DEISE DIAS DO NASCIMENTO MACHADO

**Estudo da Durabilidade da Sinalização Horizontal em Pavimentos Asfálticos
Rodoviários**

SÃO PAULO
2019

DEISE DIAS DO NASCIMENTO MACHADO

**Estudo da Durabilidade da Sinalização Horizontal em Pavimentos Asfálticos
Rodoviários**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Ciências.

SÃO PAULO
2019

DEISE DIAS DO NASCIMENTO MACHADO

**Estudo da Durabilidade da Sinalização Horizontal em Pavimentos Asfálticos
Rodoviários**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Ciências.

Área de concentração:
Engenharia de Transportes

Orientadora:
Profa. Dra. Liedi Legi Bariani Bernucci

SÃO PAULO
2019

DEDICATÓRIA

*A minha sempre pequena Ana Luísa, meu
esposo Robson e aos meus sogros José e
Helena (in memoriam)*

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus que me permitiu chegar até aqui e me fortaleceu em cada momento difícil. "Obrigado querido Deus por sempre ter me guiado."

Agradeço a minha família pela compreensão das horas subtraídas do meu lar. A minha pequena Ana Luísa, filha que tanto amo, ao meu esposo Robson que não me questionou por minha decisão em continuar estudando, ao meu sogro José que me acompanhou ainda de madrugada para o pegar o fretado, a minha sogra que me incentivou sempre, e que infelizmente partiu antes da conclusão deste curso, deixando saudades.

Agradeço a Professora Liedi Bariani Bernucci, que me corrigiu, pontuou e ensinou acima de tudo, sempre calma e paciente, espelho para mim em minha carreira acadêmica, sempre preocupou-se em oferecer um ambiente agradável e didático a seus alunos (professora eu deixo aqui minha gratidão, muito obrigado). À professora Kamilla Vasconcellos que durante todo o período foi "psicóloga" não só minha, mas de vários alunos, escutou, apoiou, corrigiu e animou a todos, obrigado por sua energia contagiante. Ao tão querido professor e hoje amigo Edson Moura, que foi o primeiro que me apoiou e me fez acreditar que eu poderia ir mais longe. À professora Linda Lee e ao professor Quintanilha da área de estatística que me auxiliaram no tratamento de dados de projetos.

Ao Jean Michel, aluno de iniciação científica, hoje formado, que participou durante o projeto. Ao colega Guilherme Linhares que também tanto se dedicou a esta pesquisa e me ajudou com as planilhas e banco de dados deste projeto.

À Laboratório de Tecnologia da Pavimentação - LTP, a toda equipe, sem deixar de mencionar a Diomaria, secretária e hoje amiga, Robson e Vanderlei (amigos de Fatec), Igor e Erasmo. Aos amigos que aqui fiz e que levarei para toda vida, com memórias preciosas que guardo com carinho, André Kazuo, Mateus, Marcia (Marcinha), João Paulo Menezes, João Paulo Barbosa, Jose João, Iuri, Lucas, Paulo, Zila, Caio, Talita, Guilherme, Laura, Fernanda Carvalho, Ingrid Camargo, Frank, Manuela, Marina, Fernanda Gadler, Leidy, Vanderlei, Wilson, André Siqueira, Marcelo, Luciana e Rodrigo Leandro.

Ao professor Hélio Moreira e ao colega Fábio Landim, ambos da empresa Indutil, que nos ajudaram com informações preciosas no início deste trabalho, e sempre estiveram prontos em nos ajudar.

Agradeço também a Universidade de São Paulo e a Escola Politécnica pela oportunidade e realização desta pós-graduação e todos os momentos de aprendizado constante. Aos professores Liedi Bernucci, Carlos Suzuki, Kamilla Vasconcelos, Felipe Issa e Faiçal Massad nas disciplinas que aqui cursei.

Agradeço ao grupo Arteris e a ANTT pela construção do trecho experimental e aos colaboradores do CDT que nos ajudaram nas coletas dos dados de campo.

Há pessoas que desejam saber só por saber, e isso é curiosidade; outras, para alcançarem fama, e isso é vaidade; outras, para enriquecerem com a sua ciência, e isso é um negócio torpe; outras, para serem edificadas, e isso é prudência; outras, para edificarem os outros, e isso é caridade.

Santo Agostinho

RESUMO

O desempenho da sinalização viária horizontal é um dos fatores que podem contribuir para uma via segura. Ela precisa apresentar uma boa visibilidade diurna (contraste) e noturna (retrorefletividade). A redução na retroreflexão compromete a segurança ao tráfego, tornando a percepção do condutor aos elementos da via precária e possibilita a maior ocorrência de acidentes. A perda de retroreflexão está condicionada a diversos fatores como a qualidade dos materiais empregados, ao tipo de tráfego, aos fatores climáticos, à geometria da via, entre outros. Neste estudo, para a avaliação da durabilidade da sinalização horizontal viária, foi executado em campo um experimento utilizando dois fornecedores de tinta à base de água (Tinta 01 e Tinta 02), três fornecedores de microesferas de vidro (Microesfera Alfa - α , Beta - β , e Gama - γ) com granulometrias comumente empregadas (Granulometria Tipo II-A e Granulometria Tipo II-C), e duas diferentes taxas de aplicação (30% Tipo II-C e 70% Tipo II-A - 30/70; e 50% Tipo II-A, e 50% Tipo II-A - 50/50). A caracterização das microesferas de vidro foi realizada de forma inédita no Brasil com a utilização de um analisador de partículas dinâmico, que possibilitou o estudo da esfericidade e forma das microesferas, características essas importantes para a retrorefletividade. O desempenho das sinalizações realizadas em pista consistiu na análise do desgaste ou perda de retrorefletividade da pintura de sinalização horizontal (RI) em função do Tráfego Acumulado solicitante ou em função do tempo decorrido. Para validação dos dados e compreensão dos resultados em campo, foi realizada uma análise estatística que evidenciou a interação das variáveis propostas. O estudo permitiu avaliar a durabilidade das diferentes combinações de tinta e microesferas que compõem a sinalização horizontal em função do tempo decorrido da execução do trecho experimental, da velocidade e da composição do tráfego, e da frenagem ou da aceleração dos veículos sob a demarcação viária.

Palavras-chave: Segurança viária, demarcação horizontal, retrorefletividade, visibilidade noturna, microesfera de vidro.

ABSTRACT

Horizontal pavement marking performance is one of the factors that can contribute to a safe road. It has to enable good daytime (contrast) and nighttime (retroreflectivity) visibility. The reduction in retroreflectivity compromises the road safety, making the driver's perception of the road elements precarious, and leads to a greater occurrence of accidents. Retroreflectivity loss is conditioned by several factors, such as quality of the materials used for markings, type of vehicles and traffic severity, weather conditions, road geometry, among others. In this study, an in-field experiment was carried out to assess the durability of horizontal road markings, using two waterborne traffic paint suppliers (Paint 01 and Paint 02), three suppliers of glass beads (Alfa - α , Beta - β , and Gamma - γ) with usual granulometry (using combinations of two size distributions: Type II-A and Type II-C), and two different application rates (30% Type II-C and 70% Type II-A - 30/70; and 50% Type II-A and 50% Type II-A - 50/50). The characterization of the glass beads was performed in an unprecedented way in Brazil, using a dynamic particle analyzer, which enabled the study of bead sphericity and shape, important features for retroreflectivity. The performance of road markings consisted of the analysis of retroreflectivity wear or loss of the retroreflectivity (RI) due to the demanded cumulative traffic or to the elapsed time. To validate the data and to understand the in-field results, a statistical analysis was performed, which showed the interaction of the proposed variables. The study enabled the evaluation of the durability of the different combinations of paint and glass beads that make up the horizontal marking in function of the time elapsed from the painting, traffic speed and composition, and vehicle braking or acceleration on the road markings.

Keywords: Road safety; Pavement marking; retroreflectivity; nighttime visibility; glass bead

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Princípio da sinalização viária	20
Figura 2 – Estatísticas nacionais: mortes no trânsito	20
Figura 3 – Níveis mínimos de exigências adotados no Brasil para retrorrefletividade de 15m	25
Figura 4 – Reflexão especular.....	26
Figura 5 – Reflexão difusa.....	27
Figura 6 – Retrorreflexão.....	27
Figura 7 – Angularidade	28
Figura 8 – Percepção com distâncias de visibilidade de 20m e 30m	29
Figura 9 – Velocidade para diferentes distâncias de visibilidade.	30
Figura 10 – RI mínima necessária com tempo de reconhecimento de 3,5s.	31
Figura 11 – Retrorrefletômetro Portátil - Modelo Nacional	32
Figura 12 – Retrorrefletômetro Dinâmico	32
Figura 13 – Geometria de 15 metros – Ângulo de Incidência e Distância.....	33
Figura 14 – Geometria de 30 metros – Ângulo de Incidência e Distância.....	33
Figura 15 – Geometria Visibilidade Diurna - 30 metros.....	34
Figura 16 – Pêndulo Britânico	37
Figura 17 – Representação esquemática da Coalescência em emulsões.	43
Figura 18 – Incidência de luz na microesfera	45
Figura 19 – Esfera Perfeita – Correta refração.....	46
Figura 20 – Esfera Imperfeita – Luz dispersa.....	46
Figura 21 – <i>Roundometer</i> para ensaio de arredondamento de mcf de vidro	48
Figura 22 – Analisadores de Partícula Dinâmicos.....	48
Figura 23 – Efeito da Ancoragem da microesfera	51
Figura 24 – Grau de ancoramento	51
Figura 25 – Esferas de vidro com ancoramento deficiente.....	52
Figura 26 – Esferas de vidro pouco ancoradas	52
Figura 27 – Microesferas sem revestimento de adesão.....	53
Figura 28 – Microesferas com revestimento de adesão	53
Figura 29 – Classificação das esferas e das microesferas - Granulometria.....	55
Figura 30– Microesfera do Tipo I-B “ <i>Premix</i> ” sendo adicionada no reservatório.....	59
Figura 31 – Microesferas sendo aplicadas por dupla aspersão	59
Figura 32 – Padrão representativo para demarcações recém aplicadas	60
Figura 33 – Padrão representativo para demarcações com mais de 300 dias.....	61

Figura 34 – Padrão representativo para mudanças repentinas.....	61
Figura 35 – Durabilidade de RL para diferentes espessuras de termoplástico	63
Figura 36 – RI (15m) em função do tempo e precipitação acumulada.	65
Figura 37 – Desgaste por abrasão para diferentes tipos de tintas	66
Figura 38 – Termoplástico sobre <i>seal coat</i> (esquerda) e <i>HMAC</i> (à direita).....	67
Figura 39 – Retrorrefletividade na trilha de roda e eixo.....	71
Figura 40 – RI linha de bordo cor branca	72
Figura 41 – RI linha de centro cor amarela.....	72
Figura 42 – Vida útil para tintas e termoplástico - RL min de 150mcd.lx ⁻¹ .m ⁻²	73
Figura 43 – Trecho experimental - Fita adesiva	76
Figura 44 – Trecho experimental - pintura.....	76
Figura 45 – Simulador de desgaste - Alemanha - Bast.....	80
Figura 46 – Taber Abraser	80
Figura 47 – Sistema de desgaste do Taber Abraser	80
Figura 48 – Simulador de tráfego acelerado Móvel - MMSLS3.....	81
Figura 49 – Materiais empregados na pesquisa.....	82
Figura 50 – Equipamento Camsizer L	84
Figura 51 – Distorções das partículas para diferentes valores de b/l.	85
Figura 52 – Microesfera de vidro na calha vibratório do quarteador rotativo.....	86
Figura 53 – Microesferas caindo no recipiente giratório com cilindros	86
Figura 54 – Granulometria das microesferas Tipo II-A e II-C	86
Figura 55 – Relação de aspecto médio (b/l) - Granulometria II-C (% em volume)	87
Figura 56 – Rel. de aspecto médio (b/l) - Granulometria II-C (passante acumulada)	88
Figura 57 – Rel. de aspecto médio (b/l) - Granulometria II-A (% em volume)	89
Figura 58 – Rel. de aspecto médio (b/l) -Granulometria II-A (passante acumulada).	90
Figura 59 – Esfericidade (SPHT) - granulometria II-C- % em volume	91
Figura 60 – Esfericidade SPHT - Granulometria II-C (% acumulada).....	92
Figura 61 – Esfericidade SPHT - Granulometria II-A (% passante acumulada)	93
Figura 62 – Aparência e defeitos - Microesfera Alfa.....	94
Figura 63 – Aparência e defeitos - Microesfera Beta	95
Figura 64 – Aparência e defeitos - Microesfera Gama	96
Figura 65 – Proposta Experimental em Campo.....	97
Figura 66 – Matriz Experimental - Materiais.....	98
Figura 67 – Microesferas e granulometrias	100
Figura 68 – Localização do trecho experimental–BR-381	101

Figura 69 – Local de execução do trecho experimental	101
Figura 70 – Croqui de posição das pinturas	102
Figura 71 – Mcf <i>Premix</i> sendo adicionadas ao cilindro de tinta.....	102
Figura 72 – Calibração das pistolas de aspersão de microesferas	102
Figura 73 – Esquema das Pinturas de Campo.....	103
Figura 74 – Medidas de Retrorefletividade em Campo	103
Figura 75 – Posição das Leituras de RI em campo, em cada uma das faixas de tráfego de acesso ou saída a uma cabine de pedágio.....	103
Figura 76 – Ensaio de mancha de areia sendo executado.....	106
Figura 77 – Ensaio de mancha de areia na pintura de sinalização	106
Figura 78 – Macrotextura em Função de HS - Cabine 14 - Aceleração	109
Figura 79 – Macrotextura em Função de HS - Cabine 12 - Aceleração	110
Figura 80 – Macrotextura em Função de HS - Cabine 10 - Aceleração	110
Figura 81 – Macrotextura em Função de HS - Cabine 14 e 12 - Aceleração	111
Figura 82 – Marcas de Frenagem - Faixa de Tráfego 09 Desaceleração	112
Figura 83 – Marcas de Frenagem - Faixa 10 de Tráfego - Desaceleração	112
Figura 84 – Levantamento de Microtextura na pintura de sinalização	113
Figura 85 – Valores de VRD para Cabines 13,11 e 09.	115
Figura 86 – Valores de VRD para Cabines 14 e 10	116
Figura 87 – Extração de amostras de pintura de campo.....	117
Figura 88 – Distribuição das diferentes de microesfera e granulometria.....	118
Figura 89 – Oscilações nas curvas de desgaste	120
Figura 90 – Microesfera Alfa (50%II-A e 50% II-A).....	122
Figura 91 – Microesfera Beta (50%II-A e 50% II-A)	123
Figura 92 – Microesfera Gama (50%II-A e 50% II-A).....	123
Figura 93 – Desempenho das diferentes microesferas	124
Figura 94 – Comparação entre taxas de aplicação de microesfera –Mcf Gama.....	126
Figura 95 – Comparação entre taxas de aplicação de microesfera Mcf Beta e Mcf Alfa.....	126
Figura 96 –RI em função do tempo acumulado e do tráfego (solicitações em eixos acumulados).....	128
Figura 97 – Tráfego acumulado nas cabines - Mcf Gama - Tinta 01 - Geo. 15m....	130
Figura 98 – Somatória do tráfego leve e pesado nas cabines de tráfego.....	130
Figura 99 - Somatória do tráfego leve e pesado nas cabines de tráfego 10 e 13. ..	131
Figura 100 – Configuração das cabines e localização das áreas de aceleração e frenagem	132

Figura 101 – Posicionamento do Técnico para medição da velocidade.....	133
Figura 102 – Pistola Radar.....	133
Figura 103 – Trecho Experimental - tráfego e formação de fila - Pista Norte.....	134
Figura 104 – RI em função da Velocidade - Faixa 14 - Aceleração.....	135
Figura 105 – RI em função da Velocidade - Faixa 13 - Aceleração.....	135
Figura 106 – RI em função da Velocidade - Faixa 09 - Aceleração.....	136
Figura 107 – Comparação entre geometria de 15m e 30m - Mcf Alfa (α)	137
Figura 108 – Comparação entre geometria de 15m e 30m – Mcf Beta (β)	137
Figura 109 – Comparação entre geometria de 15m e 30m – Mcf Gama (γ)	138
Figura 110 – Comparativo entre a retrorrefletividade na trilha de roda e no eixo - Microesfera Alfa (α).....	139
Figura 111 – Comparativo entre a retrorrefletividade na trilha de roda e no eixo - Microesfera Beta (β).....	140
Figura 112 – Comparativo entre a retrorrefletividade na trilha de roda e no eixo - Microesfera Gama (γ).....	140
Figura 113 – Sujidade no eixo da faixa	141
Figura 114 – Resíduos para o modelo	148

LISTA DE TABELA

Tabela 1– Valor de Resistencia à Derrapagem - VRD - CEN EN 1436	37
Tabela 2 – Fatores que afetam a retrorreflexão da microesfera.....	44
Tabela 3 – Aplicações e usos das microesferas	56
Tabela 4 – Correspondências entre as normas ABNT e DNER - Granulometria	58
Tabela 5 – Resolução de Problemas associados a aplicação de microesferas	68
Tabela 6 – Resolução de Problemas associados a aplicação de tintas	69
Tabela 7 – Revisão da literatura referente a modelos de degradação em para pintura de sinalização viária	75
Tabela 8 – Vantagens e desvantagens de demarcações longitudinais e transversais em trechos experimentais	77
Tabela 9 – Caracterização das Tintas	83
Tabela 10 – Identificação e Nomenclaturas das Combinações.....	99
Tabela 11 – Datas de coleta de medidas de RI do trecho experimental	104
Tabela 12 – Contagem de Veículos - Quantificação de Eixos.....	105
Tabela 13 – Classificação da Macrotextura em função do HS	107
Tabela 14 – Altura da Mancha de Areia	108
Tabela 15 – Classificação de VRD – Valor de Resistencia à derrapagem.....	111
Tabela 16 – Classificação de VRD – Valor de Resistência a derrapagem.....	114
Tabela 17 – Velocidade na Praça de Pedágio	134
Tabela 18 – Identificação dos parâmetros.....	143
Tabela 19 – Estimativas dos coeficientes dos modelos lineares.....	144

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTT	Agência Nacional de Transporte Terrestre
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CEN	Comitê Europeu de Normalização
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
HS	Altura da Mancha de Areia
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
Mcf	Microesfera
PER	Programa de Exploração de Rodovia
QD	Coeficiente de Luminância sob iluminação difusa - Visibil. Diurna
RI	Coeficiente de Luminância Retrorrefletivo - Retrorrefletividade
SRT	<i>Skid Resistance Tester</i>
SH	Sinalização Horizontal
TRE	Trilha de Roda Externa
TRI	Trilha de Roda Interna
VRD	Valor de Resistência a Derrapagem

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	4
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVO	21
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	21
2 REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1 IMPORTÂNCIA DA RETRORREFLETIVIDADE	23
2.2 RETRORREFLETIVIDADE	24
2.2.1 Retrorrefletividade Inicial e residual	24
2.2.2 Fenômenos da Reflexão	26
2.2.2.1 Reflexão especular	26
2.2.2.2 Reflexão Difusa	26
2.2.2.3 Retrorreflexão	27
2.2.3 Geometria angular para medição da retrorrefletividade	27
2.2.4 Equipamentos para medida de retrorrefletividade	31
2.2.4.1 Geometria de 15 metros	32
2.2.4.2 Geometria de 30 metros	33
2.2.5 Visibilidade Diurna	33
2.2.6 O efeito da água na retrorrefletividade	35
2.2.7 Equipamento para medição da Resistência a Derrapagem	36
2.3 MATERIAIS DE SINALIZAÇÃO VIÁRIA	38
2.3.1 Materiais Aglutinantes	38
2.3.1.1 Termoplástico	39
2.3.1.2 Elastoplásticos	39
2.3.1.3 Plástico a frio	39
2.3.1.4 Tintas	40
2.3.1.5 Tinta emulsionada em água	41
2.3.2 Microesferas de vidro	44
2.3.2.1 Forma da microesfera de vidro - Esfericidade	45
2.3.2.2 Transparência ou claridade da microesfera	49
2.3.2.3 Ancoramento	50
2.3.2.4 Tratamentos químicos nas microesferas	52
2.3.2.5 Índice de Refração	54
2.3.2.6 Granulometria das esferas e microesferas	54
2.3.2.7 Formas de Aplicação das microesferas	58
2.4 DEGRADAÇÃO DA PINTURA DE SINALIZAÇÃO VIÁRIA	60
2.4.1 Espessura da película de tinta	62
2.4.2 Ação climática sobre a demarcação	63
2.4.3 Material utilizado na demarcação	65
2.4.4 Tipo de Pavimento e textura superficial	66
2.4.5 Atividades de manutenção	68
2.4.6 Controle de qualidade durante a aplicação	68

2.4.7	Posição da demarcação	70
2.4.8	Cor do material	71
2.4.9	Ação do Tráfego - Volume e composição.....	72
2.5	MODELOS DE DEGRADAÇÃO	74
2.6	TRECHOS EXPERIMENTAIS	76
2.7	SIMULADORES DE DESGASTE E SIMULADORES DE TRÁFEGO	79
3	ENSAIOS EM LABORATÓRIO	82
3.1	MATRIZ EXPERIMENTAL - MATERIAIS	82
3.2	CARACTERIZAÇÃO DAS TINTAS	82
3.3	ESTUDO DA ESFERICIDADE DAS MICROESFERAS	83
3.3.1	Caracterização de Partícula - Equipamento Camsizer®	83
3.3.2	Ensaio de caracterização de partícula - microesfera.....	85
3.3.2.1	Granulometria.....	86
3.3.2.2	Relação de Aspecto Médio em função da granulometria da Microesfera.....	87
3.3.2.3	SPHT (esfericidade) em função da granulometria da Microesfera	91
3.4	APARÊNCIA E DEFEITOS.....	93
3.4.1	Aparência e defeitos.....	93
3.4.1.1	Aparência e defeitos - Microesfera Alfa	93
3.4.1.2	Aparência e defeitos - Microesfera Beta.....	95
3.4.1.3	Aparência e defeitos - Microesfera Gama	96
4	METODOLOGIA EXPERIMENTAL DE CAMPO	97
4.1	PROPOSTA EXPERIMENTAL	97
4.2	SELEÇÃO DE MATERIAIS E MATRIZ EXPERIMENTAL	97
4.3	ARRANJO EXPERIMENTAL EM CAMPO	100
4.4	MEDIDA DE RETRORREFLETÂNCIA EM CAMPO	103
4.4.1	Coleta de dados em campo.....	103
4.4.2	Periodicidade das Medidas e coleta de dados	103
4.4.3	Contagem de Veículos - Quantificação de Eixos.....	104
4.5	ENSAIOS EM CAMPO DE TEXTURA	105
4.5.1	Macrotextura.....	106
4.5.2	Microtextura.....	111
4.6	Amostras de campo para imagens	116
5	MONITORAMENTO DO TRECHO EXPERIMENTAL.....	119
5.1	CLIMA	120
5.2	DESGASTE DA PELÍCULA DE TINTA E MICROESFERAS.....	121
5.3	CONSTRUÇÃO DE CURVAS DE DESGASTE	123
5.3.1	Desgaste para as diferentes microesferas	124
5.3.2	Desgaste das Diferentes Taxas de Aplicação de Microesferas.....	125
5.3.3	Desgaste em função do tempo e tráfego.....	127
5.3.4	Efeito da Aceleração e Frenagem associadas ao tráfego e à velocidade 129	
5.3.4.1	Número de eixos solicitantes.....	129
5.3.4.2	Velocidades (aceleração e frenagem)	132
5.3.5	Comparação entre Geometrias	136

5.3.6	Comparação dos desgastes entre trilha de roda e eixo	139
6	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS.....	142
7	CONCLUSÕES	149
	REFERÊNCIAS.....	153
	APÊNDICE - I.....	162
	ANÁLISE ESTATÍSTICA MODELO - TRILHA DE RODA - GEOMETRIA 15m.	162
	ANÁLISE ESTATÍSTICA MODELO - EIXO - GEOMETRIA 15M	163
	ANÁLISE ESTATÍSTICA MODELO - TRILHA DE RODA - GEOMETRIA. 30m.	164
	ANÁLISE ESTATÍSTICA MODELO - EIXO - GEOMETRIA. DE 30m.....	165

1 INTRODUÇÃO

A sinalização viária é um conjunto de sinais de trânsito e dispositivos de segurança colocados na via pública com o objetivo de garantir sua adequada utilização, possibilitando melhor fluidez no trânsito e maior segurança aos usuários de veículos que nela circulam. Uma sinalização eficiente deve atrair a atenção do condutor, transmitir mensagens simples e inequívoca ao usuário, além de ser vista a uma distância suficiente a ponto de permitir manobras com segurança. A sinalização viária além de canalizar e orientar os condutores às adequadas práticas de dirigibilidade, deve assegurar características de visibilidade tanto diurna quanto noturna de modo a garantir a segurança ao usuário em trânsito na via (DNIT 2017).

Para proporcionar uma melhor visibilidade noturna, a sinalização deve ser retrorrefletiva. O termo retrorrefletividade refere-se à propriedade de um sinal de trânsito ser capaz de refletir a luz na direção do condutor. Na pintura de sinalização horizontal, a retrorreflexão é possível por meio de microesferas de vidro ou cerâmica adicionadas nos diferentes materiais comumente empregados para demarcação do pavimento: tintas à base de água, termoplásticos, fitas adesivas, resinas epóxi etc.

As marcações no pavimento contribuem com a segurança do motorista durante todo seu percurso na rodovia, oferecendo as informações necessárias durante o dia e a noite. As características básicas para a demarcação da rodovia como cor, espessura, e tipo de traçado são especificados por diferentes órgãos de trânsito, conselhos e agentes reguladores. No entanto, os padrões de retrorrefletividade ainda não estão claramente definidos quanto ao tipo de pintura, qual tipo e dosagem de microesferas para um determinado tipo de tráfego ou rodovia. Isto é, ainda é necessário estabelecer padrões que caracterizem e especifiquem melhor este tipo de procedimento.

Uma demarcação viária da sinalização horizontal, como explica ainda o CONTRAN (2007) precisa ser vista com a distância necessária para que possa ser interpretada em tempo hábil para a tomada de decisão, isto é, a visibilidade e legibilidade adequada podem ser fatores que condicionam a via como segura. O mesmo órgão relaciona alguns princípios básicos que a sinalização viária deve contemplar (Figura 1):

Figura 1 – Princípio da sinalização viária

Fonte: Adaptado de CONTRAN (2007)

Os números de acidentes ocorridos no trânsito ano após ano são preocupantes. Dentre os diversos motivos que podem estar associados a tais acidentes, as condições da sinalização viária podem contribuir para o aumento de tais estatísticas. A análise da Figura 2 mostra o número de mortes no trânsito que ocorreram nos últimos anos, até 2015, demonstrando a necessidade de implementar medidas que contribuam para uma mobilidade mais segura nas vias, de modo a reduzir as mortes e os acidentes em geral.

Figura 2 – Estatísticas nacionais: mortes no trânsito

Fonte: POR VIAS SEGURAS, 2017

Segundo a Organização Mundial da Saúde - OMS (2015), o número de mortes por lesões no trânsito está no topo da lista dentre as dez principais causas de mortes entre jovens de 15 a 29 anos, ou seja, mundialmente o trânsito representa uma das principais causas de morte. No Brasil, os aspectos relacionados à segurança viária ainda são poucos conhecidos e as estatísticas não são claras no que diz respeito ao entendimento das causas desses acidentes.

Entendendo mais adequadamente as condições de cada rodovia e a influência do traçado na operação, é possível programar devidamente as intervenções conforme o desgaste dos materiais de sinalização horizontal, melhorando sua visibilidade pelo usuário a longas distâncias, mesmo em períodos noturnos, chuvosos ou com neblina. A qualidade da pintura de sinalização, bem como sua manutenção, são fatores importantes que devem ser observados, sendo um desafio manter a visibilidade, bem como a durabilidade das demarcações do pavimento.

1.1 OBJETIVO

O objetivo desta dissertação é de estudar a durabilidade em campo da pintura de sinalização horizontal em pavimentos asfálticos em rodovias sujeitas a tráfego intenso e muito pesado, quanto à perda de retrorrefletividade com o tempo e com as solicitações dos pneus, empregando diferentes tintas à base de água e microesferas de vidro. Por meio de dados de retrorrefletividade coletados em experimento de campo, foram realizadas análises de desgaste da sinalização horizontal, em função das solicitações do tráfego e do tempo decorrido, tendo sido proposto um modelo de regressão para avaliação das diferentes variáveis associadas às medidas de retrorreflexão.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em capítulos da seguinte forma:

Capítulo 01 - Trata da importância do tema e dos objetivos propostos para este trabalho, bem como da organização do texto da dissertação.

Capítulo 02 - Revisão da literatura que buscou compreender e esclarecer os fenômenos associados à retrorreflexão, como as características dos materiais para demarcação e os efeitos do tráfego e do clima. Foi feito um levantamento de

normas nacionais e internacionais que regem o assunto. Foram ainda pesquisados experimentos realizados em campo para a análise da perda de retrorrefletividade.

Capítulo 03 - Ensaio em Laboratório. São apresentados os ensaios em laboratório realizados com os materiais empregados na pesquisa, caracterização da tinta e estudo da esfericidade das microesferas de vidro, além de apresentar a matriz experimental.

Capítulo 4 - Metodologia experimental de campo - É apresentado o trecho experimental executado para o alcance do objetivo proposto nesta pesquisa. Traz as diferentes combinações de materiais empregadas na pesquisa e caracterização da textura do pavimento onde a pista teste foi construída.

Capítulo 05 - Monitoramento do trecho experimental: Este capítulo trata do acompanhamento da perda da retrorrefletividade para as diferentes combinações empregadas propostas no Capítulo 04. A análise é realizada com a construção de curvas de desgaste, comparando-se os materiais empregados.

Capítulo 06 - Análise Estatística dos Dados: Trata de uma análise exploratória dos dados da pesquisa, onde buscou-se diferenciar os materiais estatisticamente. Também traz a proposição de um modelo de regressão linear para validação dos dados.

Capítulo 07 - Conclusões: Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com os ensaios de laboratórios, com os dados obtidos em campo do trecho experimental e finalmente a validação destes dados por meio de uma análise estatística.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo traz uma breve fundamentação teórica quanto aos fenômenos associados à retrorreflexão para marcação viária. Buscou-se conhecer as normativas nacionais e internacionais que regem o assunto, recomendando as melhores práticas, limites admissíveis mínimos, formas padronizadas de mensuração e equipamentos comumente empregados para obtenção da retrorreflexão na sinalização viária horizontal. Foi realizada uma pesquisa quanto aos materiais disponíveis, qualidade, forma de aplicação, diferentes tipos e classificações bem como a especificidade de cada um. Buscou-se também encontrar na literatura o comportamento da retrorrefletividade ao longo do tempo, seu desempenho em função da composição do tráfego, textura do pavimento, posição da demarcação no pavimento e a influência da solicitação pelos veículos. Para esta revisão bibliográfica procurou-se conhecer modelos estatísticos de degradação em pistas experimentais, que também são objetos de pesquisa neste trabalho.

2.1 IMPORTÂNCIA DA RETRORREFLETIVIDADE

O Manual de Sinalização Rodoviária (DNIT, 2010) define que a sinalização horizontal é composta por linhas longitudinais, transversais, zebrados, setas, símbolos, e legendas com dimensões e posicionamentos de acordo como projeto, sendo aplicados sobre o revestimento da rodovia, para que propicie condições adequadas de segurança e conforto ao usuário. O mesmo manual salienta ainda a importância da função orientadora que a demarcação deve possuir no período noturno. Esta orientação é obtida pela capacidade da sinalização de refletir a luz dos faróis dos veículos, podendo o condutor receber a informação por meio de luz refletida de sua localização. O termo que expressa esta capacidade de reflexão da luz é conhecido por retrorrefletividade.

Branco (1999) discute que durante todo o percurso por uma rodovia, quase todas as informações recebidas pelo motorista são de natureza visual, e as que ele mais rapidamente reconhece são as demarcações no pavimento para onde ele dirige continuamente sua atenção.

Mizera *et al.* (2008) explicam que a retrorrefletividade tem sido uma medida de controle da durabilidade da demarcação comumente utilizada pelas agências de manutenção da rodovia, definindo durabilidade como a medida de resistência de um material de

demarcação ao desgaste e perda de aderência ao pavimento (deslocamento da película da superfície do pavimento) ao longo do tempo. Moreira e Menegon (2003) explicam que a visibilidade noturna (retrorefletividade) se consegue por meio da adição de microesferas de vidro, que são adicionadas à pintura de sinalização, que captam a luz emitida pelos faróis dos veículos e devolvem por reflexão na direção do motorista.

O Comitê Europeu de Normatização, por meio da norma EN 1436:2007, regulamenta que os materiais devem atender aos seguintes princípios: i) retrorefletividade seca e molhada; ii) parâmetros de cor da pintura – cromaticidade que está relacionada à cor da pintura e fator de luminância; iii) a resistência à derrapagem da pintura de sinalização - SRT (*Skid Resistance Tester*) e iv) visibilidade diurna. Todos estes parâmetros são importantes para a segurança do condutor, no que diz respeito a sinalização viária e contribuem para um melhor desempenho e controle da qualidade da demarcação rodoviária.

2.2 RETRORREFLETIVIDADE

Segundo a norma ASTM E1710, a unidade utilizada para a medição da retrorefletividade de uma sinalização viária é o Coeficiente de Luminância Retrorefletida ou retrorefletividade (RI), que corresponde à razão entre a Luminância (L) de uma superfície retrorefletiva na direção da observação e a iluminância (E) recebida sobre um plano perpendicular na direção da luz incidente (Equação 01). As leituras feitas por instrumentos portáteis são medidas em $\text{mcd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$ (milicandelas luz por metro quadrado), por uma questão de praticidade devido à baixa luminância do pavimento (ASTM 2011a).

$$RI = \frac{R}{E} = \text{mcd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1} \quad (01)$$

2.2.1 Retrorefletividade Inicial e residual

A retrorefletividade inicial é definida na NBR 14723 como o valor da retrorefletividade avaliada em até 15 dias após aplicação na via. Esse intervalo é adotado para que as microesferas em excesso ou pouco ancoradas possam ser removidas com a liberação ao tráfego, este excesso também pode ocasionar sombras na película recém pintada e ocasionar uma leitura de retrorefletância menor (ABNT 2013).

A retrorrefletividade residual na mesma norma NBR 14723 é definida como o valor avaliado após um determinado período em relação à avaliação da retrorrefletividade inicial. A retrorrefletividade residual mínima é o valor determinado que indica a necessidade de intervenção - repintura, independente das condições físicas ou operacionais da rodovia ou ainda do tipo de material.

Os valores estabelecidos para retrorrefletorização são especificados pela norma DNIT 100/2018 - ES para geometria de 15 metros são: (valores expressos em milicandelas por lux por metro quadrado – $\text{mcd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$) -(DNIT 2009) Figura 3:

Figura 3 – Níveis mínimos de exigências adotados no Brasil para retrorrefletividade de 15m

Fonte: DNIT 100/2018 (adaptado)

Nos contratos de concessões de rodovias - Programa de Exploração de Rodovias - PER assinados entre concessionária e o órgão regulador - ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres, os valores de retrorrefletividade mínima variam de 80 $\text{mcd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$ para contratos mais antigos e em contratos novos ou ainda com atualizações mais recentes os valores chegam a 120 $\text{mcd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$. (ANTT 2012; 2015; 2018a; 2018). Valores semelhantes são encontrados nos contratos de concessão estabelecidos pela Agência de Transportes do Estado de São Paulo - ARTESP, valores mínimos de refletorização de 120 $\text{mcd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$. (ARTESP 2008a, 2008b). Um fato importante a ser pontuado nestes contratos é a não especificidade da geometria de medição e monitoramento destes valores, ficando pressuposto a legislação de medição vigente -

geometria de 15 metros, porém já existem normativas mais recentes onde contemplam a mensuração com geometria de 30 metros, isto será melhor tratado e esclarecido nos itens 2.2.3 e 2.2.4 deste capítulo.

2.2.2 Fenômenos da Reflexão

Schwab (1999) explica que a reflexão é um fenômeno natural da luz, e acontece quando um corpo ou material reflete parte da luz emitida por uma fonte, ou seja, quando os raios emitidos incidem sobre o corpo (material) e retornam para a fonte geradora.

Existem três tipos básicos de reflexão: reflexão especular, reflexão difusa e retrorreflexão.

2.2.2.1 Reflexão especular

A reflexão especular acontece quando a luz incide sobre a superfície e esta reflete na direção oposta, e não ao motorista. Este tipo de fenômeno pode ser facilmente observado quando um filme de água recobre a sinalização viária no pavimento e a luz do farol incide, ocorrendo um efeito espelho (especular) (Figura 4).

Figura 4 – Reflexão especular

Fonte: Adaptado de MOREIRA e MENEGON (2003) e FHWA (1994)

2.2.2.2 Reflexão Difusa

A reflexão difusa acontece quando a luz do farol incide sobre uma superfície rugosa e os raios de luz são refletidos em várias direções. Uma sinalização sem a adição de microesferas provoca este fenômeno – reflexão difusa. Neste tipo de reflexão apenas uma parte da luz retorna à fonte emissora (Figura 5).

Figura 5 – Reflexão difusa

Fonte: Adaptado de MOREIRA e MENEGON (2003) e FHWA (1994)

2.2.2.3 Retrorreflexão

A retrorreflexão acontece quando a luz incidente do farol sobre a sinalização viária no pavimento é redirecionada à sua fonte, tornando este material visível à noite. Este fenômeno acontece quando a luz atinge as microesferas de vidro que estão na película de tinta, por esta razão os materiais retrorrefletivos se tornam brilhantes quando próximos de uma fonte luminosa (Figura 6).

Figura 6 – Retrorreflexão

Fonte: Adaptado de MOREIRA e MENEGON (2003) e FHWA (1994)

2.2.3 Geometria angular para medição da retrorrefletividade

A distância de visibilidade refere-se ao intervalo no qual a demarcação pode ser vista pelo condutor, porém ela não garante que o motorista realmente notará a demarcação ou perceberá corretamente o significado; estas ações estão associadas à visibilidade e à legibilidade. A distância de visibilidade especifica apenas a extensão na qual um determinado motorista é capaz de ver a demarcação (FHWA. 2014).

A geometria angular é o parâmetro necessário para leituras de retrorreflexão sob condições padronizadas. Essa geometria está associada à distância entre a localização dos faróis dos veículos (fonte luminosa) e o ponto da demarcação viária que reflete a luz que recebe dos faróis e o observador (fonte receptora), bem como os ângulos que entre eles se formam (DNIT, 2017) - Figura 7:

- i. Ângulo de Incidência (i): ou ângulo de entrada é o ângulo formado pelo raio de luz incidente e a perpendicular à superfície refletiva.
- ii. Ângulo de Iluminação (m): é o ângulo formado pelo raio de luz incidente e a superfície refletiva.
- iii. Ângulo de Observação (o): ângulo formado pelo raio de luz incidente e o raio de luz refletido que chega até o observador, em um cone estreito, denominado cone de visão.
- iv. Distância de Visibilidade (V): distância entre o veículo e o ponto em que é refletida a luz.

Figura 7 – Angularidade

Fonte: Adaptado de DNIT (2017)

A altura em que a luz é emitida sobre a sinalização, o ângulo de entrada e a observação podem afetar as leituras de retrorrefletividade (ASTM 2011a). Logo, a visibilidade da demarcação no período noturno para o motorista de caminhão não é a mesma pelo motorista de um veículo de passeio.

Um estudo apresentado pela comissão europeia por meio do relatório COST 331 - *Requirements for Horizontal Road Marking*, apresenta uma simulação em um ambiente virtual uma rodovia com faixa dupla, em uma situação de condução noturna mostrando a demarcação rodoviária com linhas de centro e bordo. O ambiente virtual foi desenvolvido por meio de um simulador de condução elaborado pela *Swedish Road e Transport Research Institute* (VTI). Um dos objetivos deste estudo foi simular a condução do motorista com diferentes distâncias de visibilidade da marcação rodoviária e sua relação com a velocidade para o mesmo trecho. A Figura 8 e Figura 9 trazem, respectivamente, a percepção do condutor com a diferente distância de visibilidade e a estimativa da necessidade de distância de visibilidade em função da velocidade para uma condução segura (COST 331, 1999).

Figura 8 – Percepção com distâncias de visibilidade de 20m e 30m

Fonte: COST 331 (1999)

Para distâncias de visibilidade entre 30m e 60m foi observado um aumento da velocidade durante o experimento. Entende-se que a distância de visibilidade adequada está abaixo de 40m, já que acima desse valor ocorre um aumento da velocidade. A distância normaliza tanto pela Comitê Europeu de Normatização (CEN) e a ASTM adotam uma distância padronizada de 30m, sendo suficiente para proporcionar conforto ao motorista durante sua condução, e favorável a segurança quanto a velocidade de condução.

Figura 9 – Velocidade para diferentes distâncias de visibilidade.

Fonte: adaptado de COST 331 (1999)

Atualmente a distância de visibilidade adotada no Brasil por meio do Programa Nacional de Segurança e Sinalização Rodoviária - BR-LEGAL é uma distância de visibilidade de 15 metros (DNIT, 2013). Salles *et al* (2015) salientam que os valores de retrorrefletividade residuais adotados no Brasil e a geometria angular de 15m são pouco exigentes. Nos Estados Unidos, Canadá e a Comunidade Europeia o valor estabelecido como padrão é uma distância de visibilidade de 30m (geometria angular), e quanto maior a distância especificada por um órgão ou agência, mais rígida é a exigência da qualidade e, portanto, mais favorável para a segurança viária. Ainda estão associadas a esta questão a idade do condutor, tempo de percepção, velocidade adotada na via, chuva e neblina, fenômenos estes que em certas condições podem ser desfavoráveis à percepção da sinalização.

Zwahlen e Schnell (2000) realizaram um estudo para verificação dos valores mínimos necessários de retrorrefletividade com distância de visibilidade de 30 metros por meio do sistema computacional *Computer Aided Road Marking Visibility Evaluator*. A simulação foi realizada com veículo de passeio tipo sedan, farol baixo, rodovia de pavimento asfáltico antigo, tempo de reconhecimento de 3,5 segundo e a sinalização horizontal composta somente por pintura e microesferas (Figura 10). Ainda neste estudo, propuseram que os valores mínimos necessários podem ser reduzidos com a inserção de outros dispositivos na via como tachas refletivas.

Figura 10 – RI mínima necessária com tempo de reconhecimento de 3,5s.

Fonte: adaptado de ZWAHLEN e SCHNELL (2000)

2.2.4 Equipamentos para medida de retrorefletividade

Para a medição da retrorefletividade são utilizados equipamentos conhecidos como retrorefletômetros. Estes equipamentos emitem luz sobre a demarcação do pavimento com um determinado ângulo de incidência e captam o quanto desta luz retorna em uma câmera fechada, medindo o coeficiente de luminância retrorefletida (RI) em milicandelas lux por metro quadrado. Existem diversos equipamentos que diferem basicamente por sua geometria angular (12,15 ou 30m equivalentes de distância de visibilidade entre motorista e a demarcação pela sinalização horizontal).

Existem retrorefletômetros portáteis (Figura 11) e os dinâmicos (Figura 12). Os equipamentos portáteis possuem a facilidade do transporte, armazenagem dos dados e leituras rápidas. Algumas marcas fornecem o equipamento com tecnologia LED em seu sistema ótico, tornando o equipamento mais seguro quanto à manutenção, porém devem ser tomados cuidados quanto ao local de coleta e segurança do operador enquanto utiliza o equipamento na via. Os equipamentos dinâmicos também conhecidos como *Mobile Retroreflectivity Unit* (MRU), são retrorefletômetros que são acoplados em veículos, com sistema de localização, aquisição de dados, sistema de emissão que permita gerar uma superfície luminosa e sistema de recepção de fluxo luminoso; o veículo deve permitir ao

operador manter com precisão o alinhamento do aparelho sobre a demarcação (DNIT 409/2017).

Figura 11 – Retrorrefletômetro Portátil - Modelo Nacional

Fonte: EASYLUX 2016

Figura 12 – Retrorrefletômetro Dinâmico

Fonte: CHOUBANE *et al*, 2013

Atualmente equipamentos com geometria de 12 metros não têm sido utilizado no Brasil, pois a legislação vigente adotada pelo Programa Nacional de Segurança e Sinalização Rodoviária - BR-LEGAL adota refletômetros com geometria de 15 metros, conforme procedimento estabelecido pela NBR 15423 - Sinalização Horizontal Viária - Avaliação da retrorrefletividade utilizando equipamento manual com geometria de 15 metros (DNIT, 2013).

O uso do equipamento dinâmico é especificado pela NBR 16410:2016 - Avaliação da retrorrefletividade utilizando equipamento dinâmico com geometria de 15m ou 30m. Recentemente, o DNIT, por meio do Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR, disponibilizou uma atualização das normas técnicas, onde contempla o uso do retrorrefletômetro dinâmico: DNIT 409/2017- Medida da retrorrefletividade com uso de equipamento dinâmico - Procedimento.

2.2.4.1 Geometria de 15 metros

Equipamentos com ângulo de observação de 1,5° e ângulo de incidência de 86,5° são instrumentos com geometria de 15 metros. A NBR 15423 define os procedimentos para avaliação da retrorrefletividade com equipamento manual para geometria de 15 metros (Figura 13) (ABNT, 2013).

Figura 13 – Geometria de 15 metros – Ângulo de Incidência e Distância

Fonte: Adaptado de MOREIRA e MENEGON, 2003

2.2.4.2 Geometria de 30 metros

A geometria padrão adotada pela ASTM E1710 utilizada para medição da retrorefletividade da demarcação do pavimento propõe uma altura de 1,20m da altura do observador (ângulo de observação), altura do farol a 0,65m (ângulo de incidência), olhando para um determinado ponto 30 metros à frente do veículo - distância de visibilidade, o que resulta em um ângulo de entrada de $88,76^\circ$ e um ângulo de observação de $1,05^\circ$ - Figura 14 (ASTM, 2011). A ABNT 16307:2014 define os procedimentos para a avaliação da retrorefletividade utilizando equipamento manual para geometria de 30 metros.

Figura 14 – Geometria de 30 metros – Ângulo de Incidência e Distância

Fonte: Adaptado de MOREIRA e MENEGON, 2003.

2.2.5 Visibilidade Diurna

A visibilidade diurna é a propriedade da marcação viária que descreve o brilho de sua cor durante o dia. Marques (2016) explica que este parâmetro representa o brilho de uma

marcação rodoviária conforme é observada pelos condutores de um veículo motorizado em condições da luz do dia típicas ou médias ou em condições de iluminação pública.

A medição da visibilidade diurna de uma demarcação é especificada pelo Comitê Europeu de Normalização - CEN EN 1436/2007 e a norma ASTM E2302/16, normas que definem o coeficiente de luminância sob iluminação difusa - QD.

Ambas as normas, tanto europeia CEN como americana ASTM, medem o QD de acordo com uma escala de luminância com ângulo de observação de 2,29°, sendo a distância de observação de um motorista a 30 metros (Figura 15). A norma ASTM E 2302/16 define como Coeficiente de luminância sob iluminação difusa - Qd, como a Razão de Luminância - L, em uma determinada direção de visualização pela Iluminância de iluminação difusa (E) sobre o plano de uma superfície (Equação 02), expressa em milicandelas lux por metro quadrado ($\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$)

$$QD = \frac{L}{E} (\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}) \quad (02)$$

Figura 15 – Geometria Visibilidade Diurna - 30 metros

Fonte: Adaptado de ASDRUBALI, 2013.

Moreira e Moreira (2009) explicam que em outros países da América Latina como no Chile já são utilizados métodos para avaliação do QD, calculando o fator de contraste (Equação 03), medindo a luminância da faixa (L_m) e a luminância do Pavimento (L_C), e calcula-se o fator de contraste (RC), devendo este ser maior ou igual a 1,7.

$$RC = \frac{Lm - Lc}{LC} \quad (03)$$

No Brasil, a norma DNIT 409/2017 define o contraste como a relação da luminância da demarcação em relação à luminância de seu ambiente, medida da posição do motorista, sendo um parâmetro indicador de como os objetos se destacam de seu fundo. A mesma norma não estabelece valores mínimos aceitáveis como parâmetro e nem especifica o controle de qualidade desta medida. Também já é possível encontrar no Brasil equipamentos para a medição do QD em $mcd.m^{-2}.lx^{-1}$. Alguns modelos de retrorrefletômetros são capazes de medir a RI de 15 e 30 metros (dupla geometria), bem como a QD - visibilidade diurna.

2.2.6 O efeito da água na retrorrefletividade

Nas rodovias para uma máxima retrorreflexão da demarcação horizontal, a condição ideal é em pista seca, no entanto, a retrorrefletividade pode ser afetada quando as condições climáticas adversas são introduzidas, mais especificamente na presença de água, quando ocorrem chuvas. Durante a chuva, uma película de água recobre a demarcação horizontal, fazendo com que a retrorrefletividade reduza rapidamente, isso ocorre porque o filme de água recobre as microesferas da demarcação, impedindo que a luz do farol alcance o elemento refletor (microesferas). A água na superfície da pintura aumenta a reflexão especular, a luz reflete na direção oposta, causando o efeito espelho (PIKE, SCHWENN 2012). Para amenizar o efeito da perda da retrorreflexão, isto é, perda da visibilidade noturna devido à película de água sobre a demarcação horizontal, é comum utilizar microesferas grandes, que oferecem uma adequada retrorrefletividade seca e úmida. Neste tipo de demarcação, com microesferas grandes a película de água não a recobre totalmente (SCHNELL, AKTAN, and LEE 2003; e GREYSON, 2016).

Existem duas especificações diferentes para avaliação da retrorrefletividade com a presença de água: em condição molhada (*condition of wetness*) e chuva simulada (*rain*).

- i. Condição molhada (*condition of wetness*): a norma ASTM 2177:2011 e CEN 1436:2007 avaliam a condição da retrorrefletividade na demarcação pós chuva, com o pavimento ainda úmido. A demarcação deve ser molhada com o auxílio de

um pulverizador manual ou balde, (ambos os métodos devem ser equivalentes na representação da condição molhada no pavimento), e com o retrorrefletômetro portátil é medido a retrorrefletância após determinado tempo em segundos após a simulação da chuva, este método também é descrito como método de recuperação da retrorrefletividade. Embora as duas normas estejam avaliando a mesma condição, elas se diferem de algumas maneiras como o método para aplicação e volume de água no pavimento, e o tempo de recuperação pós chuva em segundos (PIKE e SCHWENN, 2012; ASTM, 2011b e CEN, 2007).

- ii. Chuva simulada (*rain*): A norma ASTM 2176:2013 determina o procedimento para a avaliação da retrorrefletividade da demarcação horizontal sob condição de chuva continua utilizando um retrorrefletômetro portátil do tipo de feixe externo normatizado ASTM 1710. A marcação do pavimento deve ser molhada continuamente com um pulverizador, o fluxo de água deve ser uniforme, com duração controlada. O resultado é expresso em R_{L-n} , onde n (número de leituras) é polegadas/hora (pol/h).

2.2.7 Equipamento para medição da Resistência a Derrapagem

A resistência à derrapagem é uma avaliação superficial do atrito entre a superfície do pavimento e o pneu, em pavimento molhado. A aderência em pista molhada é um importante parâmetro para a avaliação da segurança viária. A medida pontual é realizada por meio do equipamento portátil Pêndulo Britânico (Figura 16). Este equipamento é munido de braço móvel, com a extremidade recoberta por uma sapata de borracha, que, em queda livre, é atritada contra a superfície do pavimento previamente umedecido –o valor encontrado é o VRD - Valor de resistência a derrapagem. A perda de energia devido ao atrito faz com que a sapata se posicione no quadrante oposto, em altura diferente do original, ou seja, a sapata não leva o braço a 180° do ponto inicial devido ao atrito. Após passagem pela superfície, a posição máxima onde o pêndulo atinge é registrada por um valor (VRD) existente em uma escala no disco metálico, marcado por um braço auxiliar que se desloca com o braço do pêndulo, porém não retorna com o braço da sapata à posição original.

Figura 16 – Pêndulo Britânico

Fonte: Wessex, 2017.

A norma CEN EN 1436/2007 contempla uma avaliação da resistência à derrapagem da pintura de sinalização, onde prevê classes de VRD - Valor de Resistência à Derrapagem. Os ensaios são realizados de acordo com a norma ASTM E303.

Tabela 1– Valor de Resistência à Derrapagem - VRD - CEN EN 1436

Valor de Resistência à Derrapagem	
Classe	VRD - Valor
S0	Não há requisitos
S1	≥45
S2	≥50
S3	≥55
S4	≥60
S5	≥65

No Brasil a exigência da avaliação da resistência à derrapagem fica a critério do contratante, não sendo obrigatório este tipo de verificação. A norma ABNT 15405: 2016 faz referência que quando solicitado pela contratante a resistência à derrapagem nas faixas de demarcação horizontal pode ser aumentada com a adição de grãos abrasivos de vidro junto com as microesferas. Os grãos abrasivos devem atender a uma granulometria definida, além de serem tratados quimicamente para aderência, com o mesmo revestimento utilizados nas microesferas. A caracterização dos grãos abrasivos e avaliação do desempenho do VRD devem ser realizadas de acordo com a norma ABNT 16184:2013. A avaliação é feita com classes de desempenho idêntica à Tabela 1 que

corresponde à norma europeia, sendo que a mesma norma salienta que o método de ensaio não é válido para todos os tipos de demarcação horizontal. Embora este tipo de avaliação não seja comumente utilizado no Brasil nas demarcações horizontais, entende-se que valores baixos podem provocar escorregamento e deslizamentos quando utilizados em travessias de pedestres (demarcação de grandes áreas), onde ocorre frenagem de ciclistas e motocicletas. Os monitoramentos do VRD sobre pinturas de sinalização também podem indicar o desgaste da pintura de sinalização, tendendo a aumentar devido aos efeitos do tráfego, que provocam desprendimento das microesferas.

Nem sempre é possível alcançar um alto valor de resistência à derrapagem e alta retrorrefletividade. Um aumento da quantidade de microesferas na demarcação pode contribuir para uma maior retrorreflexão, e menor resistência ao deslizamento. Uma mesma classe de desempenho especificada pela EN 1436/2007, retrorrefletividade e valor de VRD, são difíceis de serem alcançadas simultaneamente (HIGWAY MARKINGS, 2009).

2.3 MATERIAIS DE SINALIZAÇÃO VIÁRIA

Segundo o FHWA (2013) o desempenho da sinalização viária e a determinação de sua vida útil dependem de numerosos fatores, e a única maneira de determinar tal desempenho é o monitoramento ao longo do tempo de diversas variáveis como o volume de tráfego, a porcentagem de veículos pesados, o tipo de textura do pavimento, condições climáticas, geometria da rodovia, condições de aplicação do material em campo, espessura do filme de aplicação, tipo de microesferas utilizadas, etc. O entendimento da condição de degradação dos materiais de sinalização viária é de primordial importância para a fase de anteprojeto, onde objetiva-se escolher o material adequado a uma determinada condição de via.

2.3.1 Materiais Aglutinantes

Moreira e Menegon (2003) comentam sobre materiais comumente utilizados em sinalização viária como as tintas, termoplásticos ou películas pré-fabricadas (elastoplásticos), e plásticos a frio. A escolha do material mais adequado depende de fatores como: natureza do projeto (provisório ou permanente), volume do tráfego da via, frequência de manutenção, entre outros.

2.3.1.1 Termoplástico

Os termoplásticos são misturas constituídas por veículos (resinas) e partículas sólidas – cargas, pigmentos e microesferas de vidro. O material termoplástico pode ser aplicado por diferentes formas:

- i. Extrudado – o material termoplástico é aquecido para aplicação em temperaturas compatíveis ao seu ponto de fusão. A aplicação é feita com o uso de extrusores manuais ou mecânicos. A norma "NBR 13.132:2013 - Termoplástico aplicado pelo processo de extrusão", especifica seu uso.
- ii. Aspersão – Da mesma forma que o anterior, o material também é aquecido em temperatura compatível ao seu ponto de fusão. Sua aplicação/ pulverização se dá por projeção pneumática e/ou mecânica. Esta técnica também é conhecida como "*hot spray*" e a norma que especifica o seu uso é a "NBR 13159:2013 – Termoplástico aplicado pelo processo de aspersão".
- iii. Pré-formado - Refere-se às películas pré-fabricadas, que são aplicadas diretamente sobre o pavimento com adesão por aquecimento. A norma da NBR 16039:2012 – Termoplásticos pré-formado para sinalização especifica seu uso.

2.3.1.2 Elastoplásticos

Existem também os laminados elastoplásticos que são filmes, películas ou fitas, constituídas de veículos (resinas) e partículas de sólidos – cargas, pigmentos e microesferas de vidro, fornecidos em espessuras pré-determinadas, prontos para aplicação em campo, sendo sua aplicação no pavimento por colagem. A norma "NBR 15 741:2009 – Laminado Elastoplástico para sinalização" especifica seu uso.

2.3.1.3 Plástico a frio

O plástico a frio é um material bicomponente ou tricomponente à base de resina reativa metacrílica pura, cargas minerais e pigmentos aditivos, microesferas de vidro. São aplicadas sobre o pavimento com adição de um agente endurecedor. A norma "NBR 15870:2016 – Plástico a frio à base de resinas metacrílicas reativas (fornecimento e aplicação)", especifica seu uso.

2.3.1.4 Tintas

As tintas são composições líquidas constituídas por algum tipo de veículo que podem ser resinas e solventes, partículas sólidas (cargas e Pigmentos) e aditivos. Fazenda *et al.* (2009) descrevem a tinta como sendo uma composição líquida, geralmente viscosa, constituída de um ou mais pigmentos dispersos em um aglomerante líquido que, ao sofrer um processo de cura quando estendida em uma película fina, forma um filme opaco e aderente ao substrato. As tintas geralmente são compostas por solvente, resina, pigmentos e aditivos (MOREIRA e MENEGON, 2003).

Solvente

Líquido volátil, geralmente de baixo ponto de ebulição, utilizado nas tintas e correlatos para solubilizar ou dissolver a resina, manter todos os componentes em mistura homogênea e controlar a taxa de evaporação. Nas tintas de base aquosa, o solvente é usado como um agente de coalescência, controlando a taxa de evaporação, e proporcionando a formação eficaz do filme. Todos os solventes são voláteis, uns em maior escala do que outros, e podem ser classificados em orgânicos e inorgânicos, sendo o solvente inorgânico a água (solvente universal). Tintas à base de água ou tintas emulsionadas, embora seu principal solvente seja a água, não são totalmente isentas de solvente orgânicos, já que em sua composição é adicionado Álcool (metanol ou etanol) (MOREIRA e MENEGON, 2003). O calor pode também contribuir significativamente na aceleração da saída do solvente, contribuindo diretamente na evaporação e na viscosidade do mesmo, tanto nas tintas com solventes inorgânicos, como tintas com solventes orgânicos. Temperaturas mais elevadas tendem deixar a tinta mais fluida (VDOT, 2012).

Pigmentos

É definido como material sólido finamente dividido, insolúvel no meio. Utilizado para conferir opacidade (poder de cobertura), certas características de resistência e outros efeitos. Podem ser divididos em pigmentos coloridos (que conferem cor à pintura), não coloridos e anticorrosivos (que conferem proteção ao metal). Este último não é aplicado em tintas de sinalização horizontal (FAZENDA *et al.*, 2009). Moreira e Menegon (2003) expõem que os pigmentos que conferem cor e opacidade às tintas são denominados pigmentos ativos, ou simplesmente pigmentos. Já os pigmentos que não conferem cor

(ficam totalmente incolores, quando incorporados à tinta), denominam-se pigmentos inertes, ou cargas, por serem utilizados originalmente com o intuito de baixar os custos da tinta, além de conferir à película um maior volume de sólidos. O VDOT (2012) cita ainda que estes pigmentos inertes além de reduzir o custo, também dão consistência, durabilidade e resistência abrasiva. Estas são propriedades importantes, quando se considera o ambiente em que serão aplicadas e o tráfego que devem suportar. As cargas mais usadas nestas tintas são: calcita, dolomita, talco, quartzo etc.

Aditivos

Os aditivos são ingredientes adicionados à tinta para proporcionar características especiais às mesmas, ou ainda prevenir algum tipo de patologia. Um exemplo de aditivo é o agente anti-espuma, que é aplicado ou misturado em alta velocidade. Normalmente, os aditivos correspondem de 0,1% a 5,0% do total da tinta (VDOT 2012). Exemplos de aditivos são: dispersantes, anti-sedimentantes, anti-pele (formação de filme superficial no recipiente na tinta), secantes e plastificantes. O aditivo confere à tinta uma maior competitividade comercial, já que o uso de diferentes tecnologias pode agregar ao material um melhor comportamento ao produto.

Resina

A resina é a parte não volátil da tinta, que serve para aglomerar as partículas de pigmentos. Esta tem grande importância, pois ela também denomina o tipo de tinta ou revestimento. Exemplo: tinta acrílica, tinta epóxica etc. (FAZENDA *et al.*, 2009).

Tanto em tintas à base de água, quanto tintas à base de outros solventes, existe uma relação ideal de resina e volume de pigmentos. Se esta concentração for excedida, a resina não será capaz de ligar os pigmentos, nem as microesferas, podendo até afetar a aderência da película a superfície (VDOT, 2012).

2.3.1.5 Tinta emulsionada em água

As emulsões aquosas acrílicas fazem parte de uma classe muito importante de veículo para tintas, pois combinam as vantagens dos monômeros acrílicos (baixo custo, grande variedade de espécie química que permitem obter polímeros para uma enorme gama de aplicação, facilidade de polimerização, etc.) com o uso de água em substituição aos

solventes orgânicos, sendo assim, possui uma menor capacidade poluidora, pois reduzem o VOC (Componentes Orgânicos Voláteis). As consequências do emprego das emulsões são traduzidas em vantagens econômicas, segurança, facilidade de aplicação, etc. (FAZENDA *et al.*, 2009). No Brasil, a norma que rege seu uso para sinalização horizontal é a ABNT NBR 13.699 – Tinta à base de Resina Acrílica emulsionada em água. Nesta pesquisa empregou-se o uso deste tipo de material no arranjo experimental no Capítulo 3 e Capítulo 4 desta pesquisa.

A tinta à base de água vem sendo comumente empregada em pinturas de sinalização viária. O FHWA (2003) menciona que além de ser uma opção ecologicamente correta, não apresenta variações de comportamento em diferentes superfícies como concreto e asfalto. Babic (2014) relata que um estudo foi realizado na Croácia comparando tintas à base de água e tintas à base de solventes, com as mesmas proporções de microesferas. Três meses após a execução das pinturas em campo, a tinta à base de água apresentou valores de retrorrefletividade superiores quando comparadas a tintas à base de solvente. Babic (2014) cita ainda outras vantagens quanto ao seu uso como: secagem rápida, qualidade das resinas, e aspectos positivos para a saúde humana durante a aplicação, devido à ausência dos produtos químicos e emissões.

Mecanismo de Formação do filme – Tintas emulsionada em água.

A formação do filme ou película é um importante fenômeno, pois caso não ocorra durante o processo de secagem com propriedades satisfatórias, podem ocorrer problemas com o desempenho do material. A formação da película acontece por meio de um fenômeno denominado coalescência, sendo este um fenômeno físico, não acontecendo alteração na natureza química (FAZENDA *et al.*, 2009). Nas tintas emulsionadas, as partículas da resina, que normalmente são esféricas, ficam dispersas no solvente. Com a quebra da emulsão, o solvente (água) evapora, as partículas aglomeram-se formando películas coesas, com bastante plasticidade (MOREIRA e MENEGON, 2003).

A formação do filme depende de alguns fatores (FAZENDA *et al.*, 2009):

- i. Temperatura mínima de formação do filme (TMFF), abaixo da qual a película obtida pode não ocorrer de forma satisfatória.

- ii. A eliminação da água do sistema acontece por evaporação, fenômeno de superfície, e da absorção do substrato que está sendo revestido. A partícula polimérica tem que se fundir (coalescer). Com a saída da água, as partículas tendem a se aproximar e tocarem entre si, conforme ilustrado na Figura 17– Representação esquemática da Coalescência em emulsões. A tinta torna-se como um gel quando a maior parte da água deixou o sistema. Neste momento a maior parte das partículas estão próximas umas das outras e a modificação é irreversível.

Figura 17 – Representação esquemática da Coalescência em emulsões.

Fonte: Adaptado de FAZENDA *et al.*, 2009.

Condições de aplicação das tintas

Além da limpeza do local, a sinalização deverá ser executada quando o tempo estiver com condições ideais, sem ventos excessivos, nem poeiras, ou ainda neblina (MOREIRA e MENEGON, 2003). Para que as tintas apresentem um bom desempenho, devem ser observados alguns cuidados com a temperatura – ABNT NBR 15405:2016:

- a) Temperatura ambiente: é desejável que a temperatura ambiente para pintura se situe na faixa de 10°C a 40°C.
- b) Temperatura de superfície: Deve ser superior a 3°C do ponto de orvalho.
- c) Ponto de Orvalho: É a temperatura na qual a umidade do ar, que está na forma de vapor de água, se condensa, passando para o estado líquido. A ABNT NBR 15405:2016 apresenta uma tabela para a determinação do ponto de orvalho, correlacionado a umidade relativa do ar, e a temperatura ambiente.

2.3.2 Microesferas de vidro

As esferas e microesferas de vidro que são utilizadas em sinalização viária são elementos esféricos de vidro incolor, com características definidas em norma. As esferas de vidro possuem diâmetro superior a 1000µm, e as microesferas com diâmetro inferior a 1000µm. Estas quando adicionadas à pintura de sinalização proporcionam a retrorrefletorização da luz incidente (DNER – EM 373/2000), levando ao motorista uma condução mais segura, uma vez que a luz emitida pelos faróis dos veículos é devolvida ao condutor.

A natureza do vidro para a fabricação das esferas e microesferas são do tipo soda cal e titanato de bário (NBR 16184:2013). Para sua fabricação é comum a utilização de sucata de vidro plano, onde este é moído e submetido a uma temperatura de 1200°C, a uma velocidade regulada. São utilizados fornos verticais com correntes ascendentes de gás aquecido, transformando assim por tensão superficial em esferas e microesferas (SCHWAB, 1999).

As esferas e microesferas devem atender aos requisitos mínimos, como estabelecidos pela NBR 16184:2010 e DNIT EM 373:2000, dos seguintes parâmetros: natureza do vidro, resistência ao cloreto de cálcio, resistência ao ácido clorídrico, resistência à água, resistência ao sulfeto de sódio, teor de sílica, aparência e defeitos, índice de refração, densidade de massa, granulometria, fluidez, aderência, e elementos tóxicos.

Smadi *et al* (2014) comentam que a capacidade de a microesfera de vidro refletir a luz depende de diversos fatores, sendo alguns controlados durante o processo de fabricação da microesfera, e outros durante o processo de aplicação em campo. A Tabela 2 apresenta estes fatores.

Tabela 2 – Fatores que afetam a retrorreflexão da microesfera.

Características de fabricação	Características de aplicação em campo
Esfericidade	Tipo de material aglutinante
Transparência (cor, ou claridade)	Características de superfície do pavimento
Tratamentos químicos	Quantidade e distribuição da microesfera
Índice de Refração	Ancoramento
Granulometria	

Fonte: Adaptado de SMADI et al, 2014

A *American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO*, por meio das normativas M247: 2013 e T346: 2013 estabelecem os procedimentos para a avaliação de algumas propriedades físicas da microesfera como: granulometria, índice de refração, tratamento químico (*moisture proof coating, flotation coating, adhesion coating, coating*).

2.3.2.1 Forma da microesfera de vidro - Esfericidade

Importância da esfericidade da microesfera de vidro

A esfericidade atua como lentes côncavas concentrando os raios de luz em um único ponto focal, localizado na parte posterior próximo ao ponto médio da esfera atingindo assim o material de sinalização viária. Os raios de luz são transmitidos de forma difusa pelos pigmentos. Se não houvesse o material de sinalização viária na base da esfera, a luz iria continuar sua trajetória – Figura 18 (SCHWAB,1999, FWHA 1994):

Figura 18 – Incidência de luz na microesfera

Fonte: Adaptado de SIGNASUL, 2016.

O grau de esfericidade da microesfera também influencia o fenômeno de retrorrefletância. A quantidade de partículas angulares promove a dispersão da luz na direção oposta de incidência - Figura 19 e Figura 20 (MOREIRA e MENEGON, 2003). Embora o processo de fabricação produza esferas redondas, ocorre uma pequena porcentagem de material não esférico - ovoides e angulares, ou ainda esferas aderidas durante o processo de fabricação (VDOT, 2012).

Figura 19 – Esfera Perfeita – Correta refração

Figura 20 – Esfera Imperfeita – Luz dispersa.

. Fonte: Adaptado de MOREIRA e MENEGON, 2003.

Fonte: Adaptado de MOREIRA e MENEGON, 2003.

Termos e definições para análise da forma de partículas

Para analisar a morfologia das partículas, existem uma infinidade de termos, modelos e definições para avaliação da forma da partícula. Os termos que comumente podem ser encontrados para avaliação da forma de partículas são:

- i. Esfericidade (*roundness, circularity, sphericity*)
- ii. fator de forma (*form factor*)
- iii. relação de aspecto médio (*aspect ratio*), etc.
- iv. Angularidade (*angularity*)
- v. Circularidade (*circularity*)

Existem diferentes métodos para avaliação da forma para diferentes tipos de partículas, sendo métodos extremamente morosos, imprecisos, e com baixa reprodutibilidade e representatividade, uma vez que dependem do operador e número significativo de microesferas. Outra dificuldade é a enorme quantidade de expressões matemáticas para descrever e definir os mesmos parâmetros. Atualmente com o surgimento de equipamentos de análise de imagens dinâmicas é possível analisar diversos parâmetros geométricos para as partículas por meio de imagens por fluxo. As análises ocorrem de forma rápida e muito mais precisa, representativa e com excelente repetitividade. A norma ISO 13322: 2006 estabelece os procedimentos para a avaliação da forma de partículas utilizando equipamento de análise de imagens por fluxo dinâmico (HAWLITSCHEK, 2014).

Dois termos que são frequentemente utilizados para análise de forma para microesferas de vidro em marcações de pavimento são esfericidade (*sphericity*) e arredondamento (*roundness*).

Um estudo recente realizado pela NCHRP (2017) para revisão do procedimento normativo da AASHTO PP 74 que avalia a granulometria e a esfericidade (*roundness*) de microesferas de vidro para sinalização viária horizontal propôs a substituição da palavra "*roundness*" para "*shape*" (forma), os pesquisadores acreditam que este termo seja mais apropriado, já que "*roundness*" é uma definição específica. Este estudo foi realizado em conjunto com alguns laboratórios e departamentos de estrada dos Estados Unidos.

Normas e procedimento de análise

A norma ABNT 16184: 2013 avalia a forma da microesfera classificando por defeitos:

- i. partículas não esféricas: unidades ovóides, deformadas ou geminadas (ligadas entre si por fusão)
- ii. partículas angulares: unidades que se apresentam como vidro não fundido /ou quebradas;
- iii. elementos estranhos: unidades não esféricas ou microesferas do tipo soda-cal;
- iv. partículas contendo bolhas gasosas.

A mesma norma prevê um limite máximo aceitável de 30% de defeitos que são classificados como ovóides deformados, geminados ou bolhas gasosas para microesferas do tipo *Premix* (I-B) e *Dropon* (II-A e II-B) (Tabela 3, item 2.3.2.6, pg 57), e no máximo 3% para partículas que podem estar quebradas ou conter vidro não fundido e elementos estranhos. A análise e reconhecimento do defeito é realizado de forma visual com o auxílio de um microscópio ótico utilizando 10g de material.

A norma ASTM D1155:2015 estabelece um procedimento para análise da esfericidade ou redondeza da microesfera por meio do equipamento *roundometer* - Figura 21. As partículas de vidro são separadas mecanicamente em esferas verdadeiras e partículas irregulares por meio de vibração controlada de uma placa de vidro inclinada.

Figura 21 – *Roundometer* para ensaio de arredondamento de mcf de vidro

Fonte: ASTM, 2015

A AASHTO por meio da normativa PP 74:2013 estabelece o procedimento para a determinação da granulometria e parâmetros de forma das microesferas e esferas de vidro (0,15mm a 2,35mm de diâmetro) utilizadas em marcações de pavimento utilizando um mecanismo ótico computadorizado - analisador de partícula dinâmico - Figura 22. Por meio de imagens dinâmicas, o equipamento permite analisar parâmetros 2D e 3D de partículas. O procedimento informatizado diminui a subjetividade, e consequentemente aumenta a confiabilidade durante o processo de medição, de maneira rápida e eficaz.

Figura 22 – Analisadores de Partícula Dinâmicos

(a) Modelo Camsizer

(b) Modelo Microtrac

Fonte: NCHRP, 2017

A AASHTO PP74: 2013, descreve a avaliação dos seguintes parâmetros:

- i. Granulometria de acordo com o tipo de classificação da microesfera estabelecido pela ASTM.
- ii. D10, D50 e D90 - Diâmetro correspondente em que a porcentagem passante de 10,50,90%, indicando a finura da amostra.
- iii. Relação de Aspecto Médio (b/l) ou (T/L): É a razão entre a maior e menor dimensão da partícula em 2D e 3D respectivamente. Para esferas perfeitas, este valor representa 1. Variações entre a menor e maior dimensão da partícula resultam em valores menores que 1. As microesferas de vidro são consideradas circulares ou esféricas quando apresentam valores acima de 0,85 para a relação (b/l) - 2D, para valores de 0,83 para a relação (T/L) - 3D.
- iv. Fator de Forma - SPHT. Também é parâmetro para medir a proximidade de uma partícula com um círculo. Sendo a relação de área da partícula com seu perímetro. Para um círculo perfeito, o valor de SPHT é igual a 1. Qualquer desvio de um círculo resulta em um SPHT inferior a 1. Para as microesferas de vidro, valores acima de 0,93 são considerados circulares.
- v. Porcentagens esféricas e não esféricas: Porcentagem de microesferas que atendem os valores estabelecidos, pode ser determinado por tamanho de peneira, ou tipo de microesfera (média ponderada), bem como as porcentagens que não atendem os parâmetros estabelecidos.
- vi. Parâmetro Relação de Aspecto Médio b/l - valores acima de 0,85
- vii. Parâmetro Relação de Aspecto Médio T/L - valores acima de 0,83
- viii. Parâmetro de Fator de Forma - SPHT - valores acima de 0,93

2.3.2.2 Transparência ou claridade da microesfera

A cor ou claridade das microesferas é uma importante propriedade já que é necessária transparência para que a luz passe pelo vidro através da esfera, e ocorra a difusão da luz. Microesferas mais escuras tendem apresentar dificuldades quanto a passagem da luz e conseqüentemente o fenômeno de retroreflexão. A cor da microesfera é afetada pelo processo de fabricação e o tipo de matéria-prima utilizado. As microesferas que são

perfeitamente esféricas e claras são melhores que as microesferas não esféricas e escuras (FHWA, 1994; TXDOT, 2004 e SMADI, 2013).

A AASHTO, por meio das normativas M247: 2013 e T346: 2013 estabelece os procedimentos para a avaliação de algumas propriedades físicas da microesfera como: granulometria, índice de refração, tratamento químico etc. Características como transparência (cor ou claridade), vazios de ar dentro microesfera não são especificados em nenhum método padronizado, ou ainda intervalo aceitável para avaliação de tais propriedades, embora sejam mencionados como características importantes a serem avaliadas.

A norma federal americana TT-B 1325C (2007) especifica um método visual para avaliação da aparência da microesfera quanto a transparência, limpeza, fluxo livre (sem aglomerações), ausência de bolhas de ar e matéria estranha. A avaliação visual utiliza apenas 10 gramas de microesferas para esta avaliação (*FEDERAL SPECIFICATION*, 1978).

Recentemente a NCHRP (2017) realizou um estudo em parceria com diversos laboratórios americanos, a fim de revisar e atualizar o procedimento normativo da AASHTO PP74:2013. Uma das recomendações finais propostas neste relatório é a inclusão da avaliação da transparência das microesferas de vidro, sendo indicado por diversos Departamentos de Estradas e laboratórios credenciados como uma propriedade importante para refletir a luz. Alguns equipamentos do tipo analisadores de imagem dinâmicos já possuem algoritmos capazes de medir a transparência das microesferas.

2.3.2.3 Ancoramento

Zhang *et al.* (2010) comentam que a profundidade de encaixe, ou seja, o ancoramento da microesfera na tinta tem impacto nos valores de retrorrefletividade da demarcação, pois a quantidade de luz retrorrefletida depende deste parâmetro. O FHWA (2003) esclarece que a ancoragem ideal está entre 50 e 60% do tamanho da microesfera na tinta. A Figura 23 e Figura 24 demonstram o efeito da ancoragem das microesferas e sua retrorrefletividade, onde as microesferas pouco ancoradas (esquerda) e as muito ancoradas (direita) possuem baixa retrorrefletividade.

Figura 23 – Efeito da Ancoragem da microesfera

Fonte: MOREIRA e MENEGON, 2003.

Figura 24 – Grau de ancoramento

Fonte: Adaptado de MOREIRA e MENEGON, 2003.

Um estudo realizado pelo Departamento de Transportes da Virginia - VDOT, 2012 comenta que valores de ancoragem inferiores a 50% do diâmetro das microesferas podem afetar a longevidade da microesfera na pintura, já que podem ser facilmente arrancados através da ação do tráfego. A ancoragem ideal situa-se entre 50 % e 60%, pois permite uma maior longevidade da esfera na tinta, além de permitir uma boa retrorreflexão. A ancoragem da microesfera também está associada à espessura do filme da tinta - Figura 25. Películas muito finas podem ser insuficientes para envolver porcentagem ideal do diâmetro da microesfera. Este estudo do VDOT (2012) cita ainda alguns cuidados que devem ser tomados durante a execução da pintura quanto à aplicação das microesferas, pois o filme de tinta pode “secar” rapidamente, dificultando a ancoragem. Este efeito pode ser notado na Figura 26, logo é possível associar que dentre diversos fatores que afetam a retrorrefletividade estão a qualidade do pigmento da tinta, o ancoramento da microesfera, a espessura do filme de tinta, os cuidados durante a execução da pintura.

Figura 25 – Esferas de vidro com ancoramento deficiente

Fonte: VDOT, 2012.

Figura 26 – Esferas de vidro pouco ancoradas

Fonte: VDOT, 2012.

O FHWA (1994) comenta que as condições climáticas podem afetar o tempo de secagem e consequentemente a profundidade de ancoramento das microesferas. Os altos valores de retrorrefletividade geralmente indicam uma boa ancoragem da microesfera e consequentemente uma maior vida útil (SMADI, 2013).

2.3.2.4 Tratamentos químicos nas microesferas

Para facilitar o manuseio e melhorar a aderência e ancoragem das microesferas nas resinas é comum as microesferas serem tratadas quimicamente. Os três tratamentos mais utilizados são: a revestimento a prova de umidade (*moisture proof coating*), revestimento de adesão (*adhesion coating*) e revestimento de flutuação (*flotation coating*) (SMADI et al, 2013; e FHWA,1994):

- i. Revestimento a prova de umidade (*moisture proof coating*): as microesferas em locais mais úmidos tendem a absorção de umidade, isto ocorre devido grande superfície específica do material. As microesferas ficam todas juntas, caindo em massa, e não individualmente, perdendo a propriedade de fluxo livre. Este tipo de comportamento dificulta a sua aplicação em campo devido a sua aglomeração no tanque ou na pistola de aplicação, obstruindo o equipamento. Este tipo de revestimento aplicado na microesfera, permite que permaneçam fluindo durante sua aplicação, evitando este aglomerado (SMADI, 2013; FHWA,1994). Aqui no Brasil este tipo de revestimento recebe o nome de "tratamento de fluidez".

- ii. Revestimento de adesão (*adhesion coating*): Algumas microesferas podem ter dificuldades para alcançar a profundidade adequada para uma máxima retrorrefletividade - ancoragem, principalmente as microesferas maiores quando comparadas com as microesferas menores. Para uma faixa granulométrica comumente utilizada, 0,85mm (peneira nº20) a 0,18mm (peneira nº100), as microesferas maiores podem aumentar a ancoragem de 30% para 60% (SMADI, 2013).

Uma pesquisa foi realizada a fim de identificar a eficácia do tratamento de adesão nas microesferas. Foram utilizadas microesferas com e sem tratamento em um trecho curvo, onde as demarcações geralmente são utilizadas em um ritmo mais acelerado do que em um trecho em tangente. Após seis meses de teste, as demarcações com microesferas de vidro que receberam o tratamento de adesão ainda permaneceram na tinta em quantidade, enquanto nas demarcações com as microesferas de vidro sem tratamento de aderência uma grande parte foram arrancadas da película de tinta. Figura 27 e Figura 28 (CARNABY, 2006; SMADI, 2013). A espessura da película de tinta também influencia na adesão e correto ancoramento das microesferas (TXDOT, 2004). Aqui no Brasil este tipo de revestimento recebe o nome de "tratamento de aderência".

Figura 27 – Microesferas sem revestimento de adesão

Fonte: CARNABY, 2006

Figura 28 – Microesferas com revestimento de adesão

Fonte: CARNABY, 2006

- iii. Revestimento de flutuação (*flotation coating*): As microesferas de vidro podem ser tratadas com um revestimento que faz com que microesferas grandes e pequenas, flutuem na tinta molhada ao invés de afundarem completamente. Além de proporcionar um encaixe mais consistente, favorece também a retrorrefletividade, já que haveria uma maior exposição de microesferas e por consequência um brilho mais consistente. No entanto se todas as microesferas ficarem expostas, à medida que a película de revestimento é desgastada, não haverá novas microesferas incorporadas na tinta para exposição, logo a vida útil da demarcação não será prolongada. Este tipo de revestimento é recomendado quando se necessita de uma retrorrefletividade inicial alta e quando a durabilidade não é tão importante (FWHA, 1994; SMADI, 2013). Em uma sinalização provisória a durabilidade pode não ser considerada como importante, mas sim a retrorreflexão imediata.

2.3.2.5 Índice de Refração

A quantidade de refração da luz é uma característica do próprio vidro, e é conhecida como índice de refração (IR), dependente da composição química e física do material do vidro. Diferentes tipos de vidro provocam diferentes índices de refração (VDOT, 2012), logo, a qualidade e origem do vidro são fundamentais para uma máxima retrorrefletividade. A ABNT 16184:2013 especifica que as microesferas tenham um índice de refração entre 1,5 e 1,9. O FHWA (2013) comenta que a refletividade também está relacionada com os materiais utilizados para fabricar o vidro. O principal composto da fabricação do vidro é a sílica, porém outras substâncias são adicionadas para simplificar ou reduzir custos do processo de fabricação, incluindo carbonatos, óxidos, subprodutos industriais e vidro reciclado. Embora a reciclagem de materiais e subprodutos possa economizar em matéria-prima e energia, os componentes adicionados podem trazer impurezas ao produto.

2.3.2.6 Granulometria das esferas e microesferas

A granulometria das esferas e microesferas de vidro são uma característica importante a ser observada. Normalmente as faixas granulométricas para microesferas variam entre 0,85 mm e 0,18 mm. Essa variação de tamanho dentro de uma faixa granulométrica é

recomendada com o objetivo de dar retrorrefletividade inicial e mantê-la o maior tempo possível. (VDOT, 2012).

As esferas e microesferas são classificadas conforme demonstrado na Figura 29 de acordo com a NBR 16184:2013:

Figura 29 – Classificação das esferas e das microesferas - Granulometria

Fonte: Adaptado da NBR 16184:2013

Cada tipo de microesfera é especificado para um tipo de uso, além de atender a uma faixa granulométrica específica, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Aplicações e usos das microesferas

Item	Descrição	Tipo	Faixa Granulom. (µm)
1	Estas são incorporadas as massas termoplásticas durante a fabricação, permitindo a retrorrefletividade após o desgaste da superfície da película, quando estas são expostas. Os Tipos V e VI são específicos para trechos sujeitos a condições adversas (chuva e neblina).	I A,	850 - 75
		V	2360-1000
		VI	3350 - 1180
2	São aquelas incorporadas à tinta antes de sua aplicação, permitindo a retrorrefletividade após o desgaste da superfície da película, quando estas são expostas.	I-B	300 - 63
3	São aquelas aplicadas por aspersão, concomitantemente com a tinta ou termoplástico por aspersão ou extrusão, de modo que permaneçam na superfície da pintura quando aplicadas. São específicos para trechos sujeitos a condições adversas (chuva e neblina).	II-A	1000 - 150
		II-B	850-150
		II-C	1000-300
	As esferas II – A e II – B devem receber revestimento para melhorar algumas de suas características como aderência as resinas, reforço mecânico do sistema de demarcação, aumento da retrorrefletividade inicial, além de receberem tratamento para aumentar a fluidez durante a utilização.	II-D	1000-212
		III	1700-71
	As esferas II- C, II – D, III e IV devem receber um revestimento para aumentar a aderência a cada tipo de sistema de demarcação. A utilização destas esferas e microesferas em tintas ou termoplásticos associadas ou não a aplicação concomitante a esferas II – A e II – B, requer o uso de microesferas I – B no caso de tintas e no caso I – A em termoplásticos.	IV	2360 - 1000
4	São aplicadas por aspersão concomitantemente com a tinta, ou termoplástico por aspersão ou extrusão, de modo que permaneçam na superfície da película permitindo a imediata refletividade. São particularmente especificadas para pistas de aeroportos e/ou locais onde a demarcação deva ser maximizada.	VII	1180 - 300

Fonte: ABNT 16184:2013

A especificação de Material do DNIT – 373/200, diferente da NBR 16184:2013, não possui esferas em sua especificação, somente microesferas. Este classifica microesferas com os seguintes termos:

- i. “*Innermix*” (Tipo I–A) – especificada para o mesmo tipo de aplicação que a NBR 16184:2013;
- ii. “*Premix*” (Tipo I – B) – especificada para o mesmo tipo de aplicação que a NBR 16184:2013;
- iii. “*Drop-On*” Tipo F (Diâmetro de 1000µm-190µm – Tipo II-A) – São aquelas aplicadas por aspersão, junto com a tinta ou material termoplástico, de modo que permaneçam na superfície da película formada pelo material, e que garanta uma imediata retrorrefletividade. Eventualmente, estas podem receber um revestimento químico para melhorar algumas de suas características como: aderência ao tipo de resina empregada na tinta, aumento da retrorrefletividade inicial e aumento da fluidez durante sua utilização.
- iv. “*Drop-On*” Tipo G (Diâmetro de 1000µm-30µm – Tipo II-C) - São aplicadas por aspersão, junto a tinta ou material termoplástico, de modo que permaneçam com a superfície e garanta uma imediata retrorrefletividade. Esta granulometria deve receber um tratamento para melhorar sua aderência, e pode ser utilizada concomitantemente com a do Tipo F, aumentando a retrorrefletividade inicial, neste caso dispensam a do tipo *Premix* (Tipo I-B).

A Tabela 4 demonstra a correlação entre as granulometrias das esferas e microesferas de vidro da norma DNER EM 371/2000 e a ABNT 16184/2013, sendo possível observar que a granulometria é a mesma, diferenciam entre si, somente a nomenclatura das mesmas.

Tabela 4 – Correspondências entre as normas ABNT e DNER - Granulometria

Granulometria das Esferas e Microesferas e Microesferas													
			Classificação ABNT - 16184/2013										
N°	Abertur a mm	Abertur a µm	Tipo I		Tipo II				Tipo III	Tipo IV	Tipo V	Tipo VI	Tipo VII
			A	B	A	B	C	D					
6	3,35	3350										100	
8	2,36	2360									100	95 - 100	
10	2	2000								100	95 - 100	80 - 95	
12	11,7	1700							100	95 - 100	80 - 95	10 - 40	
14	1,4	1400							95 - 100	80 - 95	10 - 40	0 - 5	
16	1,18	1180							80 - 95	10 - 40	0 - 5	0 - 2	100
18	1	1000			100		100	100	10 - 40	0 - 5	0 - 2		
20	0,85	850	100		96 - 100	100	90 - 100	95 - 100	0 - 5	0 - 2			95 - 100
25	0,71	710							0 - 2				
30	0,6	600	90 - 100		75 - 95		10 - 30	85 - 100					55 - 75
40	0,425	425				90 - 100							15 - 35
50	0,3	300	18 - 35	100	9 - 35		0 - 5	0 - 10					0 - 5
70	0,212	212		85 - 100		0 - 10		0					
80	0,18	180			0 - 5								
100	0,15	150	0 - 10	15 - 55		0 - 5							
140	0,106	106											
200	0,075	75	0 - 2										
230	0,063	63		0 - 10									
			Classificação DNER - EM 373/2000										
			Innermix	Premix	Drop on Tipo F	-	Drop on Tipo G	-	-	-	-	-	-

Fonte: Adaptação DNER 373/2000 e ABNT 16184/2013

2.3.2.7 Formas de Aplicação das microesferas

Moreira e Menegon (2003) comentam que dependendo da microesfera, esta pode ser aplicada de diferentes maneiras, e que sua aplicação deve ocorrer de forma correta para obter um máximo de retrorrefletividade. Os mesmos autores comentam ainda que as microesferas podem ser aplicadas:

- a) Incorporadas à tinta durante do processo de fabricação.

As microesferas do Tipo I são incorporadas às tintas, mais precisamente a do Tipo I-A; e as microesferas do tipo V e VI são utilizadas em trecho com situações adversas de clima, especificamente para termoplásticos. Estas oferecem retrorrefletorização apenas após o desgaste da película.

- b) Incorporadas à tinta antes de sua aplicação.

As microesferas do tipo I-B “*Premix*” são adicionadas à tinta antes de sua aplicação em campo, sendo diluídas no reservatório de tintas - Figura 30. Estas oferecem retrorrefletorização após o desgaste da película. Os valores comumente empregados são de 200g/L a 250g/L (DNIT- EM 371/2000).

Figura 30– Microesfera do Tipo I-B “*Premix*” sendo adicionada no reservatório

c) Aspersão

Estas são espalhadas na superfície da película, por meio de dispositivos de pressão pneumática, por pressão direta, ou sucção. Os espalhadores (pistolas) devem estar alinhados com a pistola da pintura e com uma distância conveniente para que ocorra uma perfeita ancoragem das microesferas sobre a película, ressaltando cuidados com a pressão, vazão e calibração das pistolas injetoras - Figura 31. Para este tipo de aplicação, ainda podem ser combinadas diferentes granulometrias para uma mesma pintura - técnica conhecida como dupla aspersão.

Figura 31 – Microesferas sendo aplicadas por dupla aspersão

d) Gravidade

As esferas são deslocadas por um silo de armazenagem das máquinas, ou de carrinhos manuais, através da sua própria massa e distribuídas sobre as faixas através de espalhadores apropriados.

e) Manualmente

As microesferas de vidro são distribuídas sobre o material recém-aplicado de forma manual. Este método não permite uma perfeita ancoragem e distribuição do material à película, além de ocorrer desperdícios de microesferas quando estas não atingem a película.

2.4 DEGRADAÇÃO DA PINTURA DE SINALIZAÇÃO VIÁRIA

Thamizharasan *et al.* (2002) apresentam três padrões básicos de decaimento ou degradação da retrorrefletividade ao longo do tempo. A Figura 32 ilustra uma curva de retrorrefletividade para demarcações novas (recém aplicadas): inicialmente a retrorrefletividade aumenta porque as microesferas em excesso, que encobrem as ancoradas, ou ainda aquelas pouco ancoradas são removidas após a liberação ao tráfego, e depois ascende até um valor de máximo antes de reduzir em função do tempo e ao desgaste.

Figura 32 – Padrão representativo para demarcações recém aplicadas

Fonte: adaptado de THAMIZHARASAN *et al.*, 2002.

A Figura 33 ilustra a degradação de demarcações mais antigas, para períodos maiores que 300 dias. Para demarcações mais antigas, sendo representada por uma linha reta,

que gradualmente diminui, a inclinação da curva diminui quando atinge valores de 50 a 60 $mcd.m^{-2}.lx^{-1}$ até quase se tornar assintótica.

Figura 33 – Padrão representativo para demarcações com mais de 300 dias

Fonte: adaptado de THAMIZHARASAN *et al.*, 2002.

A Figura 34 ilustra o terceiro padrão demonstrado por Thamizharasan *et al.* (2002), onde representa padrões visíveis de mudança de comportamento devido a uma atividade de manutenção - reestabelecimento da pintura, ou ainda queda da retrorefletividade após um período de neve.

Figura 34 – Padrão representativo para mudanças repentinas

Fonte: adaptado de THAMIZHARASAN *et al.*, 2002.

A durabilidade da sinalização horizontal está associada a diversos fatores como: material utilizado na demarcação, espessura da película, controle de qualidade, tipo e textura

superficial do pavimento, atividade de manutenção, posição da demarcação (linhas de centro e bordo)., ação climática, cor do material, ação do tráfego (volume e composição do tráfego). (THAMIZHARASAN *et al*, 2002; BENZ *et al*, 2009).

2.4.1 Espessura da película de tinta

Benz *et al* (2009) explicam que a espessura está diretamente relacionada com a durabilidade da demarcação. As pinturas realizadas com tinta à base de água geralmente são utilizadas caminhões com pistolas do tipo "spray" e que a espessura da tinta pode ser controlada variando a velocidade do caminhão e a taxa de saída da pistola. Espessuras de tinta maiores também facilitam o uso de microesferas maiores, favorecendo a visibilidade durante a noite sob condição molhada (retrorefletividade molhada).

Uma aplicação mais espessa da tinta só será efetiva se permanecer aderida a superfície do pavimento mantendo sua ligação com as microesferas. (FHWA, 1994). Um estudo realizado pelo Departamento de Estradas do Texas - TxDOT (2003), demonstrou que o aumento da espessura do material termoplástico tem um efeito positivo na retrorefletividade a longo prazo. A Figura 35, traz os resultados obtidos para material termoplástico para um pavimento novo, sem pintura anterior. A degradação do material não foi tão significativa para espessuras de películas maiores que 2,33 milímetros, onde demonstrou um nivelamento das medidas de retroreflexão após os 270 dias, indicando uma maior retenção das microesferas de vidro. O tipo de revestimento do pavimento foi definido como "*seal coat*", técnica aplicada para melhorar somente a camada superficial de um pavimento. As leituras da medida de retrorefletividade foram realizadas em uma marcação de linha de bordo na cor branca (FHWA,2003).

Figura 35 – Durabilidade de RL para diferentes espessuras de termoplástico

Fonte: adaptado de FWHA, 2003

2.4.2 Ação climática sobre a demarcação

O FHWA (1994) menciona que a integridade da demarcação pode sofrer pelo menos três mecanismos diferentes de falha: perda de material por desgaste abrasivo, falha coesiva na camada da tinta (dentro da camada de tinta) e falha adesiva entre a tinta e a superfície (Interface). Como mecanismos que contribuem para a falha do material, quer seja por dano na coesão da camada de tinta, ou adesão da camada à superfície, são mencionados os ciclos de temperatura e umidade, ataque químico de sais e ácidos, e danos causados por radiação luminosa, ataque de solventes tais como gasolina e óleo etc.

Benz *et al* (2009) citam que as demarcações costumam degradar devido à exposição da luz solar e raios ultravioleta, levando à oxidação e ao envelhecimento da sinalização horizontal e, como consequência, a perda de microesferas, perda de material, mudança na cor do pigmento. Eles também observaram que os eventos associados à neve (gelo, limpeza etc.) também resultam em uma perda significativa tanto de microesfera, quanto de material.

Hummer *et al.* (2011) comentam sobre a dificuldade de modelar os efeitos climáticos sobre a demarcação e a degradação da retrorrefletividade com a ação da neve, variação de temperatura e precipitação, ou ainda os efeitos individuais destes fatores no desempenho das demarcações. Os autores estudaram três regiões diferentes para avaliação do efeito climático, porém não encontraram evidências estatisticamente significativas para demonstrar o impacto da região na degradação da demarcação, no caso específico de uma demarcação termoplástica, devido às grandes variações de RI para um mesmo local.

Salles *et al.* (2015) observaram em seu estudo que a chuva produz uma ação benéfica na pintura de sinalização viária e que, graças à interação dos pneus com a água, remove a sujeira depositada na pintura e nas microesferas que estão expostas, potencializando desta forma a retrorrefletividade e a coloração "alva" da demarcação. Salientam ainda que esta melhoria fica restrita a um intervalo de tempo, mascarando o declínio da retrorrefletividade. Figura 36 demonstra que os picos de aumento de retrorrefletividade e a precipitação acumulada são coincidentes no gráfico de retrorrefletividade em função do tempo. Os mesmos autores também avaliaram diferentes posições das marcações (linhas de bordo, linhas transversais a pista, linhas simples seccionadas) com dois materiais diferentes (tinta acrílica e material termoplástico.). Este efeito também já havia sido observado pelo Departamento de Estradas do Texas - TxDOT (FHWA,2003), comentam que a chuva pesada tem maior eficácia na limpeza da pintura. Benz et al (2009) salientam que podem ocorrer acúmulos de sujeiras em alguns pontos específicos da demarcação e a ação da chuva pode não ser eficiente para a limpeza da demarcação.

Figura 36 – RI (15m) em função do tempo e precipitação acumulada.

Fonte: SALLES *et al.*, 2015

2.4.3 Material utilizado na demarcação

A qualidade e longevidade da marcação horizontal no pavimento dependem de diversas características, como já citadas anteriormente. Abboud e Bowman (2002) comentam que para fins de controle e estimativa de durabilidade de diferentes materiais, as agências norte americanas costumam considerar como duração razoável de 6 a 12 meses para tintas e de 3 a 7 anos para termoplásticos, sendo comum o uso destes materiais, porém estas estimativas dependem de diversos fatores como tráfego, clima, etc.

Sitzabee, White, and Dowling (2013) comentam que nos Estados Unidos aproximadamente 83% dos materiais comumente nas rodovias são tintas e termoplásticos. Nas rodovias secundárias, aquelas com baixo volume de tráfego é comum o uso de tintas enquanto nas rodovias primárias ou de maior volume de tráfego os termoplásticos são frequentemente aplicados.

Babić, Burghardte Prusa (2014) em uma pesquisa avaliaram a resistência à abrasão de três diferentes tipos de tintas de sinalização viária à base de água e de solvente utilizando

um equipamento de desgaste – *Taber Abraser*. A Figura 37, apresenta os resultados de perda de material em porcentagem (aglomerante) em função da quantidade de ciclos necessários para o desgaste. A tinta denominada como padrão à base de solventes apresentou um fraco desempenho quando comparados com tintas à base de água.

Figura 37 – Desgaste por abrasão para diferentes tipos de tintas

Fonte: adaptado de ICTTE, 2014

2.4.4 Tipo de Pavimento e textura superficial

Zhang et al (2013) realizaram um estudo comparando a durabilidade da retrorrefletividade da sinalização horizontal em duas rodovias na Carolina do Norte (EUA) com texturas superficiais diferentes. As peculiaridades referentes a diferença de texturas superficiais ocorrem devido ao tipo de mistura aplicada como revestimento na rodovia, sendo neste estudo em questão uma mistura asfáltica preparada em usina (menos rugosa), e a outra conhecida como tratamento superficial (mais rugosa). Em locais com texturas superficiais mais altas ou mais rugosas (tratamento superficiais) necessitam ser substituídas frequentemente quando comparados com texturas superficiais menos rugosa - misturas usinadas.

Os níveis de retrorrefletividade costumam ser maiores em pavimentos asfálticos quando comparados a pavimentos de concreto. Sasidharan, Karwa e Donnell (2009) sugerem que esta diferença de retrorreflexão costuma ser até 30%.

Hawkins e Smadi (2011) realizaram um levantamento em diferentes cidades do Texas onde são aplicados dois tipos revestimento asfálticos, um conhecido como *seal coat* (revestimento utilizado empregando agregados graduados, cimento e emulsão asfáltica) e o outro HMAc (*Hot Mix Asphalt Concrete* - concreto asfáltico) - Figura 38 (a) e (b). Os autores destacam que superfícies mais rugosas (*seal coat*) apresentam valores de retrorrefletividade mais baixos, quando comparados com superfícies mais lisas (HMAc), utilizando o mesmo material de marcação. As leituras de acompanhamento da retrorrefletividade em superfícies mais lisas (HMAc) são mais uniformes quando comparadas com as superfícies mais rugosas (*seal coat*). O aumento da espessura da película da tinta nas superfícies rugosas tem pouco efeito na retrorrefletividade inicial, porém a longo prazo tem um efeito significativo.

Para o revestimento *seal coat* observaram outras características:

- a) Rápida deterioração da retrorrefletividade para termoplásticos;
- b) Dificuldade de recobrir todos os agregados quando foi empregada espessura padrão de termoplásticos pulverizados;
- c) O termoplástico é facilmente arrancado ou desgastado nas pontas dos agregados;
- d) Quando os agregados saem retiram uma pequena parte da marcação.

Figura 38 – Termoplástico sobre *seal coat* (esquerda) e HMAc (à direita)

(a) marcação recém aplicada

(b) marcação após 2 anos de aplicação

Fonte: HAWKINS e SMADI (2011)

2.4.5 Atividades de manutenção

No Brasil costumam acontecer atividades de manutenção quando a retrorrefletividade residual está próxima ao valor limite estabelecido, indicando a necessidade de intervenção. Nos países de clima temperado, no inverno, a neve que fica sobre a rodovia precisa ser removida. Esta atividade de remoção também afeta a retrorrefletividade da sinalização horizontal. A Figura 34 ilustra o padrão das curvas de retrorreflexão em função do tempo onde ocorrem atividades de manutenção, padrão proposto por Thamizharasan *et al.* (2002)

2.4.6 Controle de qualidade durante a aplicação

O Departamento de Estradas do Estado da Virginia - VDOT elencou alguns problemas recorrentes durante a aplicação de microesferas de vidro onde estão apresentados na Tabela 05 e problemas associados a tinta estão apresentados na Tabela 06.

Tabela 5 – Resolução de Problemas associados a aplicação de microesferas

Problema	Causa	Efeito	Solução
Distribuição desigual de microesferas	Pistola de aplicação fora do alinhamento; Pistola entupida	Baixa retrorrefletividade	Ajuste ou alinhamento da pistola; Calibração e desentupimento da pistola
Excesso de microesferas	Desgaste do orifício de passagem das microesferas	Baixa retrorrefletividade (ocorre a sobreposição das microesferas e um sombreamento entre as mesmas)	Troca de Pistola de aplicação de microesferas Diminuir Pressão da Pistola durante;
Esferas centralizadas na faixa de pintura	Pressão do tanque baixa; Controle de pressão da pistola não ajustado;	Baixa retrorrefletividade	Aumentar pressão da pistola; Ajuste de parafuso de controle;
Microesferas totalmente embutidas (afundadas)	Pistola muito próxima da pintura; Ângulo da pistola muito raso; Película de tinta espessa;	Baixa retrorrefletividade	Ajuste do ângulo da pistola; Ajustar a espessura da película de tinta; Correção da altura da pistola;

Fonte: adaptado de VDOT(2012)

Tabela 6 – Resolução de Problemas associados a aplicação de tintas

Problema	Causa	Efeito	Solução
Espessura excessiva da película de tinta	Pressão do tanque de tinta muito alto;	Microesferas totalmente embutidas	Reduzir pressão do tanque;
	Controle de volume da pistola de pintura muito aberto;	Baixa retrorrefletividade	Ajustar o volume da pistola;
	Pressão da bomba alta;	Tempo de secagem lenta;	Reduzir pressão da bomba;
	Velocidade do aplicador baixa	A tinta não cura corretamente, menor tempo de serviço;	Aumentar velocidade;
Espessura insuficiente	Pressão do tanque de pintura baixa;		Aumentar pressão do tanque;
	Controle do volume da pistola de pintura (abertura);	Vida útil reduzida;	Ajustar o controle da abertura da pistola;
	Pressão da bomba;	Falta de espessura para uma melhor ancoragem das microesferas;	Diminuir velocidade;
	Acúmulo de material na pistola;	baixa retrorrefletividade	Limpeza da ponta da pistola;
	Acúmulo de material no filtro e/ ou encanamento		Limpeza no filtro e / ou encanamento;
Linha de pintura sem secagem			Sinalizar a rodovia para a correta secagem (cones);
	Temperatura da superfície do pavimento muito baixa;	Dificuldades de liberação ao tráfego;	Reduzir a temperatura do material;
	Material superaquecido;	Devido a não secagem da tinta, sujeito a adesão da tinta no pneu e	Para as aplicações ate que ocorram condições ambientais favoráveis;
	Alta umidade do ambiente;	consequentemente novas marcas no pavimento;	Verificação da temperatura de superfície;
	Material com data de validade vencido;		Verificar a idade do material antes da aplicação (data de validade)
Linha de pintura larga	Pistola de pintura muito alta;	Não atendimento aos padrões estabelecidos;	Baixar a pistola;
	Ponta da pistola desgastada;	Linhas com bordas difusas;	Reparação ou substituição da pistola;
Linha de pintura estreita	Pistola muito baixa;	Não atendimento aos padrões estabelecidos;	Levantar a pistola;
	Ponta da pistola entupida;	Linha com baixa visibilidade quando comparada com a linha padrão;	Reposicionar o ângulo da pistola;
	Ângulo de posição incorreto;		Limpeza da ponta da pistola;
Linha de pintura irregular	Pressão do tanque baixa;	Tinta não flui suavemente;	Aumentar a pressão do tanque;
	Tinta velha (alta viscosidade)	Má aparência da pintura;	Verificar a idade do material antes da aplicação (data de validade)
		Tempo de secagem lento;	

Fonte: adaptado de VDOT(2012)

2.4.7 Posição da demarcação

No experimento de Salles *et al.* (2015) para uma melhor compreensão da perda de retrorrefletividade da pintura do pavimento, analisou-se o desgaste da demarcação e sua correlação com sua posição na pista. Observou-se que nas demarcações transversais o desgaste é mais canalizado nas trilhas de roda devido à passagem de pneus em pontos específicos. A retrorrefletividade é levemente maior nas linhas de eixo do que nas linhas de bordo, devido à ação abrasiva dos pneus, já que nas linhas de bordo ocorre um acúmulo de sujeira. Os autores concluíram ainda que o desempenho da retrorrefletividade é função não somente do tipo de material, mas também da posição da demarcação, da ação do tráfego.

Sathyanarayanan, Shankar e Donnell (2008) encontram efeito semelhante em um experimento realizado na Pensilvânia e com publicação de dados pela NTPEP – *National Transportation Product Evaluation Program*. No experimento em questão realizado de acordo com ASTM D713 (estabelece parâmetros para execução de trecho experimentais para marcação viária), o trecho foi realizado com pinturas transversais ao tráfego, a retrorrefletividade foi monitorada tanto na trilha de roda, quanto no eixo da pista por um período de dois anos. Observaram que embora as curvas de desgaste seguissem o mesmo padrão de decaimento, a retrorreflexão na trilha de roda era menor quando comparado com as medidas do eixo. Atribuíram este fenômeno de rápida degradação a ação abrasiva dos pneus dos veículos. A Figura 39 demonstra os resultados encontrados em campo referente ao monitoramento da trilha de roda e eixo.

Figura 39 – Retrorefletividade na trilha de roda e eixo

Fonte: Sathyanarayanan, Shankar e Donnell, 2008 (adaptado)

2.4.8 Cor do material

A cor do material influencia diretamente na retrorefletividade da pintura; a cor branca reflete mais quando comparada com a cor amarela (BENS, 2009). Um estudo proposto por Hummer, Rasdorf e Zhang (2012) em diferentes rodovias da Carolina do Norte (EUA), além de uma análise estatística para propor um modelo adequado de análise dos dados, analisaram o comportamento e decaimento da retroreflexão da sinalização horizontal nas linhas centrais na cor amarela e de bordo na cor branca. Na Figura 40 estão apresentados os dados coletados para as linhas de bordo na cor branca, onde os valores de RI são maiores, característicos de marcações brancas quando comparadas com marcações amarelas. Na Figura 41 estão apresentados os dados coletados para as linhas de centro para cor amarela.

Figura 40 – RI linha de bordo cor branca

Figura 41 – RI linha de centro cor amarela

Fonte: Hummer, Rasdorf e Zhang (2011)

2.4.9 Ação do Tráfego - Volume e composição

Pesquisas mais recentes têm considerado o tráfego como um fator de grande influência sobre as demarcações, onde outrora a análise era realizada através da retrorrefletividade em função do tempo (dias ou meses). Ainda pouco se sabe quanto ao comportamento da demarcação e sua durabilidade devido às características de tráfego. Thamizharazan *et al*/ (2002) comentam que o tráfego diário médio anual (AADT) não foi considerado um fator significativo contrapondo os estudos de Abboud e Bowman (2002) e Sitzabee, Hummer e Rasdorf (2009), onde estes afirmam que o tanto o tempo, quanto o tráfego possuem um impacto significativo na degradação da demarcação viária.

O tráfego também tem um efeito positivo na marcação viária, já que a ação do pneu também tem uma ação benéfica devido à abrasão na pintura. Em locais com alto volume de tráfego o desgaste devido à abrasão pode ser mais acentuado, levando a uma deterioração mais rápida da marcação. (SASIDHARAN, KARWA e DONNELL, 2009)

Abboud e Bowman (2002) a fim de avaliar a durabilidade e custos de marcações de pavimento calibraram e aferiram um modelo matemático logarítmico para o estado do

Alabama nos Estados Unidos, área de clima quente onde a queda de neve é incomum. Foi considerada retrorrefletividade mínima de $150 \text{ mcd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$ em rodovia de pista dupla, tinta na cor branca e pintura de borda. A Figura 42 apresenta a estimativa de decaimento da tinta e do termoplástico em função do número de veículos por dia. Observa-se que quanto maior a quantidade de veículos menor é a estimativa de durabilidade da pintura de sinalização. Os mesmos autores concluem ainda que tanto o tempo quanto o tráfego possuem ação sobre a vida útil da marcação viária.

Figura 42 – Vida útil para tintas e termoplástico - RL min de $150 \text{ mcd.lx}^{-1}.\text{m}^{-2}$

Fonte: ABBOUD e BOWMAN (2002)

Robertson et al (2012) realizaram uma pesquisa nas rodovias da Carolina do Sul (EUA) onde constaram que o número acumulado de veículos é mais significativo do que somente a idade da marcação, porém, a implementação de um modelo para previsão da degradação da pintura depende da estimativa do volume de tráfego precisa para que tal modelo possa ser validado.

Fujii (2017), em seu experimento em campo para sua tese de doutorado, analisou que a ação do tráfego e a ocorrência de chuvas parecem ser as melhores variáveis para avaliar o desempenho da sinalização horizontal. Em sua avaliação, a melhor variável explicativa

do efeito do tráfego sobre a retrorrefletividade não foi o número de veículos, mas sim a quantidade de eixos.

2.5 MODELOS DE DEGRADAÇÃO

Os modelos de degradação são importantes para avaliação do desempenho, identificação de pontos críticos, e previsão do ciclo de vida para vários tipos de níveis de retrorrefletividade. Saber quando um determinado material, ou demarcação ficará abaixo do padrão mínimo exigido de retrorrefletividade permitirá que as agências administradoras criarem um plano para substituição do material no momento apropriado. Sem os modelos de degradação, a análise dos dados é simplesmente uma abordagem subjetiva de quando a marcação precisa ser substituída.(SITZABEE, WHITE, and DOWLING, 2013).

Na Tabela 07 está apresentada uma breve revisão da literatura referente a modelos de degradação da pintura de sinalização horizontal. A tabela traz os trabalhos de diferentes autores, com trechos em diferentes localidades, além de contar as variáveis estatísticas analisadas. Nota-se que as variáveis utilizadas nos diferentes modelos são a retrorrefletividade, tempo (ou idade), tráfego (tráfego acumulado, Volume Diário Médio...), cor, tipos de superfície, etc. Os modelos encontrados na literatura são em sua grande maioria de regressão linear, modelo este também proposto neste trabalho para análise do resultados e dados coletados em campo.

Tabela 7 – Revisão da literatura referente a modelos de degradação em para pintura de sinalização viária

Ano	Autor	Tipo de Modelo	R ²	Tipo de Material	Descrição	Variáveis	Local
2002	Abboud and Bowman	Modelo de Regressão exponencial	0,58 (term.) 0,31 (tinta)	Termoplástico e Tintas	Descrever a relação de RI e a exposição aos veículos (VE). Onde VE é dado por exposição ao tempo para o tráfego diário médio anual (AADT)	RI VE Tráfego - AADT (Não foi considerado a cor do material e textura do pavimento)	Alabama - EUA (área de clima quente onde a queda de neve é incomum)
2009	Sitzabee, Hummer e Rasdorf	Regressão Linear Múltipla	0,38 a 0,60	Termoplástico Tinta	Comparação de diferentes modelos propostos na literatura	RL inicial Idade (tempo) Tráfego - AADT	Carolina do Norte (EUA)
2009	Sasidharan, Karwa e Donnell	Regressão Linear de mínimos quadrados ordinários (OLS)	Não informado	Tinta Epoxi Tinta à base de água	Estimativa da vida útil de diferentes materiais em diferentes superfícies (concreto e asfalto).	RL tempo AADT Superfície do pavimento (asfalto e concreto) diferentes equações para tipo de pavimento e tipo de material	Pensilvânia (EUA)
2011	Hummer, Rasdorf e Zhang	Modelo Linear de efeitos mistos (LMEM)	Não informado	Tintas	Comparação da precisão da previsão do Modelo Linear de efeitos Mistos com modelos de regressão linear.	RI Dias (tempo, idade) (diferentes equações para cor e posição da marcação)	Carolina do Norte (EUA)
2014	Ozelim e Turochy	Modelo de Regressão linear	0,448 a 0,60	Termoplástico	Comparação de diferentes modelos propostos na literatura Consideração da idade inicial da marcação; idade, tráfego médio anual, cor branca e amarela	RI AADT Idade (diferentes equações para cor e posição da marcação)	Alabama - EUA

2.6 TRECHOS EXPERIMENTAIS

A construção de trecho experimental em campo, em vias reais ou campos de prova de verdadeira grandeza, são métodos de avaliação de materiais de sinalização horizontal, afim de determinar o desempenho com o tempo e com a ação do tráfego. A FHWA (2013) comenta que este tipo de procedimento é comum e vem sendo adotado pela *National Transportation Product Evaluation Program - NTPEP*, que executa trechos em todo o país norte americano disponibilizando seus dados para serem utilizados por qualquer agência de transporte. A FHWA (2014) expõe que a disponibilização dos dados de pesquisas contribui para uma compreensão mais completa da durabilidade da retrorrefletividade das demarcações e ainda contribui para as agências no arranjo e ajustes em suas políticas e exigências de acordo com os dados de campo. As Figura 43 e Figura 44 exemplificam dois trechos experimentais empregados nos Estados Unidos para o estudo do desempenho das demarcações em rodovias.

Figura 43 – Trecho experimental - Fita adesiva

Fonte: FWHA, 2013.

Figura 44 – Trecho experimental - pintura

Fonte: FWHA, 2013.

A ASTM D713 normatiza os procedimentos para a execução de experimentos e avaliação. A FHWA (2013) salienta ainda que durante o planejamento da matriz de experimento deve-se procurar reduzir a quantidade de variáveis inseridas, afim de evitar a variabilidade dos resultados do estudo. Mizera (2008) cita que os trechos experimentais realizados pela NTPEP, normalmente são executados em duas zonas geoclimáticas diferentes a cada ano dentro dos Estados Unidos. Os materiais empregados, além de serem testados em campo, também são ensaiados em laboratório. A construção de trechos para avaliação reduz a

necessidade de as agências estaduais realizarem testes por conta própria. Quanto ao posicionamento na via da demarcação da sinalização viária, em linhas transversais ao sentido do tráfego ou linhas longitudinais, o FHWA (2013) elenca as principais vantagens e desvantagens de cada um deles -Tabela 8.

Tabela 8 – Vantagens e desvantagens de demarcações longitudinais e transversais em trechos experimentais

<i>Demarcações Transversais</i>	<i>Demarcações Longitudinais</i>
<p>Vantagens:</p> <ul style="list-style-type: none"> • É o design de experimento mais comum e especificado pela AASHTO; • O desgaste é mais uniforme devido ao comprimento das linhas; • A coleta de dados é mais rápida devido à proximidade das demarcações; • O desgaste é acelerado devido à passagem dos pneus; • A matriz experimental é mais fácil de organizar e implementar; • As condições e as aplicações dos materiais podem ser acompanhadas de perto, pois os trechos são mais curtos, quando comparadas com os trechos longitudinais. 	<p>Vantagens:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Os materiais são aplicados com os mesmos equipamentos que são usados regularmente para aplicação das demarcações; • As demarcações são avaliadas com ação do clima e ação das condições do tráfego real; • A retrorrefletividade é medida na posição do desgaste e na mesma direção que o motorista visualiza; • Os resultados fornecem indicações de como o material se comportará com condições semelhantes; • A retrorrefletividade pode ser medida por meio de dispositivos móveis, de forma mais rápida e com menos impactos no trânsito.
<p>Desvantagens:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Os resultados são bons para comparação dos materiais em si, porém não representativos de como os materiais serão solicitados em campo; • As demarcações normalmente são aplicadas com equipamentos manuais e não fornecem a mesma consistência e qualidade dos caminhões grandes normalmente utilizados; • A correlação entre trechos torna-se difícil devido ao tráfego e às condições ambientais; • Para a execução das demarcações transversais, é necessário o fechamento da pista; • A retrorrefletividade não é medida na mesma posição em que os motoristas visualizam as demarcações, tornando-se uma medida subjetiva. 	<p>Desvantagens</p> <ul style="list-style-type: none"> • Não existe um protocolo estabelecido para sua execução; • A seleção da localização torna-se mais difícil, pois as seções devem ser similares para todas as condições testadas; • Poderão ocorrer variações climáticas dentro do próprio trecho, a depender de sua extensão; • A depender do comprimento do trecho, poderão ocorrer variações do clima; • A coordenação da plataforma, tanto em execução, quanto monitoramento exige um compromisso maior dos envolvidos, devido as dimensões do trecho.

Fonte: adaptado de FHWA, 2013.

No Brasil, existe uma escassez de publicações de experimentos com construção de pista teste. Schwab (1999) executou um trecho experimental na MG-424 que liga a cidade de Pedro Leopoldo à Belo Horizonte no estado de Minas Gerais através do DER - Minas, onde avaliou a pintura em pavimento de concreto e pavimento de concreto asfáltico usinado a quente. Nesta pesquisa Schwab utilizou diferentes tipos de tintas, termoplásticos, e proporções de microesferas a serem aplicadas à pintura (de 100 a 700 g/m²) buscando determinar a faixa ótima de trabalho, e a influência da textura no comportamento destes materiais. Concluiu que a escolha do material deve estar ligada ao volume de tráfego que o material será exposto, as tintas acrílicas são mais econômicas que os materiais termoplásticos e elastoplásticos, e que a maior retrorrefletividade inicial foi encontrada com taxas de aspersão entre 230 a 350 g/m² para tinta acrílica à base de solvente e microesferas do tipo II-A.

Como já citado anteriormente, Salles *et al.* (2015) executaram um estudo em trecho urbano na Av. Roraima na cidade de Santa Maria e um trecho rodoviário na BR 158 na cidade de Júlio de Castilho no mesmo estado, além de sua avaliação quanto ao desgaste da pintura de sinalização em relação a sua posição (linhas transversais, linhas de bordo, etc) e a influência da precipitação como um agente de limpeza na demarcação, também abordou questões quanto aos requisitos mínimos adotados no Brasil quanto a geometria da retrorrefletividade. Recomendam uma revisão quanto aos valores mínimos de retrorrefletividade inicial adotados e/ou adoção de geometria de 30m. Vale ressaltar que novas especificações têm sido publicadas no Brasil quanto a geometria, como a norma DNIT 409/2017 e ABNT 16410/2016 para equipamentos dinâmicos de geometria de 15 e 30m, e a ABNT 16307:2014 para geometria de 30 com equipamento portátil.

Finalmente, Fujii (2017) além de sua pesquisa referente à sinalização vertical, também executou um trecho experimental na BR 116 - km 204- Rodovia Presidente Dutra que liga São Paulo ao Rio de Janeiro, na altura do município de Arujá, no estado de São Paulo, onde aplicou o conceito *Optimal Design*, que visa um design ótimo de experimento, implementando modelos ideais de planejamento e que reduzem custos de experimentação, aplicando para tanto conceitos estatísticos. Fujii (2017) executou seu trecho experimental na praça de pedágio com demarcações transversais nas faixas de tráfego da cobrança automáticas, estudando diferentes materiais: termoplástica spray, plástico a frio (PMMA) e tinta acrílica à base de água, e o desgaste em função do tráfego. Quanto ao tráfego, avaliou de três formas: volume de veículos (mistos e equivalentes),

número "N" de solicitações de eixo padrão de 8,2 tf (com considerações da carga) e número de repetições de eixo simples (quantidade de vezes em que o eixo passou pela pintura). Conclui que o melhor modelo para avaliação da retrorrefletividade em função do tráfego é por quantidade de eixos sem consideração de carga, e que dentre os materiais estudados o plástico à frio (PMMA) apresentou um menor declínio da perda de retrorrefletividade e desempenho mais estável quando comparado com os demais materiais.

2.7 SIMULADORES DE DESGASTE E SIMULADORES DE TRÁFEGO

O Comitê de Normalização Europeu prevê a avaliação do desgaste das pinturas de sinalização viária através da norma EN 13197, com o uso de simuladores de desgaste (*Wear Simulators*), tanto para ser usado em demarcações temporárias e permanente. Na Alemanha e na Espanha, são utilizados testes com simuladores para desgaste acelerado de acordo com esta norma, em vez de ensaios de campo. Este tipo de equipamento traz uma série de vantagens significativas como o controle das condições climáticas, as passagens dos pneus são aplicadas em um curto espaço tempo, e os ensaios acontecem sem interrupção do tráfego, além das questões de segurança associadas ao processo. As pinturas de sinalização são aplicadas em placas de pavimento com uma superfície de asfalto denso (granulometria densa). Deste modo, os resultados são acelerados pois a textura do pavimento asfáltico interfere menos nos resultados. Os testes realizados na Alemanha podem ser feitos com até 8 pneus, e até 20 materiais diferentes podem ser ensaiados simultaneamente- Figura 45. As instalações do local são climatizadas, sendo possível fazer controle da temperatura e umidade (TERNZ, 2011). Desde 1989, os ensaios de desgaste de pintura de sinalização são realizados somente em laboratório na Alemanha. Estes são realizados em até 4 milhões de passagens, o que equivale aproximadamente a quatro anos dependendo o volume de tráfego do local, sendo a resistência da demarcação determinada em acúmulo de ciclos especificados, conforme a categoria (BAST, 2017). Ou seja, o simulador de laboratório hierarquiza as demarcações segundo sua resistência ao desgaste abrasivo pelo tráfego, avaliadas pela retrorrefletividade e pela perda de microesferas analisadas por meio de imagens.

Figura 45 – Simulador de desgaste - Alemanha - Bast

Fonte: KEPPLER, 2008.

Em uma escala menor existe o *Taber Abraser* -Figura 46, que é utilizado para testar a resistência ao desgaste de abrasão em materiais, utilizado em alguns países como Canadá que especifica seu uso para materiais termoplásticos e pré-fabricados (EDMONTON, 2012) Nova Zelândia e Nova Gales do Sul (TERNZ, 2011). Uma amostra teste do material é montada em uma plataforma rotativa enquanto duas pequenas rodas carregadas em um eixo são colocadas sobre uma mesa giratória com o objetivo de causar abrasão na superfície do material - Figura 47. Este dispositivo de laboratório possui várias opções para as rodas abrasivas com diferentes níveis de agressividade e a carga sobre ela pode ser controlada (TERNZ, 2011). A norma ASTM D4060:2012 estabelece um procedimento padrão para a avaliação de desgaste em tintas orgânica.

Figura 46 – Taber Abraser

Fonte: KEPPLER, 2008.

Figura 47 – Sistema de desgaste do Taber Abraser

Fonte: TABER INDUSTRIES, 2017.

Chehab (2011) demonstra um simulador de tráfego acelerado móvel -MMSLS3 (*Model Mobile Load Simulator*) - Figura 48, com aplicações mais amplas, além das deformações e afundamentos, sendo indicado também para avaliação da durabilidade de demarcações de pavimentos em grande escala em campo. Embora tal procedimento não seja normatizado, Chehab (2011) afirma que o equipamento pode reproduzir o tráfego de campo, e que com a construção de uma pista teste, também é possível avaliar separadamente a ação do clima sobre as marcações onde não ocorre a passagem do pneu. Este equipamento pode ser utilizado tanto em laboratório quanto em campo, para uma situação real e testar uma determinada demarcação.

Figura 48 – Simulador de tráfego acelerado Móvel - MMSLS3

Fonte: Chehab, 2011.

Um outro equipamento bem difundido para avaliação de afundamentos em revestimentos asfálticos é o simulador de tráfego modelo francês LCPC. Este equipamento é composto por um eixo com dois pneus, sob pressão e cargas reguláveis, sendo o padrão comparativo de 6 bar e 5000N, onde cada pneu rola sobre uma placa compactada de revestimento asfáltico, em ciclos de ida e volta na frequência de 1 Hz.

3 ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Este capítulo expõe a matriz experimental utilizada nesta pesquisa, os materiais empregados, assim como a caracterização realizada em laboratório para cada um deles. A diferenciação de cada material além de proporcionar evidências quanto ao seu desempenho, também possibilita uma melhor compreensão dos resultados quando estes são aplicados, que aqui neste trabalho refere-se ao emprego em campo, com a construção de um trecho experimental.

3.1 MATRIZ EXPERIMENTAL - MATERIAIS

Como parte desta pesquisa, foi proposto estudar os materiais empregados nesta pesquisa. Neste experimento foram utilizados os seguintes materiais - Figura 49

Figura 49 – Materiais empregados na pesquisa

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS TINTAS

Para a presente pesquisa, foi proposta a utilização de tinta de resina acrílica emulsionada em água de acordo com a NBR 13699:2012, na cor branca e secagem rápida, de dois fornecedores diferentes, aqui denominados como *Tinta 01* e *Tinta 02*. A Tabela 9 apresenta a caracterização referente a Tinta 01 e Tinta 02

Tabela 9 – Caracterização das Tintas

Parâmetros		Tinta 01	Tinta 02
Ensaio	Exigido		
Viscosidade (UK)	Mínimo 80	103	89
Estabilidade na Estocagem	(UK) < 5	0,3	0,0
Tempo de Secagem (min)	< 10	12	12
Massa Específica (g/cm ³)	> 1,6	1,6	1,7
Brilho (UB)	< 20	20	2,93
Resistência à Água	Inalterada	Inalterada	Inalterada
Resistência ao Calor	Inalterada	Inalterada	Inalterada
Flexibilidade	Inalterada	Inalterada	Inalterada
Microscópio / Ancoragem	Ancorado	Ancorado	Ancorado
Abrasão (L)	> = 100	100,8	107,
Sólidos por Volume	65	68,5	64,2

Todos os materiais foram caracterizados e atenderam os parâmetros estabelecidos em norma

3.3 ESTUDO DA ESFERICIDADE DAS MICROESFERAS

Entende-se que a granulometria e esfericidade das microesferas são características importantes para o entendimento dos valores retrorrefletividade em campo e em laboratório. Na revisão bibliográfica, foi possível notar a influência desta característica neste material, uma maior retrorreflexão deste material é dependente desta característica. Foi realizado ensaio de caracterização de tamanho e forma de partículas, com a utilização do equipamento CAMSISER®, a fim de avaliar a graduação e a esfericidade deste material granular.

3.3.1 Caracterização de Partícula - Equipamento Camsizer®

Este equipamento é um instrumento óptico eletrônico para medição do tamanho e forma de partículas por meio de análise de imagens digitais dinâmicas. As partículas são analisadas com alta resolução e de forma individualizada, pela norma ISO 13322-*Particle size analysis – image analysis methods*. No equipamento as partículas dispersas passam

por duas fontes de luz LED brilhantes; as sombras geradas pelo equipamento são capturadas com duas câmeras digitais, sendo uma para análise das partículas menores, com uma elevada resolução, e a outra é ajustada para as partículas maiores, com boa estatística (grande campo de visão). Por meio de um software do equipamento, empregado para o processamento, as imagens são capturadas em tempo real, oferecendo alguns parâmetros de tamanho e, conseqüentemente, a forma da partícula e sua distribuição granulométrica (LCT, 2016). A Figura 50 apresenta o equipamento Camsizer®.

Figura 50 – Equipamento Camsizer L

Fonte: LCT (2016)

Dois parâmetros importantes, oferecidos pelo equipamento, que serão utilizados para caracterizar as diferentes microesferas são:

- Esfericidade média (SPHT) = relação entre a área da partícula e seu perímetro, definida pela Equação 03:

$$SPHT = \frac{4 * \pi * \text{Área}}{\text{Perímetro}^2} \quad (03)$$

- Relação de aspecto médio (b/l) = razão entre a maior e menor dimensão da partícula, dados pela Equação 04:

$$\text{Relação de Aspecto Médio} = \frac{b \text{ (maior dimensão)}}{l \text{ (menor dimensão)}} \quad (04)$$

Os materiais são ditos esféricos se os parâmetros de SPHT e b/l forem próximos de 1, e quanto mais se distanciam deste valor unitário, mais se afastam do formato esférico.

Hawlitschek (2014) demonstra como pequenas variações no formato da partícula no parâmetro b/l (relação de aspecto) podem contribuir para a uma distorção e alongamento da partícula. A Figura 51 ilustra a influência destas distorções e sua correlação com o parâmetro b/l , através da relação entre o menor e maior valor do diâmetro da partícula para diferentes b/l .

Figura 51 – Distorções das partículas para diferentes valores de b/l .

Fonte: Hawlitschek, (2014).

3.3.2 Ensaio de caracterização de partícula - microesfera

Foi realizado um fracionamento de cada tipo de microesfera utilizada neste experimento, de modo que o material utilizado para a realização do ensaio fosse representativo da amostra. Para este fracionamento foi utilizado um quarteador rotativo, que tem por objetivo subdividir uma amostra em partes iguais e representativas do material. A amostra é colocada no funil, passando por uma calha vibratória – Figura 52, até atingir um recipiente giratório de amostras, com 9 cilindros, onde é separado em parte iguais para cada um dos cilindros – Figura 53.

Figura 52 – Microesfera de vidro na calha vibratório do quarteador rotativo

Figura 53 – Microesferas caindo no recipiente giratório com cilindros

Depois de quarteadas as amostras, foram ensaiadas no CAMSIZER®.

3.3.2.1 Granulometria

A Figura 54 apresenta a granulometria II-C e II-A das diferentes microesferas, sendo a II-C mais grosseira. Observa-se que Beta II-C apresenta microesferas maiores, dentre os materiais aqui apresentado enquanto a microesfera Gama II-A apresenta uma graduação mais fina.

Figura 54 – Granulometria das microesferas Tipo II-A e II-C

3.3.2.2 Relação de Aspecto Médio em função da granulometria da Microesfera

Granulometria II-C

A Figura 55 apresenta os valores para o parâmetro b/l e as porcentagens em volume para este material. As microesferas Alfa (α) e Beta (β) apresentam 50% de seu volume de partículas de 0,95 a 1,0 - relação de aspecto médio, sendo superiores a microesfera Gama.

Figura 55 – Relação de aspecto médio (b/l) - Granulometria II-C (% em volume)

A Figura 56 apresenta a granulometria II-C, comparando a Relação de Aspecto Médio com suas respectivas porcentagens passantes em volume. As microesferas Alfa (α) e Beta (β) apresentam comportamento similares. Para a microesfera Gama, aproximadamente 50% de seu material apresenta b/l entre 0,5 a 0,9. O procedimento normativo da AASHTO PP 74: 2013 descreve as microesferas são consideradas circulares ou esféricas quando apresentam valores acima de 0,85 para a relação b/l. É possível observar que as Microesferas Alfa e Beta apresentam aproximadamente 75% e 85% respectivamente de partículas tidas como esféricas, enquanto que a microesfera Gama apresenta aproximadamente 60%. Esta granulometria é utilizada em menor quantidade neste experimento.

Figura 56 – Rel. de aspecto médio (b/l) - Granulometria II-C (passante acumulada)

Granulometria II-A

A Figura 57 apresenta o volume de partículas para microesfera referente ao parâmetro b/l (relação de Aspecto Médio). A microesfera Gama, apresenta superioridade quando comparadas com as outras microesferas, pois apresenta picos maiores para b/l acima de 0,9 e 1,0, seguida da microesfera Beta (β) e por fim microesfera Alfa (α). Esta granulometria é a que será aplicada em maior quantidade nas duas taxas propostas.

Figura 57 – Rel. de aspecto médio (b/l) - Granulometria II-A (% em volume)

A Figura 58 apresenta a porcentagem passante em volume da relação b/l para as diferentes microesferas. Nota-se que a microesfera Gama possui aproximadamente 60% com esfericidade acima de 0,85. Já as microesferas Alfa e Beta apresentam valores similares aproximadamente 50% das microesferas estão com esfericidade acima de 0,85.

Figura 58 – Rel. de aspecto médio (b/l) -Granulometria II-A (passante acumulada)

3.3.2.3 SPHT (esfericidade) em função da granulometria da Microesfera

Granulometria II-C

A Figura 59 apresenta o parâmetro de Fator de Forma - SPHT, ou ainda esfericidade das diferentes microesferas de vidro na granulometria II-C. Nota-se que a Microesferas Beta e Gama apresentam os maiores picos de esfericidade entre 0,8 e 0,9.

Figura 59 – Esfericidade (SPHT) - granulometria II-C- % em volume

A Figura 60 apresenta a porcentagem passante acumulada com referência a esfericidade das diferentes granulometrias. De acordo com o procedimento normativo da AASHTO PP 74: 2013, as microesferas são consideradas esféricas quando apresentam valores acima de 0,93 para o SPHT. Nota-se que para um valor menor que 10% das microesferas atendem este parâmetro.

Figura 60 – Esfericidade SPHT - Granulometria II-C (% acumulada)

Granulometria II-A

A granulometria II-A é utilizada em maior quantidade no trecho experimental (50% II-A, 50% II-A e 30% II-C e 70% II-A). A Figura 61 apresenta a esfericidade (SPHP) da granulometria II-A, nota-se que Microesfera Gama apresenta uma quantidade maior de microesferas acima de 0,93, cerca de 30%, enquanto que nas microesferas Alfa e Beta este valor é de aproximadamente 5%. Cerca de 70% da microesfera Gama apresenta esfericidade superior a 0,7.

Figura 61 – Esfericidade SPHT - Granulometria II-A (% passante acumulada)

3.4 APARÊNCIA E DEFEITOS

A fim de verificar os defeitos quanto à forma das microesferas, por meio de um microscópio com aumento de 50 vezes, foi possível capturar imagem para cada uma das granulometrias e marcas aplicadas nesta pesquisa.

3.4.1 Aparência e defeitos

3.4.1.1 Aparência e defeitos - Microesfera Alfa

Na Figura 62 apresenta-se a Microesfera Alfa na granulometria II-C e II-A. Notam-se pequenas variações de seus respectivos diâmetros, e que todas as microesferas apresentam um aspecto esférico. Na Figura 62 (b) é evidenciada uma partícula sem forma ou contorno definido, a Figura 62 (c) e (d) referentes à granulometria II-A apresentam um

aumento na quantidade de defeitos de forma, partículas não esféricas. Fica também explícito a quantidade de bolhas de ar no interior da microesfera.

Figura 62 – Aparência e defeitos - Microesfera Alfa

3.4.1.2 Aparência e defeitos - Microesfera Beta

A Figura 63 (a) exibe a microesfera Beta, quase sem defeitos, características e contornos bem definidos, já na Figura 63 (b), é apontado um defeito quanto à forma de uma das partículas, que apresenta rugosidade e sem nenhum aspecto de arredondamento, (sem nenhuma forma definida). Nas Figuras 63 (c) e (d) apresentam-se defeitos dos mais variados, embora apresentem microesferas com contorno bem definidos, também ficam evidenciadas microesferas ovóides, de superfícies irregulares e bolhas gasosas.

Figura 63 – Aparência e defeitos - Microesfera Beta

3.4.1.3 Aparência e defeitos - Microesfera Gama

Na Figura 64, apresenta-se a microesfera gama para as granulometrias II-A e II-C. A Figura 64 (a) apresenta um defeito de fabricação da microesfera (fusão de partículas), já a Figura 64 (b) apresenta a granulometria II-C com contornos bem definidos, sem defeitos de fabricação das partículas. Nas Figura 64 (c) e (d) apresenta-se a granulometria II-A, com uma quantidade de defeitos aparentes bem reduzido, quando comparado com as demais microesferas Alfa e Beta. De acordo com os resultados apresentados do estudo de esfericidade, a Microesfera Gama apresentou-se superior na granulometria II-A quando comparada às microesferas Alfa (α) e Beta, tanto para o parâmetro de esfericidade (SPHT), quanto o parâmetro b/l. Na granulometria apresentada das microesferas utilizadas (Figura 54), a Mcf Gama II-A é o material mais fino.

Figura 64 – Aparência e defeitos - Microesfera Gama

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL DE CAMPO

Este capítulo aborda os métodos propostos para alcançar o objetivo deste trabalho. Também trata da abordagem de campo com a realização de um trecho experimental, as diferentes combinações de materiais empregados, coleta de dados, e caracterização da textura do pavimento onde o teste foi realizado.

4.1 PROPOSTA EXPERIMENTAL

A proposta desta pesquisa é estudar a durabilidade da sinalização horizontal, empregando diferentes tintas e microesferas de vidro em demarcações de pavimento sujeitas ao tráfego intenso e muito pesado. A análise consiste no acompanhamento da perda da retrorrefletividade em campo para demarcações feitas com diferentes tintas à base de água e diferentes microesferas e, por meio deste estudo prever a durabilidade da pintura, além de orientar a escolha de tintas e de microesferas para uma maior vida útil da retrorreflexão.

Afim de alcançar o objetivo proposto, foi idealizada uma proposta de experimentos e tipos de avaliação, conforme apresentada na Figura 65.

Figura 65 – Proposta Experimental em Campo

4.2 SELEÇÃO DE MATERIAIS E MATRIZ EXPERIMENTAL

Para a presente pesquisa, foi proposta a utilização de tinta de resina acrílica emulsionada em água de acordo com a NBR 13699:2012, na cor branca e secagem rápida, de dois fornecedores diferentes, aqui denominados como *Tinta 01* e *Tinta 02*. Para dar

retrorefletividade à pintura, foram escolhidos três fornecedores distintos de microesferas de vidro, aqui denominados como *Microesfera Alfa* (α), *Microesfera Beta* (β) e *Microesfera Gama* (γ). Quanto à granulometria utilizada das microesferas, foi utilizada granulometria *Premix*(I-B) incorporada à tinta e *Drop-on* II-A e II-C por dupla aspersão, sendo aplicadas com duas taxas diferentes: uma de 50% II-A + 50% II-A (mesma granulometria); e a outra 30% II-C + 70% II-A, resultando em um total de doze combinações, conforme demonstrado na Figura 66 e Tabela 10. A microesfera Gama (γ) ainda não está disponível no mercado nacional. A escolha da dupla aspersão com granulometrias diferentes (*Drop-on* II-A e II-C A), teve por objetivo identificar diferenças na retrorefletividade inicial e a manutenção da mesma durante o tempo, já que uma das granulométrias utilizadas (II-C) é mais grosseira.

A microesfera *Premix* (I-B) foi adicionada às tintas durante o preparo, antes da aplicação, na proporção de 200g/l de acordo com a ABNT 15405:2016. As três marcas diferentes de microesferas do Tipo II-A e II-C - *Drop-on* foram utilizadas na proporção total de 400g/m², seguindo a norma citada que especifica a quantidade de microesferas do tipo II-A e II-C que deve ser utilizada em uma proporção que assegure a retrorefletividade desejada pelo contratante. Fabricantes de tintas recomendam valores de 300g/m² a 400g/m² para refletorização da marcação viária.

Figura 66 – Matriz Experimental - Materiais

Todas as combinações (com as descrições) encontram-se apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Identificação e Nomenclaturas das Combinações

Combinação	Nomenclatura
Tinta 01 + Microesfera Alfa (α) c/ Taxa de Aplicação 50% - II-A/ 50% - II-A	01Alfa – 50/50
Tinta 01 + Microesfera Alfa (α) c/Taxa de Aplicação 30% - II-C/ 70% - II-A	01Alfa – 30/70
Tinta 01 + Microesfera Beta (β) c/Taxa de Aplicação 30% - II-C/ 70% - II-A	01Beta – 30/70
Tinta 01 + Microesfera Beta (β) c/Taxa de Aplicação 50% - II-A/ 50% - II A	01Beta – 50/50
Tinta 01+ Microesfera Gama (γ) c/Taxa de Aplicação 30% - II-C/ 70% - II-A	01Gama – 30/70
Tinta 01 + Microesfera Gama (γ) c/Taxa de Aplicação 50% - II-A/ 50% - II-A	01Gama – 50/50
Tinta 02+ Microesfera Alfa (α) c/ Taxa de Aplicação 50% - II-A/ 50% - II A	02Alfa – 50/50
Tinta 02 + Microesfera Alfa (α) c/Taxa de Aplicação 30% - II-C/ 70% - II-A	02Alfa – 30/70
Tinta 02 + Microesfera Beta (β) c/Taxa de Aplicação 30% - II-C/ 70% - II-A	02Alfa – 30/70
Tinta 02 Microesfera Beta (β) c/Taxa de Aplicação 50% - II-A/ 50% - II A	02Beta – 50/50
Tinta 02 + Microesfera Gama (γ) c/Taxa de Aplicação 30% - II-C/ 70% - II-A	02Gama – 30/70
Tinta 02 + Microesfera Gama (γ) c/Taxa de Aplicação 50% - II-A/ 50% - II A	02Gama – 50/50

Nas Figura 67 estão apresentadas as diferentes microesferas (Alfa, Beta e Gama) com suas respectivas granulometrias (II-A e II-C)

Figura 67 – Microesferas e granulometrias

4.3 ARRANJO EXPERIMENTAL EM CAMPO

Foi executado um experimento em campo afim de avaliar o comportamento e o desempenho das combinações tinta-microesfera propostas. A escolha do trecho levou em consideração a geometria do local (sem curvas ou conversões), com plena exposição ao sol e com boa drenagem, além da importante possibilidade da contagem de veículos, a fim de correlacionar a perda de retrorrefletividade com o tráfego. Levou-se também em

consideração a possibilidade de contagem real do tráfego, e os aspectos operacionais quanto à pintura.

O trecho escolhido encontra-se na Rodovia Fernão Dias - BR 381, km7,3 junto à praça de pedágio na cidade de Vargem (Figura 68 e Figura 69) no estado de São Paulo (próximo à divisa com Minas Gerais).

Figura 68 – Localização do trecho experimental–BR-381

Fonte: Google Maps (2016)

Figura 69 – Local de execução do trecho experimental

A execução das pinturas foi realizada de acordo com as diretrizes da ASTM D 713/2012, que prevê este tipo de experimento. As pinturas na pista deram-se no sentido transversal ao tráfego, em 6 faixas de rolamento, sendo 3 faixas no sentido norte da rodovia (sentido Belo Horizonte) e outras 3 no sentido sul (sentido São Paulo) (Figura 70). Neste experimento, foram executadas duas linhas (ou faixas) para que cada condição de tinta, de microesferas e de taxas de aplicação, pudesse ser replicada uma vez, a fim de melhorar a confiabilidade dos resultados. Junto com a execução do trecho, foram realizados ensaios de controle, para garantir a qualidade da execução de acordo com a NBR 15405/2016, NBR 15438/2013, e ASTM 2697/2003. Cuidados com a limpeza do local antes da pintura e com a temperatura também foram observados.

Nas cabines de pedágio 12,13 e 14 foi possível analisar o efeito da aceleração dos veículos com a saída da praça de pedágio. Já nas cabines 09, 10 e 11 foi possível a observação do efeito da desaceleração (ou frenagem) dos veículos com a aproximação da praça do pedágio, conforme ilustrado na Figura 70.

Figura 70 – Croqui de posição das pinturas

A Figura 71 demonstra a adição da microesfera do Tipo IB – “*Premix*” na tinta, durante sua homogeneização no cilindro. As pistolas de aspersão das microesferas foram calibradas, a cada troca de microesferas e proporções –Figura 72. Em campo, foi realizado o controle tecnológico da execução das demarcações como, por exemplo, o controle da espessura da película de tinta úmida, controle e verificação do alinhamento entre as pistolas de tinta e microesfera, entre outros cuidados.

Figura 71 – Mcf *Premix* sendo adicionadas ao cilindro de tinta

Figura 72 – Calibração das pistolas de aspersão de microesferas

4.4 MEDIDA DE RETRORREFLETÂNCIA EM CAMPO

4.4.1 Coleta de dados em campo

Para a avaliação da evolução da retrorrefletividade foi utilizado um equipamento manual portátil de dupla geometria (15 e 30 metros), simulando a distância de visibilidade noturna - Modelo Nacional Easylux (Figura 73 e Figura 74).

Figura 73 – Esquema das Pinturas de Campo

Figura 74 – Medidas de Retrorefletividade em Campo

A coleta das medidas de retrorrefletividade nas diferentes pinturas foi realizada em cada faixa de tráfego, ou seja, em faixa de cada uma das cabines, nas trilhas de roda e no eixo. A Figura 75 ilustra os pontos de coleta.

Figura 75 – Posição das Leituras de RI em campo, em cada uma das faixas de tráfego de acesso ou saída a uma cabine de pedágio

4.4.2 Periodicidade das Medidas e coleta de dados

O início da coleta de dados de retrorrefletividade em campo deu-se após 4 dias (5 jul 2016) de execução do trecho. Após a pintura do trecho, as marcações foram submetidas ao tráfego, sendo que o excesso de microesferas que não estavam aderidas à película de tinta foi então removido. As outras leituras ocorreram em dias alternados. Por se tratar de

uma praça de pedágio, as leituras eram realizadas de acordo com a liberação da faixa para testes pela equipe. Foram um total de 521 dias acumulados de monitoramento do trecho experimental. A Tabela 11 apresenta as datas de coleta das medidas de retrorrefletividade.

Tabela 11 – Datas de coleta de medidas de RI do trecho experimental

Data	Dias Acumulados	Semanas Acumuladas
05/jul/2016	4	0,6
07/jul/2016	6	0,9
11/jul/2016	10	1,4
14/jul/2016	13	1,9
18/jul/2016	17	2,4
21/jul/2016	20	2,9
25/jul/2016	24	3,4
27/jul/2016	26	3,7
02/ago/2016	32	4,6
05/ago/2016	35	5,0
10/ago/2016	40	5,7
12/ago/2016	42	6,0
19/ago/2016	49	7,0
26/ago/2016	56	8,0
01/set/2016	62	8,9
09/set/2016	70	10
16/set/2016	77	11
23/set/2016	84	12
07/out/2016	98	14
17/out/2016	105	15
20/out/2016	111	15,9
01/dez/2016	153	21,9
27/jan/2017	210	30
13/mar/2017	255	36,4
09/mai/2017	312	44,6
04/dez/2017	521	74,4

4.4.3 Contagem de Veículos - Quantificação de Eixos

O tráfego é composto por diferentes tipos de veículos – caminhões, motos, carros de passeio, etc., e para equalizar o perfil do tráfego foi adotado um fator multiplicador para cada tipo de veículo em função do número de eixos, diferenciando assim por categorias.

Tal procedimento já é utilizado para a cobrança do pedágio. Na Tabela 12 é apresentado como é realizada a contagem dos veículos, isto é, considerando a categoria do veículo e a quantidade de eixos.

A descrição do veículo apresentada segue a descrição utilizada pela cobrança do pedágio, seguindo as regras estabelecidas no contrato de concessão da rodovia (quadro de tarifas por categoria de veículos). A Tabela 12 - demonstra a contagem dos veículos.

Tabela 12 – Contagem de Veículos - Quantificação de Eixos

Categoria	Descrição	Categoria	Quantidade de Eixos
1	Automóvel, caminhonete e furgão		2
2	Caminhão leve, ônibus, caminhão trator e furgão		2
3	Automóvel com semi-reboque, e caminhonete com semi-reboque		3
4	Caminhão, caminhão trator, caminhão trator com semi-reboque,		3
5	Automóvel com reboque, e caminhonete com reboque;		4
6	Caminhão com reboque e caminhão trator com semi-reboque.		4
7	Caminhão com reboque, e caminhão com trator e semi-reboque.		5
8	Caminhão com reboque, e caminhão com trator e semi-reboque		6
9	Motocicleta, motonetas, bicicletas a motor e triciclos.		1
Ea (eixo adicional)	Eixos adicionais que não se enquadram em nenhuma das categorias acima.	-	1

4.5 ENSAIOS EM CAMPO DE TEXTURA

Foram realizados ensaios para avaliação das características superficiais do pavimento asfáltico do trecho experimental, bem como sobre a pintura, por meio de ensaios de macro e microtextura.

4.5.1 Macrotextura

A Macrotextura pode ser determinada através do ensaio de Mancha de areia, especificado pela norma ASTM E 965. Bernucci *et al.* (2008) esclarecem que a areia especificada para este ensaio deve ser passante na peneira de 0,177mm (Nº60) e retida na peneira de 0,25mm (Nº80). Neste ensaio, uma quantidade pré-determinada de areia é espalhada na superfície do pavimento com o auxílio de uma base de circular. Esta deve ser espalhada em círculos até que a área da mancha de areia venha a ser constante, e o espalhamento cessa quando aparecem algumas pontas de agregado. Depois é medido o diâmetro do círculo de areia formado no ensaio com auxílio de uma trena ou régua. As Figura 76 e Figura 77 ilustram o ensaio realizado em campo.

A altura média da mancha de areia é calculada pela Equação 05:

$$HS = \frac{4V}{D^2 * \pi} \quad (05)$$

Onde: HS é a altura da mancha de areia medida em mm;

V é o volume constante de areia de 25 mm³;

D é o diâmetro médio do círculo de areia em mm

Figura 76 – Ensaio de mancha de areia sendo executado

Figura 77 – Ensaio de mancha de areia na pintura de sinalização

Na Tabela 13, é dada a classificação da Macrotextura em função de HS (DNIT, 2006) para pavimentos asfálticos, porém no Brasil não existe nenhuma especificação para Macrotextura de demarcações de pavimento.

Tabela 13 – Classificação da Macrotextura em função do HS

Classe	Altura média da mancha de areia (mm)
Muito fina (ou muito fechada)	$HS \leq 0,20$
Fina ou fechada	$0,20 < HS \leq 0,40$
Média	$0,40 < HS \leq 0,80$
Grosseira ou aberta	$0,80 < HS \leq 1,20$
Muito grosseira ou aberta	$HS > 1,20$

Para analisar a Macrotextura somente da faixa da tinta, foi utilizado uma quantidade menor de areia, de modo que durante o ensaio a mancha não excedesse a faixa de pintura. Os valores encontrados nas pinturas estão na Tabela 14.

Tabela 14 – Altura da Mancha de Areia

Resumo - HS																		
	Aceleração									Desaceleração								
	Cabine 14			Cabine 13			Cabine 12			Cabine 11			Cabine 10			Cabine 09		
	T R E	Eixo	TRI	T R E	Eixo	TRI	T R E	Eixo	TRI	T R E	Eixo	TRI	T R E	Eixo	TRI	T R E	Eixo	TRI
01Alfa - 3/7				0,38	0,34	0,34				0,37	0,34	0,36				0,29	0,27	0,29
02Alfa - 3/7	0,40	0,39	0,38				0,35	0,34	0,32				0,52	0,47	0,42			
02Alfa - 5/5				0,34	0,32	0,34				0,35	0,34	0,32				0,32	0,29	0,29
01Alfa - 5/5	0,59	0,34	0,38				0,37	0,28	0,34				0,46	0,42	0,53			
01Beta - 5/5				0,30	0,33	0,34				0,36	0,33	0,35				0,33	0,29	0,35
02Beta - 5/5	0,48	0,34	0,33				0,32	0,34	0,33				0,41	0,46	0,45			
02Beta - 3/7				0,36	0,33	0,38				0,34	0,37	0,38				0,34	0,30	0,34
01Beta - 3/7	0,47	0,36	0,41				0,34	0,38	0,38				0,50	0,47	0,42			
01Gama - 5/5				0,34	0,34	0,33				0,36	0,4	0,38				0,38	0,33	0,32
02Gama - 5/5	0,55	0,48	0,47				0,33	0,39	0,36				0,42	0,47	0,36			
02Gama - 3/7				0,35	0,32	0,34				0,40	0,39	0,41				0,38	0,39	0,36
01Gama - 3/7	0,51	0,48	0,44				0,36	0,38	0,40				0,39	0,39	0,38			
Veic. 1*	396.585			445.489			481.803			669.677			480.361			478.987		
Veic. 2**	224.796			226.282			151.686			163.348			153.374			197.453		
Total***	621.381			672.071			633.489			833.025			633.735			676.440		

*Eixos de Veículos de passeio;

**Eixos de Caminhões e demais veículos;

*** Total de eixos contabilizados de acordo com o item 3.3.3.

A somatório dos veículos são referentes a data de realização dos ensaios

Como o ensaio consiste em determinar a altura da mancha de areia espalhada, que corresponde ao preenchimento dos vazios da superfície, é natural compreender que os valores de HS sejam menores, já que os vazios foram preenchidos pela pintura de sinalização (tinta com microesferas).

A Figura 78 demonstra os valores de levantamento do ensaio de mancha de areia da cabine 14, a Figura 79 os valores para a cabine 12 e a Figura 80 os valores da cabine 10. Observando isoladamente as demarcações de pavimento com proporções de microesferas 30/70 (30% II-C, 70% II-A) ou ainda 50/50 (50% II-A, 50% II-A), não é encontrada similaridade nos valores, ou como um fator que influenciou em todas as demarcações. Comparando especificamente TRE (Trilha de Roda Externa), Eixo ou TRI (Trilha de Roda Interna), também não são encontradas semelhanças.

Figura 78 – Macrotextura em Função de HS - Cabine 14 - Aceleração

*Eixos - Veículos Leves: 396.585/ Eixos - Veículos Pesados: 224.796 (eixos acumulados)

Figura 79 – Macrotextura em Função de HS - Cabine 12 - Aceleração

*Eixos Veículos Leves: 481.803/ Eixos Veículos Pesadas: 151.686 (eixos acumulados)

Figura 80 – Macrotextura em Função de HS - Cabine 10 - Aceleração

*Eixos Veículos Leves: 480.361/ Eixos Veículos Pesadas: 153.374

Comparando isoladamente a TRE (Trilha de Roda Externa) das Cabine 14 e 12, onde o tráfego se diferencia entre as mesmas, é observado que para a Cabine 14 os valores de HS são maiores em todas as combinações - Figura 81. O tráfego pesado se diferencia entre as duas cabines evidenciando uma influência na superfície do pavimento. Os valores de HS da Cabine 14 são maiores o que significa que a altura da mancha de areia é menor, indicando uma superfície mais grosseira ou aberta, devido à ação do tráfego, a película de asfalto que recobre os agregados já foi removida, expondo mais a macrotexturizado pavimento, aqui no caso coberto com a tinta.

Figura 81 – Macrotextura em Função de HS - Cabine 14 e 12 - Aceleração

*Cabine 14: Eixos Veículos Leves: 396.585/ Eixos Veículos Pesados: 224.796 (eixos acumulados)

*Cabine 12: Eixos Veículos Leves: 481.803/ Eixos Veículos Pesados: 151.686 (eixos acumulados)

4.5.2 Microtextura

A microtextura foi caracterizada com auxílio do Pêndulo Britânico, de acordo com ASTM E 303: 2008. Este equipamento é munido de braço móvel, com a extremidade recoberta por uma sapata de borracha que, em queda livre, é atritada contra a superfície do pavimento previamente umedecido – Figura 12. O valor encontrado é o VRD que consiste no valor de resistência à derrapagem. A perda de energia devido ao atrito faz com que a sapata se posicione em altura diferente do original; após passagem pela superfície o local onde o pêndulo atinge é registrado por um valor que é o VRD. A Tabela 15 apresenta a classe da rodovia de acordo com o VRD (DNIT, 2006).

Tabela 15 – Classificação de VRD – Valor de Resistência à derrapagem

Classe	Valor de resistência à derrapagem - VRD
Perigosa	<25
Muito Lisa	$25 \leq \text{VRD} \leq 31$
Lisa	$32 \leq \text{VRD} \leq 39$
Insuficientemente rugosa	$40 \leq \text{VRD} \leq 46$
Mediamente rugosa	$47 \leq \text{VRD} \leq 54$
Rugosa	$55 \leq \text{VRD} \leq 75$
Muito rugosa	$\text{VRD} > 75$

Pelo fato de o trecho ser localizado em uma praça de pedágio, o efeito da aceleração e frenagem sobre as pinturas são mais intensificados. Durante o levantamento das medidas de retrorrefletividade foram observadas marcas de frenagem nas demarcações, marcas de borracha dos pneus nas demarcações de sinalização. Algumas marcas foram observadas após marcas observadas com 15 dias de liberação ao tráfego - Figura 82 e Figura 83.

Figura 82 – Marcas de Frenagem - Faixa de Tráfego 09 Desaceleração

Figura 83 – Marcas de Frenagem - Faixa 10 de Tráfego - Desaceleração

Os ensaios foram realizados em diferentes posições, na TRI - Trilha de Roda Interna e Externa - TRE, e no eixo das pinturas de sinalização de cada faixa de tráfego. As medidas foram levantadas no mesmo sentido de direção do tráfego. A Figura 84 demonstra o ensaio sendo executado em campo, no trecho experimental, no pavimento previamente molhado.

Estes valores são utilizados para pavimentos e não costumam ser utilizados como referência para pinturas de sinalização viária no Brasil, porém entende-se que valores de VRD baixos podem provocar escorregamentos ou deslizamentos quando utilizados em travessias de pedestres ou mesmo quando as rodas dos veículos ficam sobre as demarcações horizontais.

Figura 84 – Levantamento de Microtextura na pintura de sinalização

Na Tabela 16 apresentam-se os resultados do levantamento de campo do atrito feito com o Pêndulo Britânico. Os ensaios foram realizados na Trilha de Roda Externa, no Eixo e na Trilha de Roda Interna nas faixas de tráfego do pedágio.

Os Valores de VRD apresentados na tabela situam-se entre 27 para o menor valor e 47 para o maior valor, observando a classificação adotada para pavimentos asfálticos, seriam classificadas como "Muito Lisa" a "Insuficientemente Rugosa", porém como já mencionado anteriormente não existe uma classificação adotada para resistência à derrapagem no Brasil para demarcações viárias. Notando os valores apresentados para o trecho experimental, na classificação da norma europeia EN 1436, os valores de VRD não atenderiam em sua grande maioria o S1 correspondente ao 45 VRD, menor valor numérico especificado de valor de atrito, conforme apresentado na Tabela 01.

Tabela 16 – Classificação de VRD – Valor de Resistência a derrapagem

Resumo - VRD																		
	Aceleração									Desaceleração								
	Faixa 14			Faixa 13			Faixa 12			Faixa 11			Faixa 10			Faixa 09		
	T R E	Eixo	TRI	T R E	Eixo	TRI	T R E	Eixo	TRI	T R E	Eixo	TRI	T R E	Eixo	TRI	T R E	Eixo	TRI
01A - 3/7				47	35	45				39	33	33				38	37	44
02A - 3/7	41	40	45				47	35	42				36	34	34			
02A - 5/5				46	40	44				39	39	30				35	36	37
02A - 5/5	41	42	41				43	36	42				34	34	34			
01B - 5/5				46	39	44				45	27	40				36	43	39
02B - 5/5	42	41	42				45	37	46				34	37	35			
02B - 3/7				42	34	40				31	27	37				32	35	35
01B - 3/7	37	38	37				38	37	40				35	37	36			
01C - 5/5				46	37	45				41	36	39				36	35	35
02C - 5/5	42	36	41				41	35	39				35	37	38			
02C - 3/7				45	36	38				35	35	35				36	35	35
01C - 3/7	44	40	39				41	36	40				34	33	35			
Veic. 1*	396585			445.489			481.803			669.677			480.361			478.987		
Veic. 2**	224.796			226.282			151.686			163.348			153.374			197.453		
Total***	621.381			672.071			633.489			833.025			633.735			676.440		

*Eixos de Veículos de passeio e moto;

**Eixos de Caminhões e demais veículos;

*** Total de eixos contabilizados de acordo com o item 3.3.3.

A somatório dos veículos são referentes a data de realização dos ensaios

Valores menores significam uma superfície mais lisa, ou Insuficientemente Rugosa. A faixa de tráfego 09 apresenta valores de VRD (Valor de Resistência à Derrapagem) menores quando comparados com a faixa de tráfego 11 e 13 –Figura 85, onde as diferenças são mais sutis, isso indica uma presença maior da demarcação - tinta com microesferas de vidro, material que ainda não foi arrancado do pavimento. Para a cabine 13, em todas as combinações, os valores de resistência à derrapagem são maiores indicando uma superfície mais rugosa, provável exposição das pontas dos agregados, e um maior arranque das microesferas de vidro. O tráfego pesado nesta cabine também é maior, o que corrobora com esta afirmação - exposição da superfície do pavimento.

Figura 85 – Valores de VRD para Cabines 13,11 e 09.

*Cabine 13: Eixos Veículos Leves=445.489 e Eixos Veículos Leves: 226.282 (eixos acumulados)

*Cabine 11: Eixos Veículos Leves=669.677 e Eixos Veículos Leves: 163.348 (eixos acumulados)

*Cabine 09: Eixos Veículos Leves=478.987 e Eixos Veículos Leves: 197.453 (eixos acumulados)

Resultados similares são encontrados entre as Cabines 14 e 10 - Figura 86, onde a cabine 14 em todas as combinações apresentam valores de VRD maiores, indicando uma superfície mais rugosa, provável exposição dos agregados da superfície. Esta cabine também apresenta um elevado volume de tráfego pesado, quando comparada com a Cabine 10, com valores de VRD e tráfego menores.

Figura 86 – Valores de VRD para Cabines 14 e 10

Cabine 14: Eixos Veículos Leve: 396.585 e Eixos Veículos Leves: 224.796 (eixos acumulados)
Cabine 10: Eixos Veículos Leves: 480.361 e Eixos Veículos Leves: 153.174 (eixos acumulados)

4.6 AMOSTRAS DE CAMPO PARA IMAGENS

Durante a pintura de campo, foram extraídas amostras de pintura em placas metálicas, tanto para análise por imagem, verificação de distribuição e contornos de microesferas. A Figura 87 demonstra a placa metálica sobre o pavimento, posicionada estrategicamente para retirada de amostra durante a pintura de campo

Figura 87 – Extração de amostras de pintura de campo.

(a) placa pintada

(b) execução da pintura

Já em laboratório, foi verificado a distribuição de microesfera, e ancoramento das microesferas e por intermédio de um microscópio foram obtidas imagens para cada combinação - Figura 88. Ao lado de cada imagem consta uma escala, a distância entre cada marcação representa um milímetro. Nota-se a diferença da distribuição das microesferas devido à granulometria 30/70 e 50/50. É possível notar em algumas microesferas formatos irregulares, ovóides, e partículas não esféricas.

Figura 88 – Distribuição das diferentes de microesfera e granulometria

5 MONITORAMENTO DO TRECHO EXPERIMENTAL

Este capítulo traz o monitoramento do trecho experimental e o acompanhamento da perda da retrorrefletividade para as diferentes combinações empregadas. A análise inicial aqui tratada refere-se à construção de curvas de desgaste, diferenciando os materiais em si, além disso a avaliação proporciona compreender como a variável de resposta, a retrorrefletividade, comporta-se com a ação do tráfego leve e pesado, com a ação do sentido de tráfego (aceleração e frenagem), e aborda a diferenciação das geometrias de 15 e 30 metros que diz respeito à distância de visibilidade da retrorreflexão. O monitoramento foi realizado durante 521 dias, praticamente um ano e meio, conforme já demonstrado na Tabela 12.

5.1 CLIMA

Durante as diferentes análises realizadas, verificou-se uma oscilação dos valores medidos em campo de RI para os diferentes materiais. As curvas de desgaste apresentavam picos e vales nas medidas de retrorrefletividade, independente da tinta, microesfera, ou geometria - Figura 89. As oscilações podem ser notadas até um determinado período, aproximadamente 150 dias, depois deste período a retrorrefletividade continua a decair, porém o formato da curva tende a assíntota. Um fator importante que deve ser levado em consideração nesta análise, é a periodicidade das leituras. Intervalos grandes de coleta de dados em campo podem não identificar tais oscilações. Outro aspecto que também pode ser associado ao decaimento da curva, bem como as oscilações, é o valor de retrorrefletividade residual de 120 $mcd.m^{-2}.lx^{-1}$, atuação da microesfera *premix* (incorporada a tinta). Nota-se que após este limite as oscilações são pequenas.

Figura 89 – Oscilações nas curvas de desgaste

*Curvas de Desgastes - Tinta 01 - Aceleração - Trilhas - Proporção 30/70 - Faixa 13 - Geometria 15m.

Como uma tentativa de compreender melhor este fenômeno buscou-se dados pluviométricos da cidade de Vargem, já que no trecho da pesquisa não havia um pluviômetro. Os dados pluviométricos referentes à cidade foram inseridos no banco

de dados desta pesquisa com o objetivo, por meio de um modelo estatístico, de identificar o impacto da chuva na retrorrefletividade.

Houve uma certa dificuldade em conciliar as leituras de campo com os índices pluviômetros para inclusão no modelo, já que as medidas foram tomadas em dias diferentes aos de ocorrências de chuvas, sendo difícil a adoção de um padrão para a ocorrência das chuvas bem como a data da coleta das leituras de RI em campo. No início de monitoramento do trecho, houve uma maior periodicidade de leituras para que fosse possível denotar o início de decaimento da curva. Após um determinado período as leituras de RI em campo, foram realizadas as leituras com um maior intervalo de tempo.

Uma outra dificuldade também encontrada foi a categorização dos índices pluviométricos, já que as leituras não foram tomadas no trecho, dessa forma o valor obtido pode não representar a realidade no local. O índice pluviométrico apresenta em milímetros o resultado da somatória da quantidade de precipitação da chuva em um determinado local. Uma única chuva mais intensa por um curto período pode ser mais efetiva para a limpeza da pintura de sinalização horizontal, quando comparada com uma chuva mais moderada ao longo do dia, onde as duas podem apresentar o mesmo índice pluviométrico acumulado no dia. Como já dito anteriormente o Departamento de Estradas do Texas - TxDot (FHWA, 2003) comenta que a chuva pesada tem maior eficácia na limpeza da pintura de sinalização.

Devido aos motivos aqui expostos, os índices pluviométricos não foram incluídos nesta análise de dados. Este impacto da chuva sobre as medidas de RI da sinalização horizontal, no Brasil já foi estudado anteriormente por Salles et al (2015) e Fujii (2017) onde identificaram os picos de retrorrefletividade nas curvas de desgaste ao longo do tempo que correspondem a leituras realizadas após a ocorrência de chuvas.

5.2 DESGASTE DA PELÍCULA DE TINTA E MICROESFERAS

Depois de aproximadamente 500 dias de monitoramento do trecho experimento, onde por meio das curvas de desgaste verificou-se que as marcações já estavam próximas do limite residual de $100 \text{ mcd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$ Foram tiradas fotos com um microscópio digital

das pinturas em campo, permitindo uma avaliação do arranque de microesferas, desgaste da película de tinta e exposição dos agregados do pavimento.

A Figura 90 (a), Figura 91 (a) e Figura 92 (a) apresentam as amostras da pintura retiradas de campo e não foram sujeitas ao tráfego, onde ficam evidenciadas algumas microesferas ovóides e outras sem contornos definidos. A Figura 90, Figura 91 e Figura 92 (b) e (c) apresentam as imagens da condição da pintura em campo na aceleração e frenagem respectivamente. Observa-se que o arranque da película de tinta e microesferas é maior na aceleração quando comparado com a frenagem. A textura do pavimento também ocasiona algumas sombras na imagem devido à rugosidade do próprio pavimento, e próximos às microesferas de vidro, observa-se um acúmulo de borracha proveniente da aceleração e frenagem ocorridas na plataforma.

Figura 90 – Microesfera Alfa (50%II-A e 50% II-A)

Figura 91 – Microesfera Beta (50%II-A e 50% II-A)

Figura 92 – Microesfera Gama (50%II-A e 50% II-A)

5.3 CONSTRUÇÃO DE CURVAS DE DESGASTE

Um dos objetivos deste trabalho é a construção de curvas de desgaste dos diferentes materiais e variáveis associadas à variável de resposta retrorrefletividade. A estrutura da discussão aqui exposta está em função do tempo, do tráfego, hierarquização das microesferas e tintas, efeitos da aceleração e frenagem, desgaste na trilha de roda e eixo na pista e comparação de geometria 15 e 30m. Cabe salientar que existe interação entre os materiais aqui apresentados e que os resultados obtidos são característicos da condição experimental proposta.

5.3.1 Desgaste para as diferentes microesferas

Nesta pesquisa, como já foi explicado anteriormente, foram utilizados 3 fornecedores diferentes de microesferas. Aqui, estão denominadas como:

- Microesfera Alfa (α);
- Microesfera Beta (β);
- Microesfera Gama (γ);

A Figura 93 apresenta os resultados com as microesferas com a Tinta 01 e geometria de 15m.

Figura 93 – Desempenho das diferentes microesferas

*Curvas de Desgaste - Tinta 01 - Aceleração - Trilhas - Proporção 30/70 - Faixa 12 - Geometria 15m.

A Microesfera Gama (γ), para todas as condições deste experimento, obteve o melhor desempenho inicial quanto à retrorrefletividade. No entanto, é aquela que apresenta maior taxa de decréscimo com as solicitações de tráfego, chegando a ficarem muito próximos após a passagem de cerca de $2,0 \times 10^6$ eixos de solicitações. É importante ressaltar que a sinalização, neste experimento, está em uma situação que provoca sua solicitação imperativa por todos os veículos, já que está no sentido transversal à faixa de tráfego, o que não ocorre na realidade na sinalização horizontal paralela ao

eixo da pista, pois a cobertura pelos pneus é muito menos provável que no experimento realizado, sendo o desgaste neste experimento acelerado.

As Microesferas Alfa (α) e Beta (β) apresentaram comportamento similar, com valores de RL (retrorefletividade) próximos. Nas demais variações desse experimento, ora em cabines diferentes de tráfego, ora com uma tinta diferente, os comportamentos das microesferas Alfa (α) e Beta (β) se alternam, apresentando uma sutil diferença entre elas. No tratamento estatístico do Capítulo 06 este comportamento será melhor esclarecido.

Tal comportamento e distinção entre as Microesfera Alfa (α) e Beta (β), em relação à Microesfera Gama (γ), pode ser atribuído a uma das características das microesferas – a esfericidade. Como parte da caracterização dos materiais, foi realizada por meio do equipamento Camsizer®, a avaliação dos parâmetros da esfericidade das partículas das microesferas, apresentado anteriormente. A microesfera Gama (γ) apresentou melhores resultados e curvas mais uniformes, com uma grande quantidade de partículas com esfericidade acima de 0,7 para a granulometria II-A, o que ajuda a explicar os valores mais baixos de RL, se comparados com a microesfera Alfa (α) e Beta (β). Discussões sobre as variações quanto à esfericidade dos materiais podem ser vistas no item 3.3.

5.3.2 Desgaste das Diferentes Taxas de Aplicação de Microesferas

Sobre as pinturas de sinalização viária, foram utilizadas duas combinações de microesferas:

- i. Taxa de Aplicação 30/70 (30% - II-C/ 70% - II-A);
- ii. Taxa de Aplicação 50/50 (50% - II-A/ 50% - II-A – mesma microesfera, porém por dupla aspersão).

A Figura 94 apresenta o comparativo entre as duas proporções para a Microesfera Alfa. A Figura 95 (a) apresenta o comparativo para a microesfera Beta (β), e a Figura 95 (b) apresenta para a Microesfera Gama, todas para a Tinta 01 e Geometria de 15metros.

Figura 94 – Comparação entre taxas de aplicação de microesfera –Mcf Gama

*Tinta 01 - Aceleração /Trilhas/ Comparação entre Proporção 50/50 (50% II-A e 50%) e 30/70 (30% II-C e 70%II-A) - Faixa 14 - Geometria 15m.

Figura 95 – Comparação entre taxas de aplicação de microesfera Mcf Beta e Mcf Alfa

*Tinta 01 - Aceleração /Trilhas/ Comparação entre Proporção 50/50 (50% IIA e 50%) e 30/70 (30% II-C e 70%II-A) - Faixa 12 - Geometria 15m.

(a) Mcf Beta

*Tinta 01 - Aceleração /Trilhas/ Comparação entre Proporção 50/50 (50% IIA e 50%) e 30/70 (30% II-C e 70%II-A) - Faixa 12 - Geometria 15m.

(b) Mcf Gama

As duas proporções de microesfera apresentaram curvas de desgastes semelhantes, apresentando a mesma tendência de perda de retrorrefletividade. A granulometria 30-70 (30% - II-C/ 70% - II-A) demonstra ser levemente superior quando comparada com a granulometria 50-50 (50% - II-A/ 50% - II-A). Quando atingem o limite de retrorrefletividade de $100 \text{ mcd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$ apresentam valores semelhantes. No tratamento estatístico do Capítulo 06 este comportamento será melhor esclarecido.

5.3.3 Desgaste em função do tempo e tráfego

Como já mencionado anteriormente na revisão bibliográfica, o tempo e o tráfego afetam diretamente no desempenho da retrorrefletividade. As Figuras 96 (a) e (b) apresentam o decaimento da RL em função do tráfego e do tempo acumulados respectivamente. Nota-se semelhança no declínio das curvas de desgaste, já que se trata do mesmo material aplicado em campo. Para estas curvas, o valor limite de retrorrefletividade residual $120 \text{ mcd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$ é alcançado após 200 dias de solicitação de eixos e ainda se mantém após 520 dias, demonstrando uma curva com formato mais assintota. A Figura 96 (c) apresenta o acumulado do tráfego, porém diferenciado

entre tráfego leve (somatório dos carros de passeio), tráfego pesado (demais carros e caminhões) e tráfego total.

Figura 96 –RL em função do tempo acumulado e do tráfego (solicitações em eixos acumulados)

*Tinta 01 - Aceleração - Trilhas - Proporção 30/70 - Faixa 13 - Geometria 15m

(a) Retrorefletividade em função do tráfego

(b) retrorefletividade em função do tempo

(c) RL em função tempo e tráfego em função do tempo acumulado.

5.3.4 Efeito da Aceleração e Frenagem associadas ao tráfego e à velocidade

Observando a tendência das curvas para cada faixa de pedágio (entre pista norte e pista sul) observou-se que a Microesfera Gama (γ), embora apresente valores de RL elevados, também demonstra uma perda acentuada da retrorrefletividade quando comparadas com as Microesferas Alfa (α) e Beta (β), conforme visto anteriormente e já comentado.

Há três fatores relevantes a serem examinados: o número de eixos que solicitam a sinalização, o efeito do atrito dos pneus sobre estas esferas na aceleração ou desaceleração, e a adesividade das microesferas às tintas empregadas. Os três fatores se relacionam. O primeiro fator é relevante no sentido de solicitação dos pneus (quantos passam sobre a sinalização). Como a cabine de pedágio canaliza o tráfego, foi tomada por hipótese que a cobertura/passagem é uma relação 1,0, ou seja, 100% dos veículos que passam, solicitam a sinalização no mesmo local, o que é uma aproximação pois as sinalizações mais distantes das cabines sofrem uma menor probabilidade de cobertura de 100%. Este é o caso da microesfera Gama (γ), que na realidade pode ter sido até menos solicitada de forma acumulada por eixos que as demais pois o espriamento de solicitação nas trilhas é maior.

O segundo fator está relacionado ao arrancamento pelos pneus nos eixos direcionais, que podem gerar esforços adicionais ao girarem sobre as sinalizações nas acelerações, tal como ao deslizarem e girarem sobre as sinalizações na desaceleração (frenagem). A adesão na interface entre a superfície da microesfera está relacionada com o tratamento que as microesferas recebem como já explanado na revisão bibliográfica.

5.3.4.1 Número de eixos solicitantes

Para compreender melhor a ação do tráfego nas marcações de campo, foi plotado em um único gráfico, o tráfego associado para as diferentes pistas ou cabines - Figura 97. Fica denotado que as cabines de aceleração apresentam uma retrorrefletividade menor, pois a solicitação na aceleração é mais severa, o que leva a um desgaste mais acentuado. Esse comportamento de desgaste mais pronunciado na aceleração se deve ao arranque das microesferas e da película de tinta, já apontado no Item 5.2.O

Capítulo 06 faz uma análise estatística onde evidencia o comportamento do tráfego leve e pesado.

Figura 97 – Tráfego acumulado nas cabines - Mcf Gama - Tinta 01 - Geo. 15m.

*Tinta 01 - Aceleração e Frenagem - Trilhas - Proporção 30/70 - Geometria 15m

Um fato associado ao desgaste tanto na aceleração quanto na frenagem e que diz respeito à condição experimental é a composição do tráfego atuante diretamente sobre a demarcação viária, isto é, a quantidade de eixos solicitantes do tráfego pesado (caminhões) e a quantidade de eixos do tráfego leve (carros de passeio) nas diferentes cabines ou faixas de tráfego. A Figura 98 apresenta a somatória do tráfego (acúmulo de eixos) leve e pesado para todas as faixas de tráfego - cabines.

Figura 98 – Somatória do tráfego leve e pesado nas cabines de tráfego.

A Figura 99 (a) apresenta uma comparação direta do tráfego entre as cabines 10 (frenagem) e 13 (aceleração). A cabine 13 (aceleração) apresenta uma curva de desgaste com valores inferiores de RI quando comparada com a cabine 10 (frenagem). Ambas as faixas de tráfego possuem tráfego total semelhante, porém o tráfego pesado na faixa de aceleração é maior, o que também colabora com o desgaste.

Figura 99 - Somatória do tráfego leve e pesado nas cabines de tráfego 10 e 13.

(a) Tráfego leve e pesado - cab. 13 e 10

*Tinta 01 - Frenagem/ Aceleração - Trilhas - Proporção 30/70 - Geometria 15m - Mcf Gama

(b) curva de desgaste - cabines 10 e 13 - Mcf Gama

5.3.4.2 Velocidades (aceleração e frenagem)

A influência da velocidade sob a microesfera em questão foi considerada no sentido de analisar se na frenagem ou na aceleração há efeitos diferentes. Na Figura 100, pode-se observar a posição das pinturas de sinalização horizontal na aproximação ou distanciamento da praça de pedágio. A Microesfera Gama (γ) está mais distante das cabines, o que leva a considerar que sofra mais diretamente ação da velocidade tanto na chegada dos veículos pela Pista Sul (Faixas 09, 10 e 11), quanto na saída do pedágio na Pista Norte (Faixas 14, 13 e 12).

Figura 100 – Configuração das cabines e localização das áreas de aceleração e frenagem

A fim de avaliar a velocidade tanto da aproximação na chegada ao pedágio (frenagem); quanto na saída da praça (aceleração), foram medidas com uma pistola radar portátil, as diferentes velocidades para os diferentes veículos nas faixas de tráfego do Pedágio. O funcionamento da pistola é simples: foca-se na direção do veículo para que a medição seja realizada instantaneamente; sendo possível somente uma leitura por vez.

Para que não houvesse influência no comportamento do motorista ao visualizar a medição da velocidade através da pistola radar, as medições em campo foram realizadas em locais estratégicos, de modo que o condutor não visualizasse o técnico fazendo a medição, para que este não mudasse a velocidade de forma abrupta, interferindo nos resultados. A Figura 101 e Figura 102 ilustram a medição da velocidade sendo realizada.

A Tabela 17 apresenta os valores médios encontrados de velocidade para as Faixas da Pista Sul - aceleração e as faixas da Pista Norte - frenagem. Pode-se observar que na frenagem a velocidade costuma ser maior de entrada nas faixas de desaceleração (Pistas 09,10 e 11). Porém estas faixas nos fins de semanas e horários de pico costumam apresentar acúmulo de veículos para a passagem no pedágio, reduzindo mais ainda a solicitação da desaceleração ou frenagem, pois o tráfego pode até estar já parado e o movimento dos veículos ser muito lento, sem frenagem expressiva - Figura 101 e Figura 103. A Figura 103 demonstra um acúmulo de veículos parados na faixa, o que não permitiu a leitura de velocidade nestas ocasiões. Ou seja, em várias oportunidades os veículos estão parados ou quase parados. A Tabela 17 traz as medidas de velocidade.

Figura 101 – Posicionamento do Técnico para medição da velocidade

Figura 102 – Pistola Radar

Tabela 17 – Velocidade na Praça de Pedágio

Faixas		VELOCIDADES NA PRAÇA DE PEDÁGIO					
		Primeira marca de sinalização (Próxima à cabine)			Última marca de sinalização (distante da cabine)		
		Velocidade km/h	Desvio padrão	Coeficiente de variação	Velocidade Km/h	Desvio padrão	Coeficiente de variação
Aceleração	Caminhão	18,2	5,95	33%	29,5	5,73	20%
	Carro	26,0	3,79	15%	36,6	4,80	13%
	Moto	29,3	4,63	16%	44,7	6,38	14%
Frenagem	Caminhão	24,5	11,63	47%	33,0	8,24	25%
	Carro	23,8	6,98	29%	35,7	7,92	22%
	Moto	31,1	9,51	31%	35,0	9,80	28%

Figura 103 – Trecho Experimental - tráfego e formação de fila - Pista Norte

A Figura 104, Figura 105, e Figura 106 apresentam a perda da retrorrefletividade em função da velocidade para as faixas de tráfego 14, 13 e 09 respectivamente. É possível observar que ocorre decréscimo significativo da retrorrefletividade em função do aumento da velocidade, explicando em parte o comportamento da Microesfera Gama (γ). As marcações com a Microesfera Alfa (α) estão posicionadas em locais com velocidades mais baixas, o que também influenciou no desgaste, com um comportamento mais estável ao longo do tempo em relação à perda da retrorrefletividade. As marcações com a Microesfera Beta (β) estão posicionadas um pouco mais distantes, mas há indicativos que não sofre tanto o efeito desta velocidade ou aceleração/frenagem.

Figura 104 – RI em função da Velocidade - Faixa 14 - Aceleração.

Figura 105 – RI em função da Velocidade - Faixa 13 - Aceleração

Figura 106 – RI em função da Velocidade - Faixa 09 - Aceleração

5.3.5 Comparação entre Geometrias

Nas leituras realizadas em campo com o retrorrefletômetro, foi possível obter retrorefletividade de 15 e 30 metros, que simulam a distância de visibilidade noturna. A diferença entre as duas geometrias é referente ao ângulo de entrada e observação da luz emitida pelos faróis dos veículos, que correspondem à posição do farol e o posicionamento do motorista, respectivamente. A geometria de 15m corresponde a um ângulo de observação de 1,5° e de incidência de 86,5°; a geometria de 30m corresponde ao ângulo de observação de 1,05° e a um ângulo de incidência de 88,76°.

A Figuras 107, Figura 108 e Figura 109 apresentam a retrorefletividade das Microesferas Alfa (α), Beta (β) e Gama (γ), respectivamente, comparando Geometrias de 15m e 30m nas mesmas condições: Faixa 10, Tinta 01 Proporção 30/70 (30% II-C; e 70% II-A).

Figura 107 – Comparação entre geometria de 15m e 30m - Mcf Alfa (α)

*Tinta 01 -Frenagem - Trilhas - Proporção 30/70 - Geometria 15 e 30m.

Figura 108 – Comparação entre geometria de 15m e 30m – Mcf Beta (β)

*Tinta 01 - Frenagem - Trilhas - Proporção 30/70 - Geometria 15 e 30m

Figura 109 – Comparação entre geometria de 15m e 30m – Mcf Gama (γ)

*Tinta 01 - Frenagem - Trilhas - Proporção 30/70 - Geometria 15 e 30m

A geometria de 30m apresenta valores abaixo da geometria de 15m para todas as condições, fato este esperado. Os valores de retrorrefletividade para cada condição de 30m seguiram a mesma tendência de oscilações que a retrorreflexão de 15m para todas as condições.

A Microesfera Gama (γ) apresenta valores de RL de 30m acima dos valores de RL de 15m obtidos para as Microesfera Alfa (α) e Beta (β). Desta forma, pode-se garantir que a microesfera Gama (γ), inicialmente, apresenta melhor desempenho, para as duas geometrias, o que corresponde em campo a um bom desempenho para diferentes veículos (altura do farol) e distância de visibilidade da pintura. Já as microesferas Alfa (α) e Beta (β) apresentam valores relativamente baixos para retrorrefletividade de 30m. Observe-se também que apresentam uma menor diferença entre a retrorrefletividade de 15m e 30m, quando comparados com a Microesfera Gama (γ), que apresentam valores de RL de 15m e RL de 30m com grandes diferenças.

A distância de visibilidade é um fator importante para a segurança na via, sendo assim, pode-se afirmar que valores de RL de 30m mais elevados são favoráveis à segurança na via, contribuindo para que a informação necessária seja observada a uma maior distância e, conseqüentemente, ofereça um maior tempo para a tomada de decisão.

No Capítulo 06 desta pesquisa traz um tratamento estatístico dos dados, onde diferencia cada uma das diferentes geometrias.

5.3.6 Comparação dos desgastes entre trilha de roda e eixo

As medidas de retrorrefletividade de campo foram coletadas na trilha de roda e no eixo de cada faixa de rolamento, como já citado anteriormente, a fim de avaliar as variações quanto ao desgaste nestas diferentes posições.

A Figura 110, Figura 111 e Figura 112 apresentam o comparativo entre as Microesferas Alfa (α), Beta (β), e Gama (γ), respectivamente, para a retrorrefletividade no eixo (entre trilhas) e nas trilhas de roda, todas para a mesma faixa de tráfego, Taxa de Microesfera de 50/50 (50%II-A; e 50% II-A), Tinta 01 e Geometria de 30m.

Embora a passagem no pneu ocorra com pouca frequência no eixo da faixa, o desgaste do eixo seguiu a mesma tendência de decréscimo da trilha de roda.

Figura 110 – Comparativo entre a retrorrefletividade na trilha de roda e no eixo - Microesfera Alfa (α)

*Tinta 01 -Aceleração - Trilhas e Eixo - Proporção 50/50 - Cabine 14 - Geometria 30m

Figura 111 – Comparativo entre a retrorrefletividade na trilha de roda e no eixo - Microesfera Beta (β)

*Tinta 01 - Aceleração - Trilhas e Eixo - Proporção 50/50 - Cabine 14 - Geometria 30m

Figura 112 – Comparativo entre a retrorrefletividade na trilha de roda e no eixo - Microesfera Gama (γ)

*Tinta 01 - Aceleração - Trilhas e Eixo - Proporção 50/50 - Cabine 14 - Geometria 30m

Na trilha de roda, embora ocorra desgaste da película de tinta devido à ação abrasiva dos pneus, também ocorre uma limpeza sobre a demarcação, principalmente quando associado à chuva, fato este já explicado por Salles *et al* (2015) e verificado por Fujii (2017). Porém o eixo da trilha está submetido à sujeira acumulada e respingo de óleo dos veículos, a limpeza do eixo fica dificultada já que não ocorre a ação abrasiva dos pneus, logo a retroflexão fica prejudicada no eixo, sendo menor. Cabe aqui ressaltar que o trecho está localizado em uma praça de pedágio, onde em determinadas situações, os veículos costumam ficar aguardando em fila para a passagem no pedágio, estando desta forma o eixo da pintura mais exposto, tanto ao acúmulo de sujeira, quanto aos respingos de óleo dos veículos - Figura 113. A ação do clima e a deposição de contaminantes (sujeidade) são tão nocivas para a perda de retrorrefletividade, quanto o tráfego, nas condições do experimento.

Figura 113 – Sujidade no eixo da faixa

Fonte: banco de dados da pesquisa (2018)

O Capítulo 06 desta pesquisa trata da análise estatística dos dados quanto a posição da marcação, trilha de roda interna e externa.

6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Este capítulo apresenta uma proposição de um modelo linear onde procura relacionar as variáveis respostas: Retrorrefletividade do eixo da pintura na pista e a geometria de 15 metros (**RL Eixo - Geo. 15m**); Retrorrefletividade da trilha de roda da pintura na pista e geometria de 15 metro (**RL Trilha - Geo. 15m**); Retrorrefletividade do eixo da pintura na pista e geometria de 30 metro (**RL Eixo - Geo. 30m**), Retrorrefletividade da trilha de roda da pista e geometria de 30 metros (**RL Trilha – Geo. 30m**) em função de variáveis explicativas. Neste estudo foram consideradas como variáveis explicativas: as variáveis experimentais (ou fatores), as variáveis observacionais, as interações de segunda ordem entre os fatores e/ou entre fatores e observacionais.

As variáveis experimentais ou fatores escolhidos para este experimento foram: as tintas (dois tipos), microesferas (três fornecedores), granulometrias (duas composições) e sentido (frenagem ou aceleração). As variáveis observacionais incluídas no modelo foram: tempo acumulado em semanas, variação do tempo entre duas leituras sucessivas de retrorrefletividade, volume de tráfego pesado, volume de tráfego leve. Na Tabela 18 estão detalhadas as variáveis explicativas empregadas na determinação do modelo.

Foram obtidos quatro modelos lineares (um para cada variável de resposta RL, referente ao ponto de coleta da medida - trilha de roda e eixo e em função da geometria - 15 e 30 metros) utilizando o mesmo conjunto de variáveis explicativas. A decisão por esta estratégia é possibilitar a comparação de desempenho da retrorrefletividade em condições experimentais diferentes. Por exemplo, dada uma certa configuração experimental, a comparação das retrorrefletividade entre trilha e eixo de 15m e 30m pode ser feita através da diferença entre os coeficientes associados das variáveis explicativas.

O modelo linear final ajustado aos dados de retrorrefletividade pode ser escrito da seguinte forma (Equação 06):

$$Y_{ijklm} = \beta_0 + \beta_{1i} + \beta_{2j} + \beta_{3k} + \beta_{4l} + \beta_5 t_m + \beta_5^* Lt_m + \beta_6 \Delta_m + \beta_7 U_{pm} + \beta_8 U_{lm} + \beta_{12ij} + \beta_{23jk} + \beta_{24jl} + \beta_{2j7} U_{pm} + e_{ijklm} \quad (06)$$

Onde Y_{ijklm} denota o valor da retrorrefletividade (que pode ser: **(RL Eixo - Geo. 15m)** ou **(RL Trilha - Geo. 15m)** ou **(RL Eixo - Geo. 30m)** ou **(RL Trilha - Geo. 30m)** obtido empregando-se a tinta i , com microesfera j , na granulometria k , no sentido l realizada no tempo t_m ,. $i=1,2$; $j=1,2,3$; $k=1,2$; $l=1,2$, $m=1, 2, \dots, 26$; com as seguintes restrições: $\sum_{i=1}^2 \beta_{1i} = 0$; $\sum_{j=1}^3 \beta_{2j} = 0$; $\sum_{k=1}^2 \beta_{3k} = 0$; $\sum_{l=1}^2 \beta_{4l} = 0$; β_{12ij} denota o efeito da interação entre tinta e microesfera com a restrição $\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 \beta_{12ij} = \sum_{j=1}^3 \beta_{12ij} = \sum_{i=1}^2 \beta_{12ij} = 0$; β_{23jk} denota o efeito da interação entre microesfera e granulometria com as restrições $\sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^3 \beta_{23jk} = \sum_{j=1}^3 \beta_{23jk} = \sum_{k=1}^2 \beta_{23jk} = 0$; β_{24jl} mede o efeito da interação entre microesfera e sentido com as restrições $\sum_{l=1}^2 \sum_{j=1}^3 \beta_{24jl} = \sum_{j=1}^3 \beta_{24jl} = \sum_{l=1}^2 \beta_{24jl} = 0$; e β_{2j7} mede o efeito conjunto da microesfera em função do volume de tráfego pesado.

Tabela 18 – Identificação dos parâmetros

Variável		Identificação
Variáveis Experimentais	$\beta_{1i}, i = 1, 2$	<i>Tinta 01 e Tinta 02</i>
	$\beta_{2j}, j=1, 2, 3$	<i>Microesferas: Alfa, Beta e Gama</i>
	$\beta_{3k}, k=1, 2$	<i>granulometrias: 30/70 e 50/50</i>
	$\beta_{4l}, l = 1, 2$	<i>sentido do tráfego: (aceleração e frenagem)</i>
Covariáveis Observacionais	t_m	<i>tempo acumulado até a m – ésima leitura (em semanas)</i>
	Lt_m	$Lt_m = \ln t_m$
	Δ_m	<i>tempo entre duas sucessivas leituras: $t_m - t_{m-1}$</i>
	U_{pm}	<i>Volume de tráfego pesado (caminhões) acumulado no tempo t_m a cada 100 mil eixos</i>
	U_{lm}	<i>Volume de tráfego leve (carros de passeio) acumulado no tempo t_m a cada 100 mil eixos</i>

Na Tabela 19 estão apresentados os coeficientes atribuídos ao modelo final completo, considerando as variáveis experimentais, observacionais bem como as interações de segunda ordem, incluindo os coeficientes de determinação (R^2), associados a cada modelo. Os valores destacados na Tabela 19 (*) indicam os coeficientes estatisticamente pouco significativos. Comparando inicialmente os coeficientes atribuídos a cada modelo, nota-se que os coeficientes atribuídos à geometria de 15 metros são maiores, por isso mais expressivos. A análise nesta geometria facilita a hierarquização dos materiais, já que pequenas variações no comportamento estatístico destes materiais e suas interações são mais perceptíveis, já que seus valores são comumente maiores. Convém lembrar que a geometria está associada à distância entre a localização dos faróis dos veículos (fonte luminosas) e o ponto da demarcação viária que reflete a luz que recebe dos faróis. Quanto maior a distância, menor a retroreflexão da demarcação viária, logo os valores da retrorefletividade para geometria de 15 metros são maiores quando comparados com a geometria de 30 metros.

O coeficiente de determinação (R^2) é uma medida de ajuste do modelo linear utilizado e indica o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Nesta pesquisa, os coeficientes variam de 87% a 91%.

O Modelo ***RL Trilha Geometria 15m*** apresenta o maior coeficiente de determinação R^2 entre os quatro modelos propostos. O tráfego pesado (β_7) contribui de forma significativa para a queda da retrorefletividade, de semelhante modo nos demais modelos. Ou seja, para cada 100 mil eixos de caminhões, fixadas outras condições de tinta, microesfera, granulometria e sentido, há um decréscimo médio de 91,9 na retrorefletividade. Interpretações similares podem ser feitas para outros modelos. Ainda relacionado com o volume do tráfego pesado, há uma forte interação entre o tipo de microesfera Gama e o volume tráfego. O coeficiente β_{237} tem sinal negativo o que contribui para o decréscimo da retrorefletividade.

Coerentemente, pode-se observar que os coeficientes associados às covariáveis relacionadas com o tempo (t_m, Lt_m, Δ_m) são negativas o que contribuem para diminuir a retrorefletividade em função do tempo.

A interpretação dos efeitos relacionados às condições experimentais: tinta, microesfera, granulometria e sentido devem ser feitos com um maior cuidado visto que existem interações entre tintas com microesferas; microesferas com a granulometria e microesferas e o sentido do tráfego. Por exemplo, a microesfera Gama apresenta um coeficiente positivo (indicando um aumento), no entanto o coeficiente desta microesfera em conjunto com granulometria 30/70 é negativo

O Modelo **RL Eixo Geometria 15m** apresenta o um coeficiente de determinação de 89%. Neste sistema algumas interações não se apresentaram estatisticamente significativas como a interação da microesfera e a tinta, microesfera Alfa e granulometria 30/70, e por fim aceleração com a microesfera Gama.

Um fato relevante neste modelo **RL Eixo Geometria 15m** é o coeficiente associado ao tráfego tanto leve (β_8), quanto pesado β_7 é superior quando comparado ao Modelo **RL Trilha Geometria 15m**. Aqui, a principal diferença entre os dois modelos, está relacionada a ponto de coleta dos valores de retrorrefletividade, sendo um na trilha de roda da via, estando este sujeito à ação abrasiva dos pneus, e o outro no eixo da via, onde não sofre com os efeitos da passagem direta dos pneus, mas deteriora-se com a ação da sujeidade, respingos de óleos, entre outros. Este fato já foi denotado nesta pesquisa e apresentado no item 5.3.6.

Um outro fato a ser ressaltado é a interação do sentido do tráfego, a aceleração nas demarcações com a microesfera Gama. A constante $\beta_{2431} = -16,3$ foi a maior constante quando comparada com os demais modelos. Salienta-se que esta microesfera tem sua posição no trecho experimental mais longe das cabines, onde os veículos começam a ganhar velocidade na saída da praça de pedágio, ocorrendo a aceleração. Neste local em específico, ocorre o efeito da cobertura dos pneus dos veículos que começam a trocar de faixa, característico em uma praça de pedágio.

O modelo **RL Trilha Geometria 30m**, apresenta um coeficiente de determinação de 89%. Das expressões apresentadas, este foi o único modelo que não apresentou significância da variável associada ao tráfego leve.

A retrorrefletividade indica uma forte associação à microesfera Gama, com coeficientes expressivos, assim como os demais modelos, porém deteriora-se com a ação do tráfego pesado e a aceleração.

O modelo ***RL Eixo Geometria 30m*** indica uma maior sensibilidade ao tráfego pesado, quando comparado com os demais modelos. O coeficiente da microesfera Beta com a granulometria 30/70 apresentou maior valor, quando comparado com os demais modelos.

Destaca-se que os modelos aqui discutidos dizem respeito do arranjo experimental, e que se buscou encontrar dentro da matriz proposta, qual a melhor composição da interação dos materiais escolhidos com a ação e sentido de direção do tráfego. O trecho experimental foi executado de acordo com a norma da ASTM D713, que estabelece parâmetros para a execução do experimento com pinturas de marcação viária transversais ao tráfego, de modo que estão sujeitas ao desgaste da aceleração, devido à ação imperativa dos veículos.

Os modelos lineares propostos neste capítulo apresentaram algumas características importantes. São modelos relativamente simples, e têm coerência nos resultados. Embora sejam exploratórios, de modo geral apresentaram um ajuste conforme atestam as Figuras 114 (a) - (d). Estas figuras apresentam respectivamente os gráficos dos resíduos dos modelos ***RI Trilha e Geometria de 15 m***, ***RI Eixo e Geometria de 15 m***, ***RL Trilha Geometria 30m*** e ***RL Eixo Geometria 30m***. Pode-se observar os resíduos não apresentam tendência, bem como seguem distribuições normais.

Figura 114 – Resíduos para o modelo

(a) RL trilha Geom. 15m

(a) RL Eixo Geom. 15m

(c) RI trilha Geom 30m

(d) RI Eixo Geo. 30m

Fonte: banco de dados da pesquisa (2018)

Os demais dados referentes aos parâmetros consolidados do modelo completo estão apresentados no Apêndice I.

7 CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve por objetivo estudar a durabilidade da retrorreflexão nas marcações viária da sinalização horizontal em rodovia sujeita a tráfego intenso e muito pesado. Empregaram-se duas tintas à base de água de diferentes fabricantes e três microesferas de marcas diferentes, além de empregar duas taxas distintas de aplicação de microesferas sobre a tinta, que foram devidamente caracterizadas em laboratório. Para avaliação da retrorrefletividade foi executado trecho experimental de acordo com a norma da ASTM D713, que estabelece parâmetros para a execução do experimento com pinturas de marcação viária transversais ao tráfego, de modo que estão sujeitas ao desgaste acelerado, devido à ação imperativa dos veículos. O trecho em questão foi construído em uma praça de pedágio rodoviária, onde foi possível avaliar também o comportamento na aproximação dos dois sentidos de tráfego, isto é, na aceleração e na frenagem. Foram coletadas as medidas de retrorrefletividade por um período de 521 dias, ou cerca de um ano e meio. A tomada das medidas foi realizada nas trilhas de roda da via, onde obrigatoriamente recebem a passagem dos pneus e no eixo da pista, onde não ocorre a passagem dos pneus. A retrorreflexão foi medida em duas geometrias: 15 metros, sendo esta a geometria da norma nacional, e 30 metros, geometria comumente utilizada em outros países (USA, e CEN - Comitê europeu de normatização, Canadá etc.). A coleta de dados possibilitou a construção de curvas de desgaste para avaliação do comportamento das diferentes combinações empregadas em campo e, finalmente, foi realizado um tratamento estatístico dos dados coletados em campo, a fim de compreender melhor os resultados obtidos.

Dentre as microesferas empregadas para esta pesquisa, denominadas de forma genérica Alfa (α), Beta (β) e Gama (γ), a Microesfera Gama mostrou-se em campo com um melhor valor de retrorrefletividade inicial, bastante superior às microesferas Alfa (α) e Beta (β). A caracterização prévia de materiais pode contribuir para um melhor entendimento dos fenômenos encontrados em campo. Foram feitos ensaios de determinação da esfericidade das partículas de microesferas, empregando de forma inovadora no Brasil a imagem captada por luz incidente laser em partículas que se movem de forma constante no equipamento Camsizer, instalado no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da Escola Politécnica da USP. Pôde-se observar que a esfericidade das diferentes

microesferas é distinta, e a microesfera Gama (γ), possui uma distribuição de partículas mais uniforme, concentrada em grande porcentagem de maior esfericidade, o que explica seus melhores resultados iniciais. As microesferas Beta (β) são mais esféricas, por sua vez, que a microesfera Alfa (α), pois o fator b/l (relação entre a menor dimensão e a maior dimensão) são na média maiores para a microesfera Beta (β).

Em campo no trecho experimental, embora a Microesfera Gama apresentasse valores de RL inicialmente maiores, a queda da retrorrefletividade da microesfera Gama (γ), com o aumento e acúmulo de solicitações pelos eixos dos veículos, foi mais pronunciada durante o período de medições e análise dos resultados em campo. Os valores de retrorrefletividade se tornaram todos similares, ou seja, a microesfera Gama (γ) apresenta valores similares de retrorrefletividade das microesferas Alfa (α) e Beta (β) após diversas solicitações de eixos. Esse comportamento também ficou evidenciado com o tratamento estatístico, onde foi demonstrada uma maior sensibilidade da mesma microesfera com a interação com o tráfego pesado, quando comparado com as demais microesferas Alfa (α) e Beta (β).

Por meio da construção das curvas de desgaste para as diferentes faixas de tráfego, foi possível verificar o decréscimo da retrorrefletividade das marcações de campo com o tempo e o acúmulo de solicitações dos pneus de forma clara. As curvas de desgaste apresentavam pequenas oscilações da retrorrefletividade, oscilações estas que seguiam a mesma tendência, para as diferentes combinações empregadas na faixa de tráfego. Estas oscilações estão associadas às intempéries do local. Os aumentos de retrorrefletividade advêm da limpeza parcial da superfície das microesferas devido à chuva, e as oscilações negativas, com redução de retrorrefletividade, estão associadas à deposição de contaminantes sobre a pintura, evento este já constatado em outras bibliografias. Este efeito também pode ser associado na análise estatística nos modelos relacionados ao Eixo da via (RL Eixo Geo. 15m e RL Eixo Geo 30m), onde também ocorre um decréscimo da retrorrefletividade, mesmo não sendo pela ação direta dos pneus.

A grande maioria das curvas de desgaste apresentaram um aumento inicial da retrorrefletividade após a liberação ao tráfego, resultante do atrito do pneu na pintura e perda do excesso de microesferas que não estavam corretamente ancoradas na

película de tinta. Após aproximadamente 300 dias de campo, foi observado que grande parte das curvas de desgaste, apresentaram um comportamento mais estável do valor da retrorreflexão (curva de formato assíntota), indicando a atuação da microesfera Premix incorporada à tinta, antes da aplicação em campo, permitindo esta refletividade residual da marcação viária.

Este trabalho também possibilitou avaliar a durabilidade da sinalização sob a ação real do tráfego de uma rodovia de tráfego intenso e muito pesado. Nas bibliografias consultadas, consta em sua grande parte, que a análise é realizada em função do tempo decorrido após a aplicação. O tratamento estatístico evidenciou que a ação do tráfego pesado contribui para a queda da retrorreflexão, o que já era esperado, porém de forma inédita, indicou que o sentido do tráfego também atua de forma diferenciada na pintura, sendo a aceleração mais severa nos arranques das microesferas e, por consequência, na queda da retrorrefletividade. Esse fato também foi corroborado com a coleta de imagens no trecho experimental da película de tinta, onde foi denotada uma maior severidade no desgaste da pintura no trecho sob ação da aceleração dos veículos.

Nesta pesquisa foram empregadas tintas de resina acrílica emulsionada em água de fornecedores diferentes, dada as boas características técnicas e ambientais, aqui denominadas como Tinta 01 e Tinta 02. As tintas apresentaram resultados e padrões de desgaste seguindo a mesma tendência em campo, onde ocorreram alternância de superioridade de desempenho, a depender da microesfera. O comportamento levemente superior da Tinta 02 ficou mais evidenciado com a microesfera Beta (β), reforçando que, em campo, este desempenho sofre ação direta do tráfego e do clima.

Quanto à geometria de 15 e 30 metros, correspondentes à distância de visibilidade da pintura de sinalização, os valores de RL de 15 metros são superiores aos valores de 30 metros. No tratamento estatístico, os coeficientes associados à geometria de 15 metros foram também maiores, o que era esperado, já que os valores obtidos de campo também são maiores. Nesta geometria, com os coeficientes maiores, é possível hierarquizar os diferentes materiais propostos no trecho experimental, já que pequenas variações de comportamento são mais perceptíveis, o que na geometria de 30 metros não são evidenciados. O estudo das diferentes geometrias torna-se relevante pois é fator importante para a segurança na via, e valores de RL de 30m

mais elevados são favoráveis à segurança na via, contribuindo para que a informação necessária possa ser vista a uma maior distância e, conseqüentemente, ofereça um maior tempo para a tomada de decisão. Convém também aqui pontuar, os valores mínimos da retrorrefletividade residual que vêm sendo comumente empregados tanto em contratos de concessão de rodovia bem como nas demais rodovias não concessionadas. Os valores de RI residuais variam de $80 \text{ mcd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$ a $120 \text{ mcd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$, onde em sua grande maioria, tais contratos não especificam a geometria de leitura coleta em campo, sendo assim, empregada a geometria de 15m. No Brasil já existem novas normativas que especificam os procedimentos para medição com o geometria de 30m, sendo estes mais rigorosos e favoráveis a segurança tal como estabelecem padrões mais altos de qualidade, tanto dos materiais como dos processos executados em campo para a pintura da marcação viária.

O tratamento estatístico contribuiu de forma significativa na compreensão dos fenômenos encontrados em campo, assim como aqueles encontrados nas curvas de desgaste. A retrorrefletividade decai em função do tempo, é sensível à ação do tráfego pesado. A granulometria 30/70 apresenta um melhor desempenho quando comparada com a granulometria 50/50.

Destaca-se que os modelos aqui discutidos dizem respeito ao arranjo experimental, e que se buscou encontrar dentro da matriz proposta, qual a melhor composição da interação dos materiais escolhidos com a ação e sentido de direção do tráfego. A Tinta 02 também apresentou melhores resultados e destacou também uma interação favorável à retrorrefletividade quando associada à microesfera Beta. Já para a Tinta 01, a melhor interação ocorreu com a microesfera Alfa. Os resultados encontrados dizem respeito do arranjo experimental dos materiais empregados nesta pesquisa. A microesfera Gama pode apresentar deficiência de adesividade às tintas empregadas, o que explicaria o decaimento muito rápido da retrorrefletividade com o tempo ou com o tráfego. Pesquisas complementares deviam ser feitas para uma melhor compreensão de desempenho. O presente trabalho além de hierarquizar os materiais empregados, contribui para o entendimento de fenômenos de campo e a perda da retrorrefletividade.

REFERÊNCIAS

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **M 247**: Standard Specification for Glass bead used pavement marking. Washington, DC, 2013.

_____. **PP 74**: Standard Specification Determination of Size and Roundness of Glass Bead use in Traffic Marking by Means of Computerizes Optical Method. Washington, DC, 2013.

_____. **T346**: Standard Method of Test for Glass Bead used in Pavement Marking. Washington, DC, 2013.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D713**: Standard Practice for Conducting Road Service Tests on Fluid Traffic Marking Materials. Pensilvânia: 2012.

_____. **D2697**: Standard Test Method for Volume Nonvolatile Matter in Clear or Pigmented Coatings. Pensilvânia, 2014a.

_____. **D4060**: Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by Taber Abraser. Pensilvânia, 2014b.

_____. **E303**: Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using The British Pendulum Tester. Pensilvânia, 2013.

_____. **E965**: Standard Test Method for Pavement Macrottexture Deph Using a Volumetric Technique. Pensilvânia, 2015a.

_____. **E1710**: Standard Test Method for Measurement of Retroreflective Pavement Marking Materials with Geometry Using a Portable Retroreflectometer. Pensilvânia: 2011.

_____. **E2302**: Standard Test Method for Measurement of The Luminance Coefficient Under Diffuse Illumination of Pavement Marking Materials Using a Portable Reflectometer. Pensilvânia, 2016a.

_____. **E2366**: Standard Test Method for Measurement of Measurement of Daytime Chromaticity of Pavement Marking Materials Using a Portable Reflection Colorimeter. Pensilvânia, 2016b.

_____. **E2177**: Standard Test Method for Measuring the Coefficient of Retroreflected Luminance (RL) of Pavement Markings in a Standard Condition of Wetness. Pensilvânia, 2011b.

_____. **D1155**: Standard Test Method for Roundness of Glass Spheres. Pensilvânia, 2015b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16184**: Sinalização Horizontal Viária: Esferas e microesferas de vidro – Requisitos e Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15405**: Sinalização Horizontal Viária - Tintas - procedimentos para execução da demarcação e avaliação. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 15438**: Sinalização Horizontal Viária - Tintas - Métodos de Ensaio. - Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 13699**: Sinalização Horizontal Viária - Tinta a base de Resina Acrílica Emulsionada. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 16410**: Sinalização Horizontal Viária - Avaliação da retrorrefletividade utilizando equipamento dinâmico com geometria de 15m ou 30m Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 16307**: Sinalização Horizontal Viária - Avaliação da retrorrefletividade utilizando equipamento manual com geometria de 30m Rio de Janeiro, 2014

_____. **NBR 16184**: Sinalização Horizontal Viária - Esferas e microesferas de vidro. Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013

_____. **NBR 16184**: Sinalização Horizontal Viária - Termoplástico aplicado pelo método de extrusão. Rio de Janeiro, 2013

_____. **NBR 13159**: Sinalização Horizontal Viária - Termoplástico aplicado pelo processo de aspersão. Rio de Janeiro, 2013

_____. **NBR 16039**: Sinalização Horizontal Viária - Termoplástico pré-formado para sinalização - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2012

_____. **NBR 15741**: Sinalização Horizontal Viária - Laminado Elastoplástico para sinalização. Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 15870**: Sinalização Horizontal Viária - Plástico a frio á base de resinas metacrílicas reativas. Fornecimento e aplicação. Rio de Janeiro, 2016.

ABBOUD, Nasser; BOWMAN, Brian. Cost- and Longevity-Based Scheduling of Paint and Thermoplastic Striping. **Transportation Research Record**: Journal of the Transportation Research Board, [s.l.], v. 1794, p.55-62, jan. 2002. Transportation Research Board.

ANTT - AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Programa De Exploração da Rodovia Per Rodovia Br-116/RJ/SP - Presidente Dutra Trecho: Rio De Janeiro – São Paulo Tomo I - 16ª. Revisão Ordinária E 5ª Revisão Extraordinária Aprovada Pela Resolução Nº. 3.784, De 15/02/2012 (Publicado no D.O.U. em 08/03/2012) **Ministério dos Transportes**. Brasília. 2012.

_____. Programa de Exploração das Rodovias PER Rodovias BR-116/RS e BR-392/RSPÓLO PELOTAS. Atualizado até: 12ª Revisão Ordinária e 8ª Revisão Extraordinária Aprovados pela Resolução nº 4.976, de 22/12/2015 (publicada no D.O.U. em 24/12/2015). **Ministério dos Transportes**. Brasília. 2015

_____. Programa De Exploração Da Rodovia PER Rodovia. BR-393/RJ TRECHO: Div. MG/RJ – Entr. BR-116 (Via Dutra). 9ª Revisão Ordinária e 10ª Revisão Extraordinária Aprovada pela Resolução n.º 5.752, de 28/02/2018 (publicada no D.O.U. em 01/03/2018). **Ministério dos Transportes**. Brasília. 2018a.

_____. PROGRAMA DE EXPLORAÇÃO DA RODOVIA PER RODOVIA BR-116/SP/PRTRECHO: São Paulo – Curitiba. 10ª Revisão Ordinária e 11ª Revisão Extraordinária. Aprovada pela Deliberação n. 1.059 de 20/12/2018 (publicada no D.O.U. em 21/12/2018). **Ministério dos Transportes**. Brasília. 2018b.

ARTESP - AGÊNCIA REGULADORA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DELEGADOS DE TRANSPORTE DO ESTADO DE SÃO PAULO. Concessão Onerosa, do Rodoanel Mário Covas – Trecho Oeste, Interligação entre os Corredores de acesso à metrópole De São Paulo - Sp-348; Sp-330; Sp-280; Sp-270 E Br116. São Paulo. 2008.

_____. Concessão Onerosa, do Corredor Ayrton Senna/Carvalho Pinto constituído pelas rodovias SP070, SP-019, SPI-179/060, SPI-035/056, SP-099, SP-070 – prolongamento até a SP-125, Lote 23. São Paulo. 2008.

ASDRUBALI, F. *et al.* Assessment of the Performance of Road Markings in Urban Areas: The Outcomes of the Civitas Renaissance Project. **The Open Transportation Journal**, Universitu of Perugia - Italy, v. 7, p. 7-19, 2013.

ASI - AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE. **EN 13197**: Road marking materials - Wear simulator Turntable. Áustria, 2015.

BABIC, D. Application And Characteristics Of Waterborne Road Marking Paint. **International Journal for Traffic and Transport Engineering**, Sérvia, p. 150-169, 2014.

BAST.Road Marking -Road markings - not just a line on the road [site]. Disponível em:<http://www.bast.de/EN/Traffic_Engineering/Subjects/markierungen.html?nn=604752>, acesso 18 jul 2017.

BENS, Robert Joseph; PIKE, Adam M; KUCHANGI, Shamanth P; BRACKETT, Quinn. Serviceable Pavement Marking Retroreflectivity Levels: Technical Report. **Federal Highway Administration** - FHWA/TX-09/0-5656-1,150p. Texas, 2009.

BERNUCCI, L. L. B. *et al.* **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras / Abeda, 2008.

BRANCO, A. M. **Segurança Rodoviária**. São Paulo: CL-A Cultura, 1999. 109p.

CEN - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN 1436**- Road marking materials - Road marking performance for road users and test methods (2007). Belgium 2007;

_____.**CEN 13197**: Road marking materials - Wear simulator Turntable. Belgium. 2011

CHEHAB, G. R.; TANG, X. The use of a multi-set-up, reduced-scale accelerated trafficking simulator for evaluating roadway systems and products. **International Journal of Pavement Engineering**, Taylor & Francis, v. 13, n. 6, dez. 2012, p. 535-552.

CHOUBANE, Bouzid et al. Repeatability and Reproducibility of Mobile Retroreflectivity Units for Measurement of Pavement Markings. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, [s.l.], v. 2337, n. 1, p.74-82, jan. 2013. SAGE Publications

CONTRAN - CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Sinalização Horizontal**. 1. ed. Brasília, 2007. v. 4, 128 p. (Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito).

COST 331 - Requirements for Horizontal Road Marking - Final Report of the Action 1999

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **EM 371:** Tinta para sinalização rodoviária à base de resina estireno-acrilato e/ou estireno/butadieno. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **DNER EM 373/2000** – Microesferas de vidro retrorrefletivas para sinalização horizontal viária. Rio de Janeiro, 2000.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. **Especificações Técnicas Programa BR - LEGAL.** Rio de Janeiro, 2013. (Processo nº 50600.008728/2013-11)

_____. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos.** Rio de Janeiro, 2006. (Publicação IPR – 720)

_____. **Manual de Sinalização Viária.** Rio de Janeiro, 2010. (Publicação Instituto de Pesquisas Rodoviárias). (Publicação IPR – 743)

_____. **Norma DNIT 409 - PRO:** Medida da retrorrefletividade com uso de equipamento dinâmico - Procedimento. Rio de Janeiro, 2017. (IPR - Instituto de Pesquisas Rodoviárias)

_____. **Norma DNIT 100-ES:** Obras complementares – Segurança no tráfego rodoviário – Sinalização horizontal – Especificação de serviço - Procedimento. Rio de Janeiro, 2018. (IPR - Instituto de Pesquisas Rodoviárias)

FAZENDA, J. M. R. (Coord.). **Tintas Ciência e Tecnologia.** São Paulo: Blucher, 2009.

FEDERAL SPECIFICATION: TT-B 1325C 2007- Beads (Glass Spheres) Retro-Reflective, 1978.

FUJII, W. Y. Avaliação do desempenho dos elementos de sinalização viária em rodovias. 2017. 169 f. Tese (Doutorado) - Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

FWHA - FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Effective Pavement Marking Practices For Seal coat And Hot-Mix Asphalt Pavements.** Washington: Transportation Institute, 2003. (Publication nº FHWA/TX-03/0-4150-4)

_____. **Roadway Delineation Practices Handbook.** Washington: Transportation Institute, 1994. (Publication nº FHWA-SA-93-001)

_____. **Methods for Maintaining Pavement Marking Retroreflectivity.** Washington: Transportation Institute, 2014. (Publication n° FHWA-SA-14-017)

_____. **Pavement Marking Demonstration Projects: State of Alaska and State of Tennessee.** Washington: Transportation Institute, 2013. (Publication n° FHWA 12-048)

_____. **Roadway Delineation Practices Handbook.** Washington: Transportation Institute, 1994. (Publication n° FHWA - SA 93-001)

GREYSON, Eric. Low Cost, Long Term Wet Retroreflectivity From Waterborne Traffic Paint: Wet Retroreflectivity Performance with Various Glass Bead Packages. **Journal Of The Transportation Research Board**, Washington Dc, United State, p.1-10, 1 out. 2016. CD-ROM meeting.

HUMMER, Joseph E; RASDORF, William J; ZHANG, Guanghua. The impact of region on thermoplastic pavement marking retroreflectivity. **TRB - Transportation Research Board 91st Annual Meeting** . V1. 13p. Washington. 2012.

Hawlitsek, G. **Caracterização das propriedades dos agregados miúdos reciclados e a influência no comportamento reológico de argamassas.** 2014. 173p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Engenharia Mineral, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014

HIGHWAY MARKINGS. **A Guide to IS EN 1436 European Standard for Road Marking.** Irlanda, 2007. Disponível em:
<http://www.highwaymarkings.ie/documents/is_en_1436_1.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2017.

KEPPLER, Rudolp. Road Marking approval test in Germany. 1° Road Marking Symposium. Intertraffic. **Federal Highway Research Institute.** Germany. 2008

LCT - LABORATÓRIO DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA. **Princípio de Funcionamento do Sistema Automatizado de Análise de Tamanho e Morfológico de Partículas Camsizer® - Informativo de Ensaio.** São Paulo: Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo/ USP, 2016. 5 p.

MALYUTA, D. A. **Analysis Of Factors Affecting Pavement Markings And Pavement Marking Retroreflectivity In Tennessee Highways.** 2015. 110p. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Tennessee em Chattanooga, Tennessee, 2015.

MARQUES, A. F. R. **Manutenção e Conservação de Sinalização em Autoestradas - Caso de Estudo - A8 Autoestrada do Oeste.** 2016. 161p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa - Portugal, 2016.

Mizera, C. M. **Improving pavement marking performance through contrasting new methods to quantify marking presence and increasing installation efficiencies through an evaluation of prototype bead guns**. 2008. 70p. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado de Iowa, Engenharia de Transportes, Iowa - Estados Unidos. 2008.

MOURA, E. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório**. 2010. Xxx f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MOREIRA, H; MENEGON, R. **Sinalização horizontal**. São Paulo: Master Set Gráfica, 2003. 82 p.

MOREIRA, H; MOREIRA, H. J. Visibilidade na Sinalização Horizontal. **ABEETRANS - Associação Brasileira das Empresas de Engenharia de Trânsito**, São Paulo, 13 abr. 2009. Disponível em: <<http://www.abeetrans.com.br/abeetrans/Artigo.asp?ArtigoAtivo=79>>. Acesso em: 30 maio 2016.

NCHRP - National Cooperative Highway Research. Revisions of AASHTO PP 74 Test Method for Optical sizing and Shape Determination of Glass Beads Utilized in Traffic Markings . NCHRP 20-7 (364) [s.l.], p.01-150, aug. 2017. Transportation Research Board.

OMS. Organização Mundial da Saúde. **Relatório Global sobre o estado da Segurança Viária 2015**. Genebra. 2015. 16p. Suíça. Disponível em: http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/Summary_GSRRS2015_POR.pdf?ua=1. Acesso: 12 dez 2016

Ozelim. L. C. S. M. **Pavement Marking Specifications Compliance and Modeling of Retroreflectivity Performance**. Dissertação (Mestrado). 2012. 111p. Universidade de Auburn. Alabama - Estados Unidos. 2012.

OZELIM, Luana; TUROCHY, Rod E..Modeling Retroreflectivity Performance of Thermoplastic Pavement Markings in Alabama. **Journal Of Transportation Engineering**, [s.l.], v. 140, n. 6, p.050140011-050140016, jun. 2014. American Society of Civil Engineers (ASCE).

PIKE, Adam M.; SCHWENN, Brandon. Evaluation of ASTM Standard Test Method E2177.**Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [s.l.], v. 2272, n. 1, p.87-93, jan. 2012. SAGE Publications.

POR VIA SEGURAS. **Estatísticas Nacionais de Acidentes de Trânsito**. 1 imagem. [S.l.], 2017. Disponível em: < http://www.vias-seguras.com/os_acidentes/estatisticas/estatisticas_nacionais>. Acesso em: 02 jul. 2017.

ROBERTSON, Joseph et al. A Methodology for Estimating and Comparing the Lifecycles of High-Build and Conventional Waterborne Pavement Markings on Primary and Secondary Roads in South Carolina. **Public Works Management & Policy**, [s.l.], v. 18, n. 4, p.360-378, 19 jul. 2012. SAGE Publications.

SALLES, L. S. *et al.* Avaliação retrorrefletiva de pintura de demarcação horizontal: peculiaridades e considerações sobre a norma e os requisitos mínimos nacionais. **Transportes**, São Paulo, v. 23, n. 2, 2015, p. 5-17.

SMADI, Omar et al. Recommended Laboratory Test for Predicting the Initial Retroreflectivity of Pavement Markings from Glass Bead Quality. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, [s.l.], v. 2440, n. 1, p.94-102, jan. 2014

SMADI, Omar et al. Predicting the Initial Retroreflectivity of Pavement Markings from Glass Bead Quality. **NCHRP REPORT 743**, [s.l.], p.01-83, 7 mar. 2013. Transportation Research Board.

SATHYANARAYANAN, Sudhakar; SHANKAR, Venky; DONNELL, Eric T.. Pavement Marking Retroreflectivity Inspection Data. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [s.l.], v. 2055, n. 1, p.63-70, jan. 2008. SAGE Publications.

SASIDHARAN, Lekshmi; KARWA, Vishesh; DONNELL, Eric T.. Use of Pavement Marking Degradation Models to Develop a Pavement Marking Management System. **Public Works Management & Policy**, [s.l.], v. 14, n. 2, p.148-173, out. 2009. SAGE Publications.

SITZABEE, William E.; HUMMER, Joseph E.; RASDORF, William. Pavement Marking Degradation Modeling and Analysis. *Journal Of Infrastructure Systems*, [s.l.], v. 15, n. 3, p.190-199, set. 2009. American Society of Civil Engineers (ASCE).

SCHNELL, Thomas; AKTAN, Fuat; LEE, Yi-ching. Nighttime Visibility and Retroreflectance of Pavement Markings in Dry, Wet, and Rainy Conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, [s.l.], v. 1824, p.144-155, jan. 2003. Transportation Research Board.

SCHWAB, M. S. F. **Estudo do Desempenho dos Materiais de demarcação Viária de Demarcação Viária Retrorrefletivos**. Dissertação (Mestrado), UFOP, 1999.

SMADI, Omar et al. Predicting the Initial Retroreflectivity of Pavement Markings from Glass Bead Quality. *Nchrp Report 743*, [s.l.], p.01-83, 7 mar. 2013. **Transportation Research Board**.

TERNZ. Transport Research. Report on Testing and Approval of Roadmarking Materials. **NZ Road Markers Federation**. Austrália. 2011

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

TXDOT - Texas Department of Transportation. Pavement Marking Handbook. Manual Notice 2004-1. Aug 2004.

VDOT - Virginia Department of Transportation – **Reflecive glassbead** – Guide - 2012. Disponível em: www.virginiadot.org/business/.../MCS.../bu-mat-PaveMarkCh3.pdf. Acesso em 15 out 2016; Virginea - 2016

VDOT. **Chapter 3 Traffic Paint..** Virginia Department of Transportation Disponível em: www.virginiadot.org/business/.../MCS.../bu-mat-PaveMarkCh3.pdf. Acesso em 15 out 2016; Virginea - 2016

ZWAHLEN, Helmut; SCHNELL, Thomas. Minimum In-Service Retroreflectivity of Pavement Markings. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [s.l.], v. 1715, p.60-70, jan. 2000. Transportation Research Board.

APÊNDICE - I

ANÁLISE ESTATÍSTICA MODELO - TRILHA DE RODA - GEOMETRIA 15m.

$$R^2 = 91,58$$

Term	Coef	SE	Coef
Constant	413,931	2,041	202,84
Semanas_Acum	-3,1111	0,4504	-6,91
Inweek	-11,634	2,356	-4,94
delta	-2,524	0,1343	-18,79
delta*Tpesado	1,21375	0,07052	17,21
Tleve	10,606	1,763	6,02
T pesado	-91,903	5,084	-18,08

T pesado*Microesfera			
Alfa	11,369	1,238	9,18
Beta	21,223	1,238	17,15
Gamma	-32,592		

Sent_traf			
aceleração	-23,158	1,077	-21,5

Tinta			
Tinta 1	-6,4596	0,9212	-7,01

Microesfera			
Alfa	-62,882	1,728	-36,39
Beta	-91,213	1,728	-52,8
Gamma	154,095		

Granul.			
30/70	6,5307	0,9186	7,11
50/50	-6,5307		

Tinta*Microesfera			
1xAlfa	3,068	1,3	2,36
1xBeta	-5,859	1,3	-4,51
1xgamma	2,791		

Microesfera*Granul.			
Alfa - 30/70	3,083	1,299	2,37
Beta - 30/70	4,166	1,298	3,21
Gamma - 30/70	-7,249		

Sent_traf*Microesfera			
Aceleração - Alfa	5,792	1,302	4,45
Aceleração - Beta	-2,134	1,301	-1,64
Aceleração - Gama	-3,658		

ANÁLISE ESTATÍSTICA MODELO - EIXO - GEOMETRIA 15M

 $R^2 = 89,39$

Term	Coef	SE	Coef
Constant	430,54	2,332	184,6
Semanas_Acum	-5,0366	0,5148	-9,78
Inweek	-8,986	2,692	-3,34
delta	-1,9897	0,1535	-12,96
delta*Tpesado	1,18583	0,0806	14,71
Tleve	22,44	2,014	11,14
Tpesado	-111,444	5,811	-19,18

T pesado*Microesfera			
Alfa	20,909	1,415	14,78
Beta	15,454	1,415	10,92
Gama	-36,363		

Sent_traf			
Aceleração	-14,667	1,231	-11,91

Tinta			
Tinta 1	-14,912	1,053	-14,16

Microesfera			
Alfa	-81,097	1,975	-41,06
Beta	-77,02	1,974	-39,01
Gamma	158,117		

Granul.			
30/70	3,857	1,05	3,67
50/50	-3,857		

Tinta*Microesfera			
1 *Alfa	1,372	1,486	0,92
1*Beta	-5,529	1,486	-3,72
1*gamma	1,372	1,486	0,92

Microesfera*Granul.			
Alfa - 30/70	1,554	1,484	1,05
Beta - 30/70	10,052	1,483	6,78
Gamma - 30/70	-11,606		

Sent_traf*Microesfera			
Aceleração - Alfa	13,477	1,488	9,06
Aceleração - Beta	2,812	1,487	1,89
Aceleração - Gama	-16,289		

ANÁLISE ESTATÍSTICA MODELO - TRILHA DE RODA - GEOMETRIA. 30m.

 $R^2 = 89,66$

Term	Coef	SE	Coef
Constant	334,879	1,851	180,91
Semanas_Acum	-2,6039	0,4086	-6,37
Inweek	-20,837	2,137	-9,75
delta	-1,1735	0,1218	-9,63
delta*Tpesado	1,38379	0,06397	21,63
Tleve	-0,139	1,599	-0,09
Tpesado	-82,859	4,612	-17,97

T pesado*Microesfera			
Alfa	11,201	1,123	9,98
Beta	16,868	1,123	15,02
Gama	-28,069		

Sent_traf			
Aceleração	-20,2422	0,977	-20,72

Tinta			
Tinta 1	-4,2998	0,8356	-5,15

Microesfera			
Alfa	-42,095	1,567	-26,86
Beta	-66,211	1,567	-42,25
Gamma	108,306		

mGranul.			
30/70	6,16	0,8332	7,39
50/50	-6,16		

Tinta*Microesfera			
1 *Alfa	1,748	1,18	1,48
1*Beta	-2,314	1,179	-1,96
1*gamma	0,566		

Microesfera*Granul.			
Alfa - 30/70	3,834	1,178	3,25
Beta - 30/70	1,29	1,177	1,1
Gamma - 30/70	-5,124		

Sent_traf*Microesfera			
Aceleração - Alfa	5,293	1,181	4,48
Aceleração - Beta	-0,591	1,18	-0,5
Aceleração - Gama	-4,702		

ANÁLISE ESTATÍSTICA MODELO - EIXO - GEOMETRIA. DE 30m.

$$R^2 = 87,80$$

Term	Coef	SE	Coef
Constant	332,846	2	166,44
Semanas_Acum	-4,1151	0,4414	-9,32
Inweek	-13,176	2,309	-5,71
delta	-0,8497	0,1316	-6,46
delta*Tpesado	1,36326	0,06911	19,73
Tleve	10,571	1,727	6,12
Tpesado	-102,142	4,982	-20,5

T pesado*Microesfera			
Alfa	21,368	1,213	17,61
Beta	13,219	1,213	10,9
Gama	-34,587		

Sent_traf			
Aceleração	-6,885	1,056	-6,52

Tinta			
Tinta 1	-9,4436	0,9027	-10,46

Microesfera			
Alfa	-67,851	1,693	-40,07
Beta	-55,152	1,693	-32,58
Gamma	123,003		

mGranul.			
30/70	4,423	0,9002	4,91
50/50	-4,4236		

Tinta*Microesfera			
1 *Alfa	0,046	1,274	0,04
1*Beta	-2,813	1,274	-2,21
1*gamma	2,767		

Microesfera*Granul.			
Alfa - 30/70	-1,276	1,273	-1
Beta - 30/70	7,494	1,272	5,89
Gamma - 30/70	-6,218		

Sent_traf*Microesfera			
Aceleração - Alfa	4,221	1,276	3,31
Aceleração - Beta	2,346	1,275	1,84
Aceleração - Gama	-6,567		