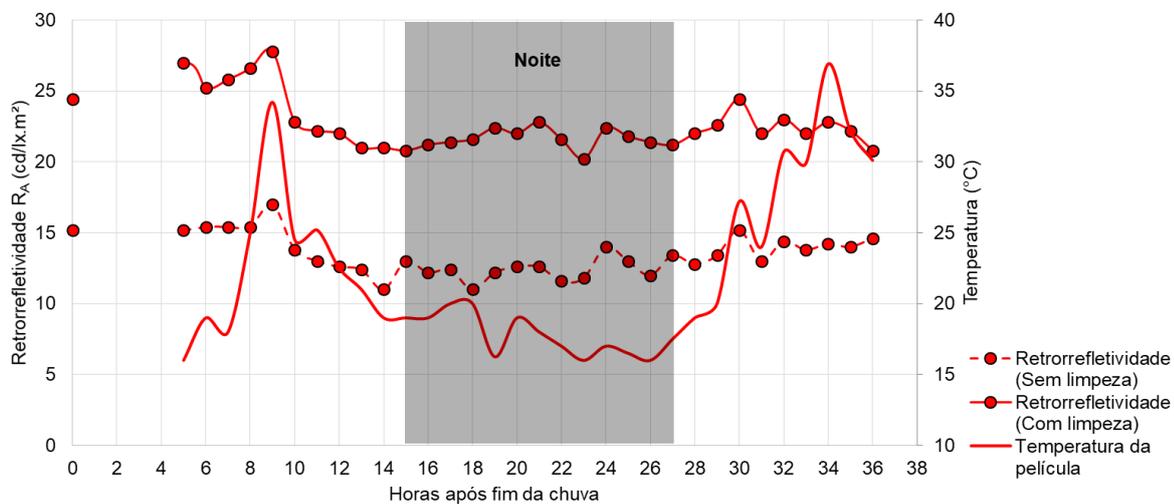
Fonte: Autor.

Figura 91 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor branco tipo X no segmento de Santa Maria/RS (Data 1: 16/03/2019)



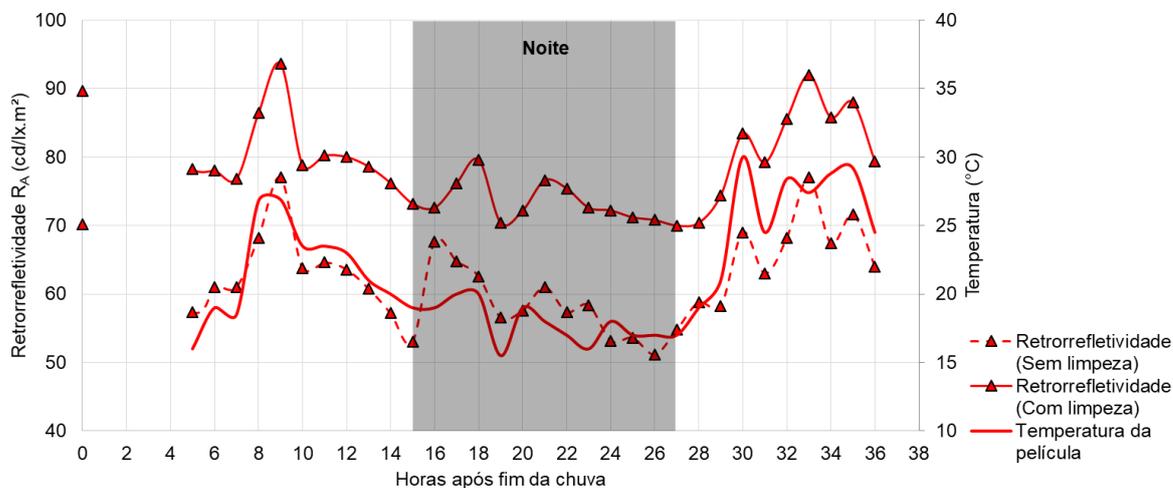
Fonte: Autor.

Figura 92 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor vermelho tipo I no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019)



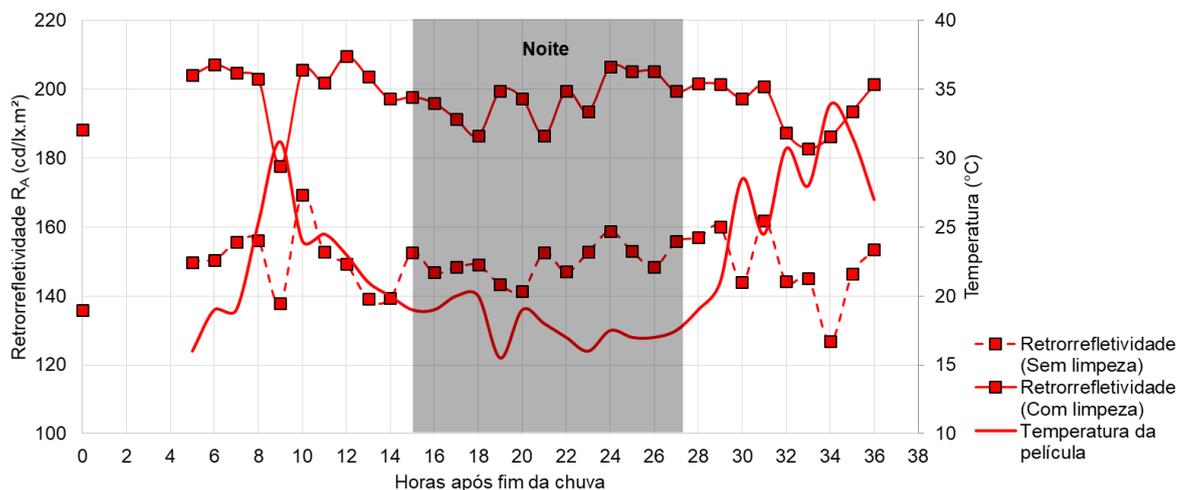
Fonte: Autor.

Figura 93 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor vermelho tipo III no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019)



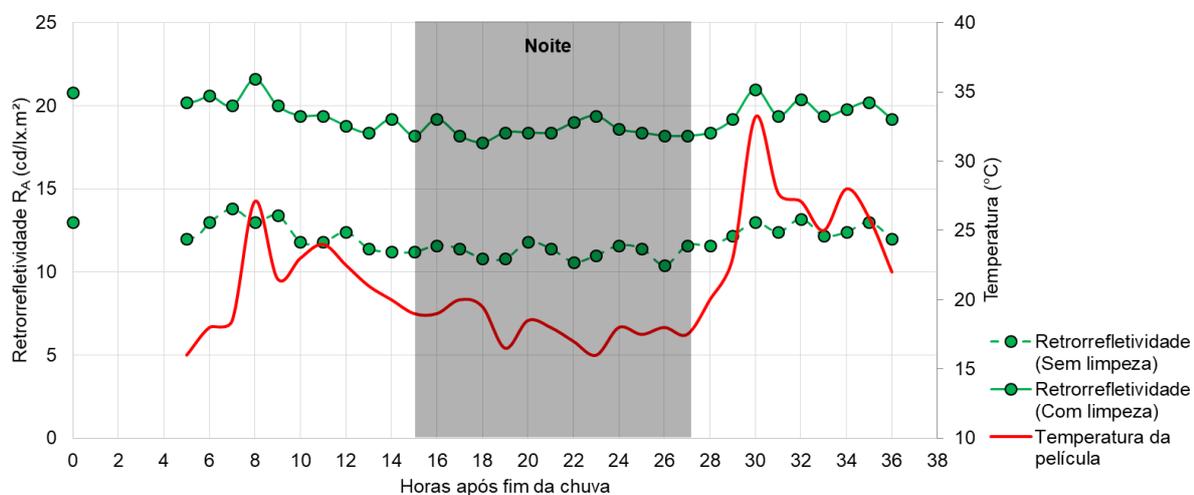
Fonte: Autor.

Figura 94 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor vermelho tipo X no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019)



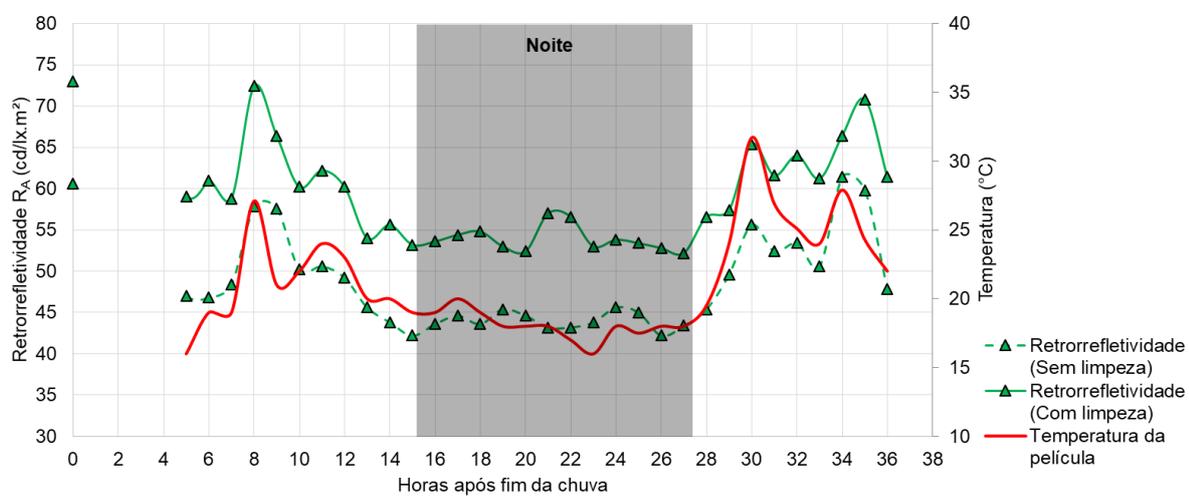
Fonte: Autor.

Figura 95 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor verde tipo I no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019)



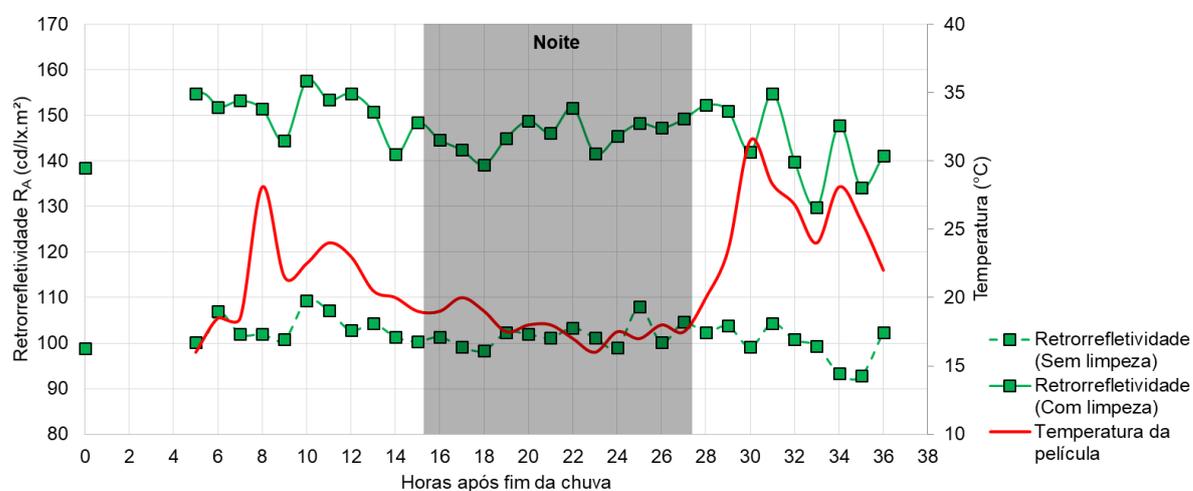
Fonte: Autor.

Figura 96 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor verde tipo III no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019)



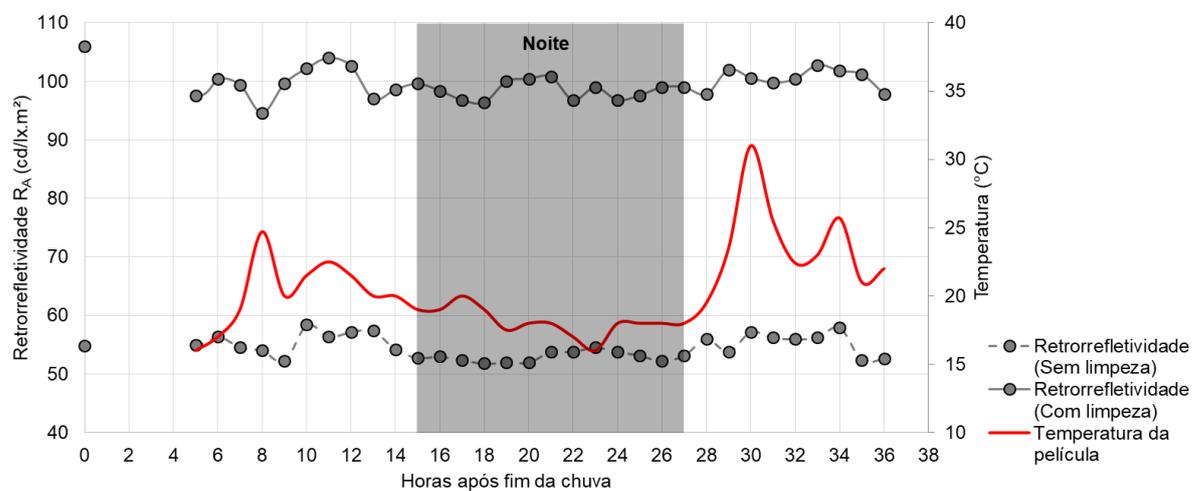
Fonte: Autor.

Figura 97 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor verde tipo X no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019)



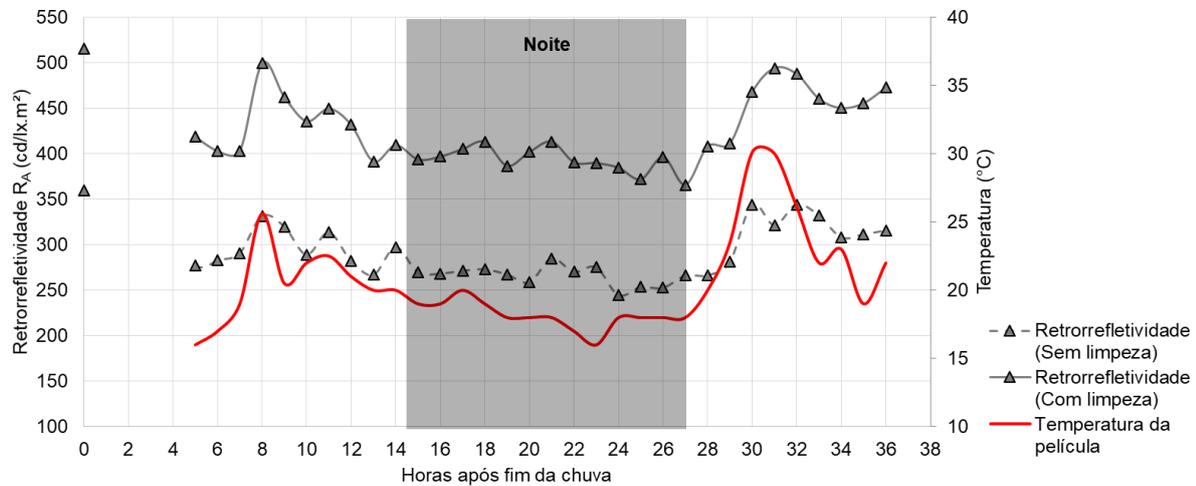
Fonte: Autor.

Figura 98 – Medidas de retrorrefletividade média em relação à precipitação da película de cor branco tipo I no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019)



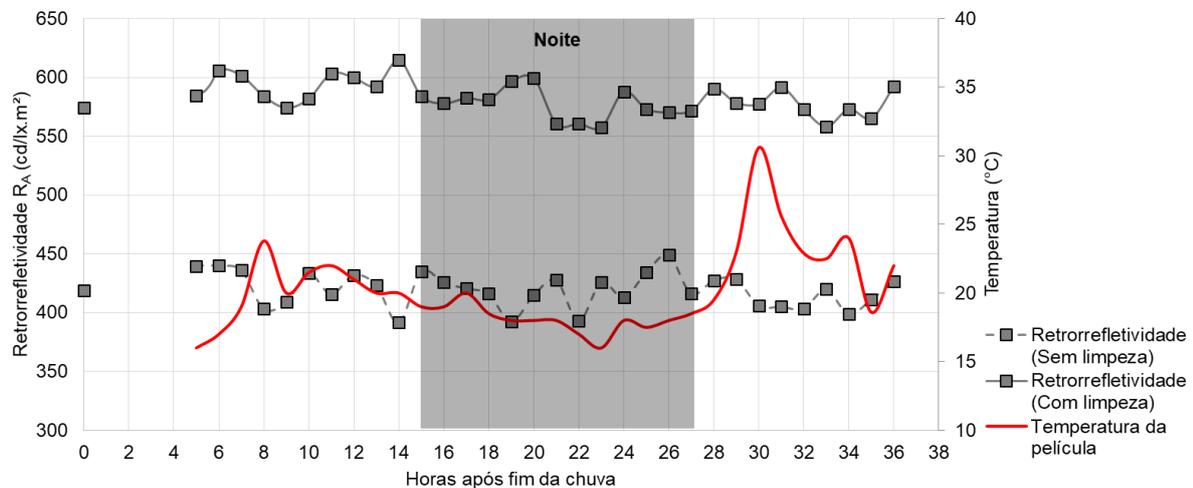
Fonte: Autor.

Figura 99 – Medidas de retrorefletividade média em relação à precipitação da película de cor branco tipo III no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019)



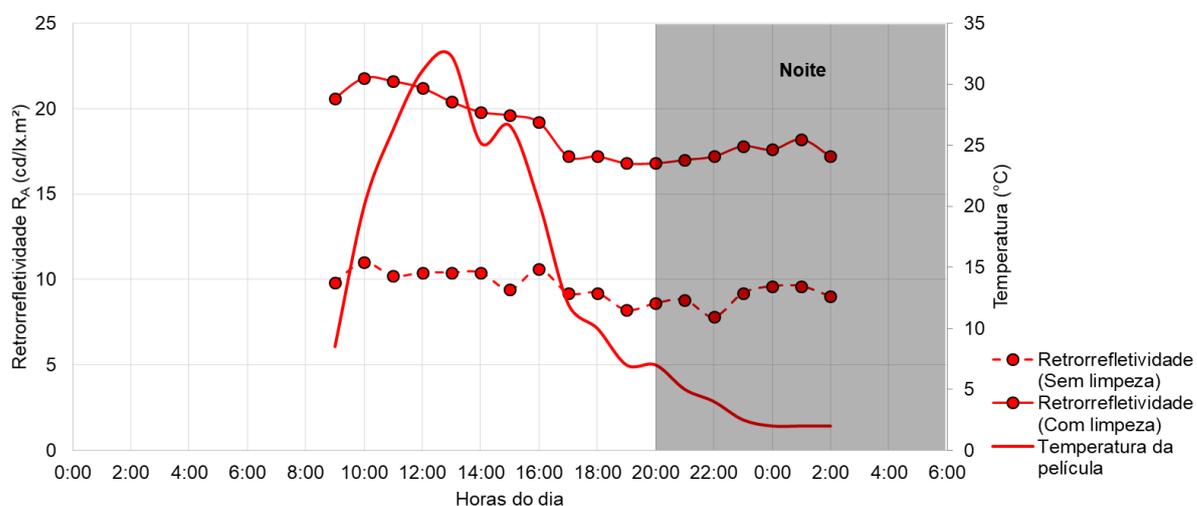
Fonte: Autor.

Figura 100 – Medidas de retrorefletividade média em relação à precipitação da película de cor branco tipo III no segmento de Santa Maria/RS (Data 2: 04/04/2019)



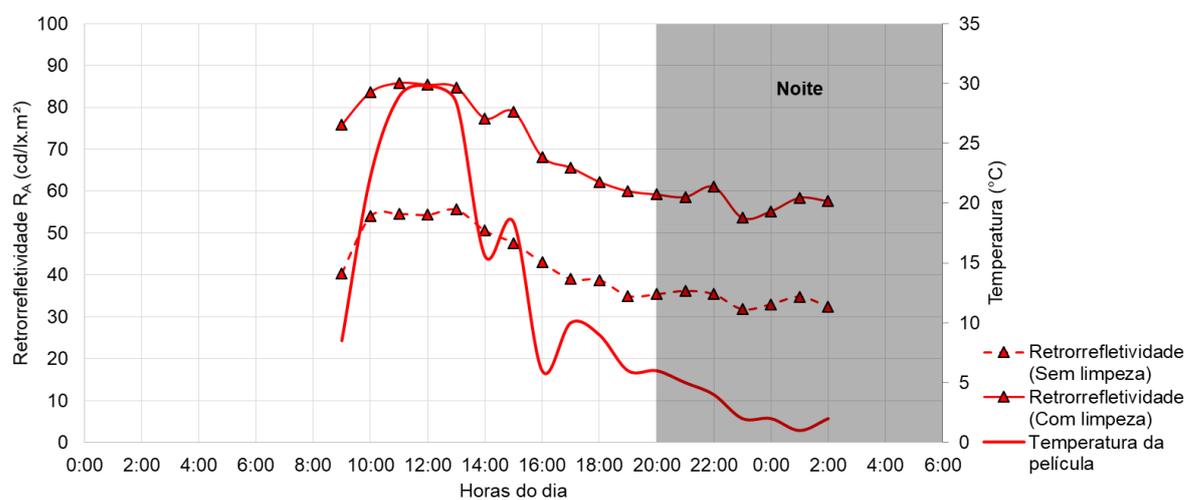
Fonte: Autor.

Figura 101 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor vermelho tipo I (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019)



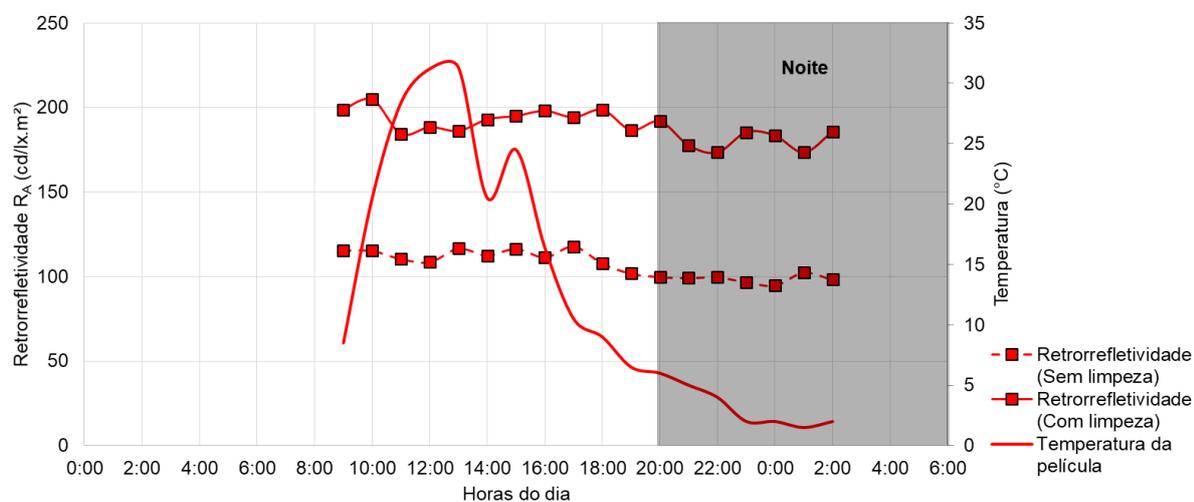
Fonte: Autor.

Figura 102 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor vermelho tipo III (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019)



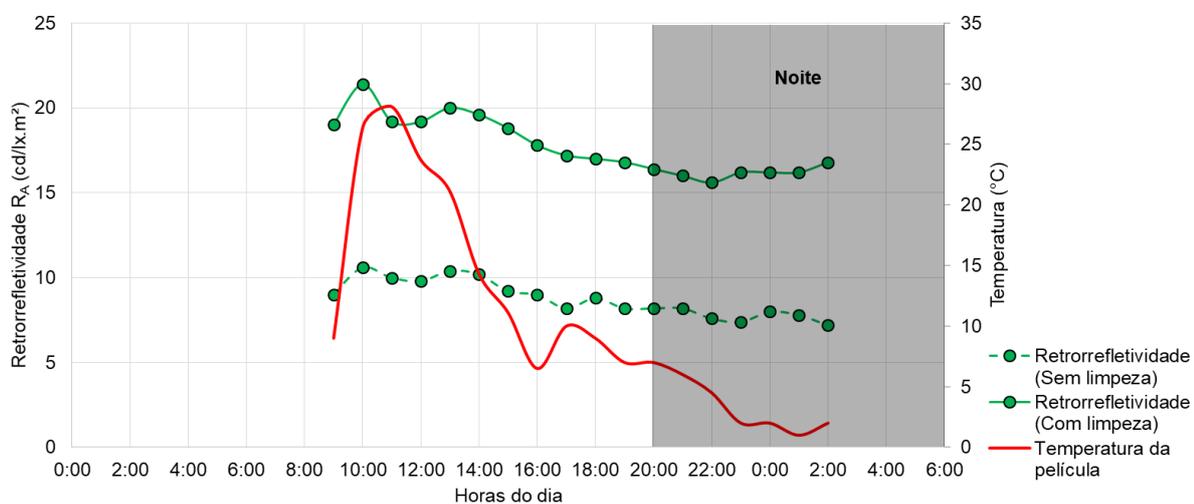
Fonte: Autor.

Figura 103 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor vermelho tipo X (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019)



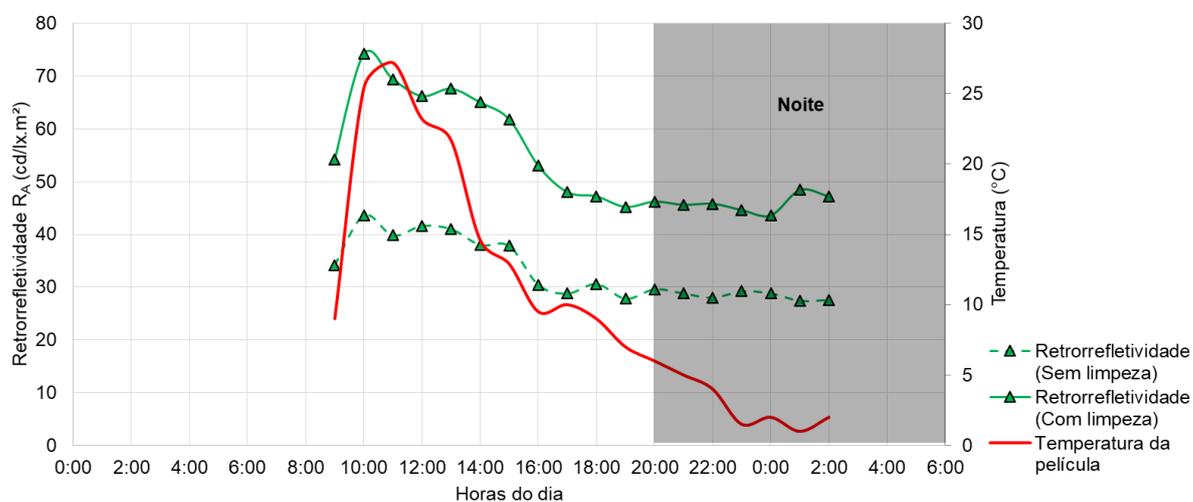
Fonte: Autor.

Figura 104 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor verde tipo I (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019)



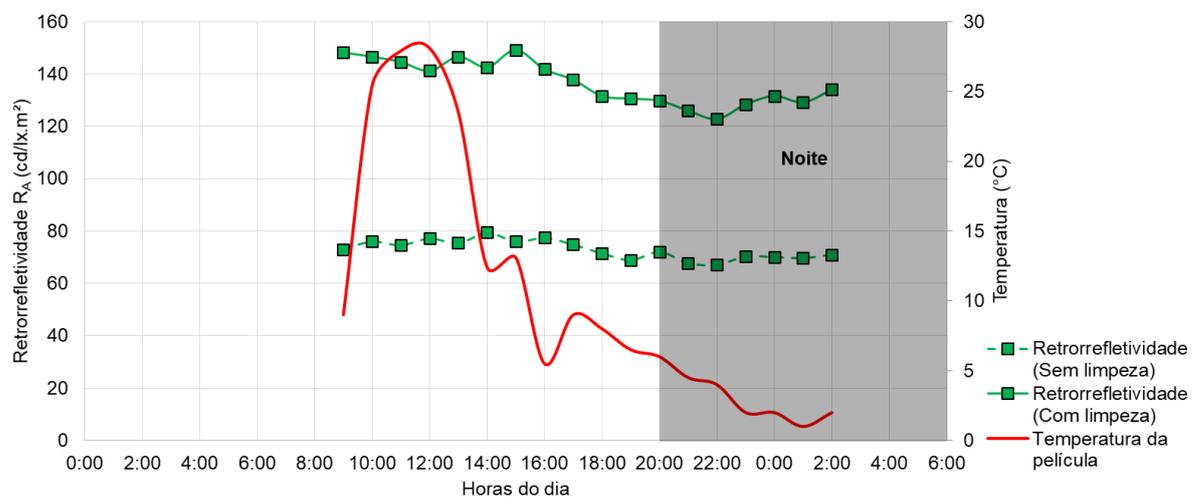
Fonte: Autor.

Figura 105 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor verde tipo III (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019)



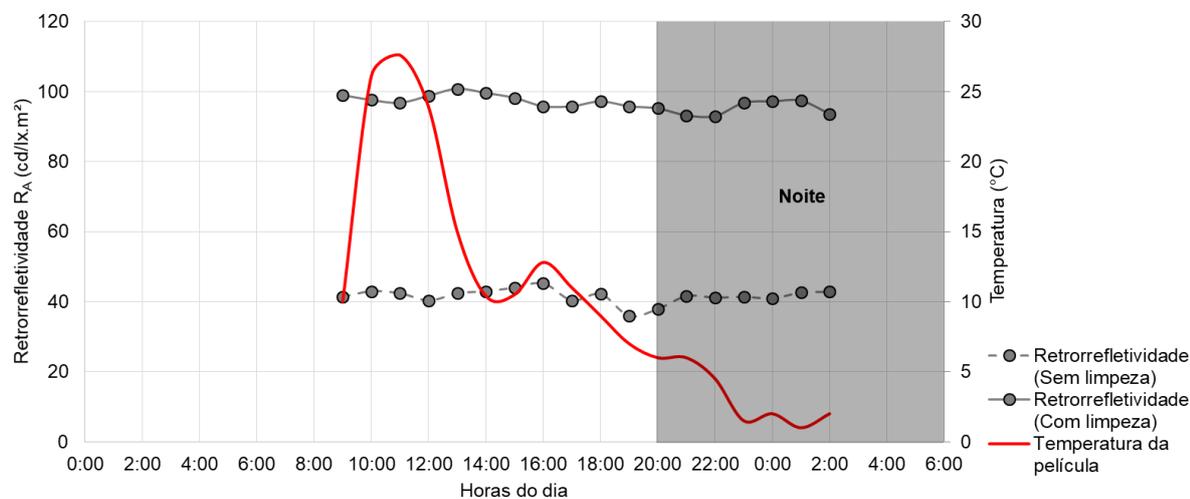
Fonte: Autor.

Figura 106 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor verde tipo X (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019)



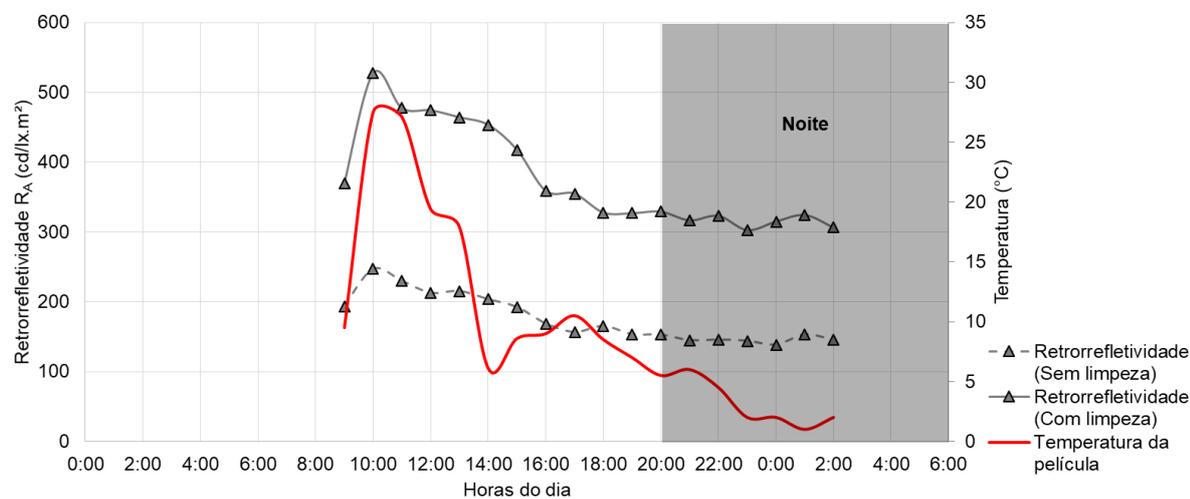
Fonte: Autor.

Figura 107 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor branco tipo I (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019)



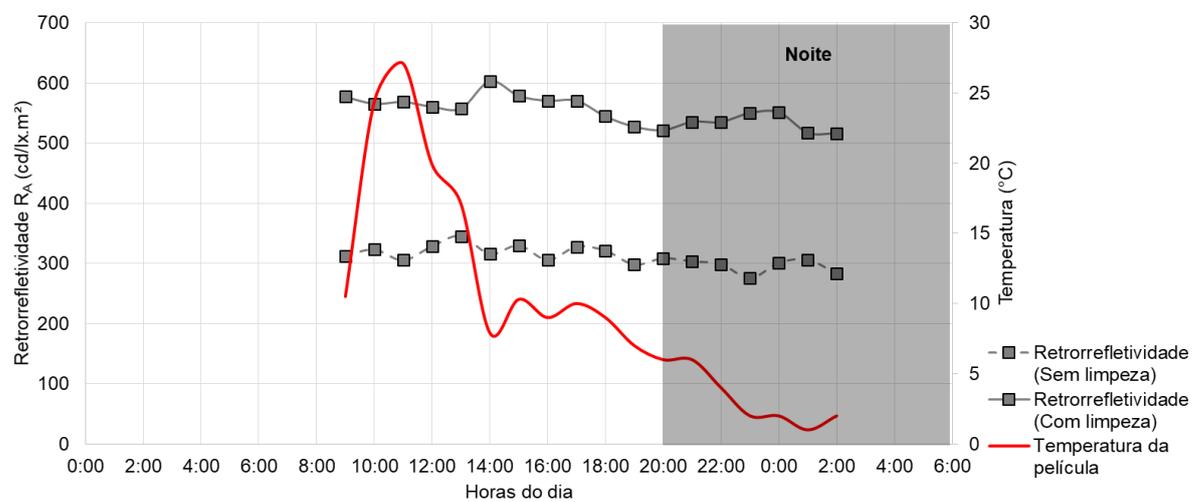
Fonte: Autor.

Figura 108 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor branco tipo III (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019)



Fonte: Autor.

Figura 109 – Medidas de retrorrefletividade média da película de cor branco tipo X (NBR 14644) do segmento de Santa Maria/RS (Data 3: 02/08/2019)



Fonte: Autor.