

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Avaliação de misturas mornas com
emprego de simulador de tráfego linear**

Larry Rivoire Junior

Porto Alegre
2014

LARRY RIVOIRE JUNIOR

**AVALIAÇÃO DE MISTURAS MORNAS COM
EMPREGO DE SIMULADOR DE TRÁFEGO LINEAR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Porto Alegre
2014

CIP - Catalogação na Publicação

Rivoire Jr., Larry

Avaliação de misturas mornas com emprego de simulador de tráfego linear / Larry Rivoire Jr.. -- 2014.

249 f.

Orientador: Jorge Augusto Pereira Ceratti.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2014.

1. Asfalto. 2. Mistura Morna. 3. Pavimento. 4. Simulador de Tráfego. 5. Zeólita. I. Ceratti, Jorge Augusto Pereira, orient. II. Título.

LARRY RIVOIRE JUNIOR

**AVALIAÇÃO DE MISTURAS MORNAS COM
EMPREGO DE SIMULADOR DE TRÁFEGO LINEAR**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 29 de agosto de 2014.

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti
D.Sc. pela COPPE - UFRJ
Orientador

Prof. Armando Miguel Awruch
Dr. pela UFRJ
Coordenador do PPGE/UFGRS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Glicério Trichês (UFSC)
Dr. pelo ITA

Prof. Luciana Rohde (UFSC)
Dra. pela UFRGS

Prof. Luciano Pivoto Specht (UFMS)
Dr. pela UFRGS

Prof. Luiz Antônio Bressani (UFRGS)
Ph.D. pelo Imperial College. University of London

*Dedico este trabalho a minha esposa Claudia e aos meus filhos
André e Diogo pelo amor, carinho e compreensão.
E aos meus pais, Larry e Walmira,
por tudo que fizeram por mim.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à empresa Coesul – Construtora Extremo-Sul Ltda, nas pessoas do Srs. Aldo Malta Dihl e Renato Otto Mottola, do Eng. Leandro Goggia e do laboratorista Reny Silva, quanto ao fornecimento de equipamentos, materiais e mão-de-obra para a execução dos testes, estando sempre disponível e prestando amplo apoio para a execução da pesquisa.

À empresa Celta Brasil Ltda., nas pessoas dos Srs. Fernando Borsatto e Roberto Cintra, que auxiliaram o trabalho de maneira determinante fornecendo as zeólitas naturais que serviram como o aditivo principal para análise de desempenho, sempre presente em todas as fases dos testes.

À Prefeitura Municipal de Porto Alegre, pelo apoio total e irrestrito, mostrando interesse no desenvolvimento do trabalho e pensando em utilizar no município a tecnologia objeto desta pesquisa.

À Secretaria Municipal de Obras e Viação (SMOV), órgão onde trabalho e aprendi muito sobre gestão, construção, conservação e pavimentação de vias urbanas, aos meus colegas, especialmente ao Engenheiro Mestre José Carlos Keim, a quem devo muito sobre os conhecimentos que tenho e apoio e incentivo na área acadêmica.

À Fundação de Ciência e Tecnologia/RS (CIENTEC), principalmente aos Engenheiros Mestres Leandro Taborda e Guilherme de Souza pelo apoio para execução dos ensaios de difração de raio-X e perda ao fogo em amostras de zeólitas e informações importantes na área tecnológica.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) principalmente aos doutores Glicério Trichês, que contribui para a pesquisa utilizando seu laboratório de asfalto para a realização do ensaio de fadiga.

Ao meu orientador, Dr. Jorge Augusto Pereira Ceratti, ao qual expresso minha sincera gratidão pela oportunidade de adquirir um crescimento profissional e intelectual, por sua orientação e visão crítica sobre o trabalho através do seu conhecimento ímpar no entendimento do universo da pavimentação.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que sustenta esta tese de doutoramento, através do seu corpo docente, pela dedicação e compartilhamento do seu conhecimento.

Agradecimentos especiais aos professores doutores Luciana Rohde, Washington Peres Núñez, Suyen Nakahara e Lélío Brito, pelas muitas consultas que fiz e conselhos que recebi, sempre obtendo apoio e contribuições fundamentais para o desenvolvimento dos trabalhos.

Aos laboratoristas, em nome do Vinícius, alunos bolsistas, em nome do Douglas, ao Sr. Ivo, aos funcionários do LAPAV/UFRGS, aos colegas de pós-graduação e a todos que de alguma forma contribuíram para esta pesquisa.

Ao Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da UFRGS, pela utilização de seu microscópio de varredura eletrônica, emprestando sua tecnologia para auxílio no desenvolvimento da tese.

À minha família, aos meus pais e irmã, à minha esposa Claudia e aos meus filhos André e Diogo, pelo amor e apoio incondicional, vocês são tudo e por isso dedico este trabalho a vocês.

Aos amigos e a Deus, que me ajudou a ter forças para superar todos os momentos difíceis que surgiram no caminho.

*"O primeiro dever da inteligência é desconfiar dela mesma."
(Albert Einstein)*

RESUMO

RIVOIRE, L. Avaliação de misturas asfálticas mornas com emprego de simulador de tráfego linear. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Esta pesquisa relata o estudo da elaboração e avaliação de desempenho de misturas asfálticas mornas com uso de zeólitas naturais. Ela foi dividida em três etapas. A primeira consistiu na execução de ensaios de laboratório que buscaram conhecer algumas propriedades e o funcionamento da mistura asfáltica morna com utilização de zeólitas naturais através da determinação do projeto da mistura e da elaboração em diferentes temperaturas. A segunda etapa consistiu na preparação da usina de asfalto para misturas à quente para a fabricação de misturas a temperaturas inferiores, nas regulagens de temperatura e na verificação dos procedimentos necessários para adequar uma usina padrão para elaborar misturas mornas nas temperaturas de projeto. Na última etapa, foi feito o acompanhamento do transporte, espalhamento, compactação das misturas mornas e posterior avaliação de desempenho dos pavimentos, com o emprego de simulador de tráfego linear, em três testes, realizados em duas pistas experimentais, localizadas na Área de Testes de Pavimentos, no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Palavras chave: Asfalto, Mistura Morna, Pavimento, Simulador de Tráfego, Zeólita

ABSTRACT

RIVOIRE, L. Evaluation of warm asphalt mixtures with the use of linear traffic simulator. Thesis (Doctorate in Engineering) – Post Graduate Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

This research reports the study of the production, implementation and performance evaluation of warm asphalt mixtures prepared by adding natural zeolites. It was divided into three stages. The first consisted of performing laboratory tests that get to know some properties and the functioning of warm mix asphalt, determining the projects of mixtures which were used in accelerated tests after analysis of specimens produced by different temperatures of manufacturing and compression. The second step consisted of preparing an asphalt plant for conventional mixtures for the manufacture of mixtures at lower temperatures, in temperature settings, and checking the necessary procedures to tailor a pilot plant to produce warm mixtures according to the temperatures of the project. In the last step, the transport, spreading and compaction of warm mixtures and subsequent performance evaluation of pavements were checked, with the use of linear traffic simulator in three tests conducted on two experimental tracks, located in Testing Pavement Area, on Valley Campus of the Federal University of Rio Grande do Sul.

Keywords: Asphalt, Warm Mix Asphalt, Pavement, Traffic Simulator, Zeolite

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	15
LISTA DE TABELAS.....	22
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS	24
1 INTRODUÇÃO	27
1.1 JUSTIFICATIVA	30
1.2 OBJETIVO GERAL.....	31
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	32
1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE	32
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	34
2.1 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS.....	34
2.1.1 PROCESSOS POR ESPUMA	37
2.1.1.1 Accu-Shear®	37
2.1.1.2 Advera® WMA	39
2.1.1.3 AQUABlack®	44
2.1.1.4 Aspha-min®	47
2.1.1.5 Astec Double Barrel Green®	49
2.1.1.6 Ecofoam II.....	51
2.1.1.7 Low Energy Asphalt (LEA)	54
2.1.1.8 Meeker – Acqua Foam.....	57
2.1.1.9 Terex® WMA System (Grupo Fayat – Bomag Marini).....	60
2.1.1.10 Ultrafoam GX2 system	62
2.1.2 PROCESSOS POR ADITIVOS QUÍMICOS MELHORADORES DE ADESIVIDADE E ADITIVOS TENSOATIVOS	65
2.1.2.1 Cecabase RT®	65
2.1.2.2 Evotherm®	66
2.1.2.3 Rediset®	68

2.1.3	PROCESSOS POR CERAS E ADITIVOS ORGÂNICOS	70
2.1.3.1	Sasobit®	71
2.1.3.2	SonneWarmix™	72
2.2	USO DE MISTURAS MORNAS NO MUNDO.....	74
2.3	ZEÓLITAS	79
2.3.1	CLASSIFICAÇÃO DAS ZEÓLITAS	80
2.3.1.1	Propriedades e aplicações das zeólitas naturais	85
3	MATERIAIS E MÉTODOS	87
3.1	DESCRIÇÃO DA PESQUISA	87
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	88
3.2.1	ZEÓLITAS NATURAIS	89
3.2.2	CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP)	100
3.2.3	AGREGADOS PÉTREOS	101
3.2.3.1	Determinação da Abrasão Los Angeles.....	103
3.2.3.2	Equivalente de Areia.....	103
3.2.3.3	Determinação do índice de forma.....	104
3.2.3.4	Determinação da absorção e densidade do agregado graúdo.....	105
3.2.3.5	Sanidade de agregados pelo uso de sulfato de sódio	106
3.2.3.6	Agregado graúdo – Adesividade à ligante betuminoso	106
3.2.4	CAL HIDRATADA.....	107
3.2.5	SUBLEITO ARGILOSO EXISTENTE.....	110
3.3	ESTUDOS MISTURA MORNA EM LABORATÓRIO	111
3.3.1	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA	111
3.3.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	111
3.3.3	DANO POR UMIDADE INDUZIDA	112
3.3.4	MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	113
3.3.5	FADIGA	114
3.4	PRODUÇÃO DA MISTURA MORNA EM LABORATÓRIO.....	115
3.5	TESTES ACELERADOS NO SIMULADOR DE TRÁFEGO DAER/UFRGS	118
3.5.1	RESPOSTA ESTRUTURAL – MEDIDA DAS DEFLEXÕES.....	119
3.5.2	DEFEITOS DE SUPERFÍCIE - AFUNDAMENTOS	122
3.5.3	DEFEITOS DE SUPERFÍCIE - TRINCAMENTOS	123

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ESTUDOS DE LABORATÓRIO DAS MISTURAS MORNAS COM ADIÇÃO DE ZEÓLITAS NATURAIS	125
4.1 PROJETOS DAS MISTURAS MORNAS	125
4.1.1 PROJETO DA MISTURA MORNA 1	127
4.1.2 PROJETO DA MISTURA MORNA 2.....	131
4.2 RESULTADOS DE ENSAIOS PRODUZIDOS EM LABORATÓRIO PARA AUXÍLIO NA PESQUISA	134
4.2.1 RESULTADOS REFERENTES AO PROJETO DE MISTURA MORNA 1	134
4.2.1.1 Resultados de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração - MM1	135
4.2.1.2 Resultados de Danos por Umidade Induzida e Adesividade - MM1	137
4.2.2 RESULTADOS REFERENTES AO PROJETO DE MISTURA MORNA 2 – MM2.....	138
4.2.2.1 Resultados de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração – MM2.....	138
4.2.2.2 Resultados de Danos por Umidade Induzida e Adesividade – MM2.....	140
4.3 RESULTADOS DE ENSAIOS PRODUZIDOS EM LABORATÓRIO A PARTIR DE AMOSTRAS RETIRADAS DAS PISTAS EXPERIMENTAIS	141
4.3.1 RESULTADOS REFERENTES À EXECUÇÃO DA MISTURA MORNA 1 – MM1	141
4.3.1.1 Extração e propriedades da mistura morna 1 - MM1	141
4.3.1.2 Resultados de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração - MM1	143
4.3.1.3 Resultados de Danos por Umidade Induzida- MM1	144
4.3.2 RESULTADOS REFERENTES À EXECUÇÃO DA MISTURA MORNA 2	145
4.3.2.1 Extração e propriedades da mistura morna 2 – MM2	145
4.3.2.2 Resultados de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração – MM2.....	147
4.3.2.3 Resultados de Danos por Umidade Induzida – MM2.....	148
4.3.2.4 Resultado do ensaio de fadiga de 4 pontos – MM2.....	149
5 PROCESSO DE PRODUÇÃO EM USINA DE ASFALTO E CONSTRUÇÃO E DAS PISTAS EXPERIMENTAIS COM MISTURA MORNA ATRAVÉS DA ADIÇÃO DE ZEÓLITAS NATURAIS	154
5.1 PRODUÇÃO DA MISTURA MORNA EM USINA DE ASFALTO	154
5.1.1 PRODUÇÃO DA MISTURA MORNA (PROJETO 1) PARA A PISTA EXPERIMENTAL 1	155
5.1.2 PRODUÇÃO DA MISTURA MORNA (PROJETO 2) PARA A PISTA EXPERIMENTAL 2	160
5.2 CONSTRUÇÃO DAS PISTAS EXPERIMENTAIS.....	164
5.2.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DAS PISTAS EXPERIMENTAIS	166
5.2.2 CONSTRUÇÃO DA PISTA EXPERIMENTAL 1	166

5.2.3	CONSTRUÇÃO DA PISTA EXPERIMENTAL 2	174
6	MONITORAMENTO DAS PISTAS EXPERIMENTAIS EXECUTADAS COM MISTURA MORNA ATRAVÉS DA ADIÇÃO DE ZEÓLITAS NATURAIS	184
6.1	MONITORAMENTO DA PISTA 1	184
6.1.1	HISTÓRICO DO CARREGAMENTO – PISTA 1	185
6.1.2	PARÂMETROS AMBIENTAIS – PISTA 1	186
6.1.3	RESPOSTA ESTRUTURAL – PISTA 1	189
6.1.4	PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO – PISTA 1	194
6.2	MONITORAMENTO DA PISTA 2 – LADO ESQUERDO (LE)	196
6.2.1	HISTÓRICO DO CARREGAMENTO – PISTA 2 (LE)	196
6.2.2	PARÂMETROS AMBIENTAIS – PISTA 2 (LE)	197
6.2.3	RESPOSTA ESTRUTURAL – PISTA 2 (LE)	201
6.2.4	PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO – PISTA 2 (LE)	206
6.3	MONITORAMENTO DA PISTA 2 – LADO DIREITO (LD)	209
6.3.1	HISTÓRICO DO CARREGAMENTO – PISTA 2 (LD)	209
6.3.2	PARÂMETROS AMBIENTAIS – PISTA 2 (LD)	211
6.3.3	RESPOSTA ESTRUTURAL – PISTA 2 (LD)	216
6.3.4	PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO – PISTA 2 (LD)	221
6.4	CONTROLES E AVALIAÇÕES ADICIONAIS	225
6.4.1	INVESTIGAÇÃO DO AFUNDAMENTO POR TRILHO DE RODAS – PISTA 2 (LD)	225
6.4.2	AVALIAÇÃO DO GRAU DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA MORNA – MM2	228
6.4.3	RETROANÁLISE DAS CAMADAS DO PAVIMENTO	230
6.4.4	ANÁLISE ELÁSTICA DE MÚLTIPLAS CAMADAS	231
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	232
7.1	CONCLUSÕES	232
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	239
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	240

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Temperaturas e consumo energético para tipos de misturas asfálticas.	35
Figura 2.2 – Equipamento para mistura pressurizada do sistema Accu-Shear®	38
Figura 2.3 – Sistema Accu-Shear® montado em usina de asfalto	39
Figura 2.4 – Reservatório de água em evidência	39
Figura 2.5 – Aparência, microscopia e rótulo da zeólita sintética Advera	40
Figura 2.6 – Adaptação para introdução de Advera® WMA em usina de asfalto.	41
Figura 2.7 - Adaptação para introdução de Advera® WMA em usina de asfalto.....	41
Figura 2.8 – Adaptação para introdução de Advera® WMA em usina de asfalto.	42
Figura 2.9 – Adaptação para introdução de Advera® WMA em usina de asfalto.	42
Figura 2.10 - Armazenagem em silo e em big-bags da zeólita sintética Advera® WMA.....	43
Figura 2.11 - Armazenagem em vagões ferroviários da zeólita sintética Advera® WMA	43
Figura 2.12 - Aplicação de WMA com zeólita sintética Advera® em Yellowstone Park (EUA)	44
Figura 2.13 – Detalhe do Foamer do AQUABlack®	45
Figura 2.14–Câmara de mistura e injeção sob pressão do sistema AQUABlack®	46
Figura 2.15 – Painel de controle touchscreen do AQUABlack®	46
Figura 2.16 – Aparência da zeólita sintética Aspha-min®	47
Figura 2.17 – Armazenamento de Aspha-min® em big-bags e silo.....	48
Figura 2.18 – Equipamento injetor de Aspha-min®	49
Figura 2.19 – Detalhamento do injetor de água do sistema Astec Double Barrel Green®	50
Figura 2.20 – Sistema Astec Double Barrel Green® implantado em usina.....	50
Figura 2.21 – Reservatório de água do sistema Astec Double Barrel Green®	51
Figura 2.22 – Misturador estático do sistema Ecofoam II	52
Figura 2.23 – Detalhamento do injetor de água no misturador Ecofoam II.....	52
Figura 2.24 – Turbulência formada no interior do misturador Ecofoam II.....	53
Figura 2.25 – Equipamentos do sistema Ecofoam II	54
Figura 2.26 – Agregados miúdos molhados na temperatura ambiente no processo LEA	55
Figura 2.27 – Sistema de injeção de aditivo no processo LEA	56
Figura 2.28–Sequência de processo LEA	57
Figura 2.29 – Medidor de água do sistema Meeker – Acquafoam.	58
Figura 2.30 – Misturador de água e CAP do sistema Meeker – Acquafoam.	59

Figura 2.31 – Tubo injetor da mistura de água e CAP no misturador- Sistema Meeker – Acquafoam.	60
Figura 2.32 – Tanque de água, medidor e bombeamento	61
Figura 2.33 – Esquema do sistema TEREX [®] WMA	61
Figura 2.34 – Detalhe da câmara de expansão e dos bicos injetores de asfalto espumado.....	62
Figura 2.35 – Gerador de espuma Gencor – Ultrafoam GX2.....	63
Figura 2.36 – Controlador da entrada de água e CAP Gencor – Ultrafoam GX2	63
Figura 2.37 – Mistura de água e CAP no Gerador de espuma Gencor – Ultrafoam GX2	64
Figura 2.38 – Injeção de CAP espumado no tambor misturador da usina	64
Figura 2.39 – Tanque de armazenamento do Cecabase RT [®]	66
Figura 2.40 –Bomba e tanque e típico utilizado para fornecimento de Evotherm [®] à mistura .	68
Figura 2.41–Falha de adesão na mistura asfáltica	68
Figura 2.42–Rediset [®] na forma de pastilhas sólidas.....	69
Figura 2.43–Inserção de pastilhas de Rediset [®] no tanque de CAP.....	69
Figura 2.44 – Cêra Sasobit [®] introduzida no tambor misturador por injetor	71
Figura 2.45 – Caminhão tanque para transporte de SonneWarmix [™]	73
Figura 2.46 – Percentual de companhias utilizando WMA nos EUA	74
Figura 2.47 – Evolução do uso de WMA nos EUA.....	75
Figura 2.48 - Unidades estruturais básicas das zeólitas. A.Tetraedro com um átomo de silício	81
Figura 2.49 - Unidades de construção secundária das zeólitas	82
Figura 2.50 - Estrutura das zeólitas.....	82
Figura 2.51 - Fotos de zeólitas.naturais: a) Clinoptilonita-K b) Clinoptilonita-Na c) Clinoptilonita-CA	83
Figura 2.52 – Estrutura da Clinoptilonita.....	85
Figura 3.1 – Blocos de zeólita natural em Cuba.....	89
Figura 3.2 – Perfil em corte da jazida de zeólita natural em Cuba	90
Figura 3.3 – Zeólita natural após britagem	90
Figura 3.4 – Resultado da difração de raio-x da zeólita da pesquisa.....	91
Figura 3.5 – Resultados da análise por difração de raio-x da zeólita da pesquisa.....	92
Figura 3.6 – Resultados de análise por difração de raio-x da zeólita da pesquisa.....	92
Figura 3.7 – Amostras preparadas em STUBs	94
Figura 3.8 – Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL JSM 6060.....	94
Figura 3.9 – Amostra ampliada em 4.500X	95

Figura 3.10 – Amostra ampliada em 15.000X	96
Figura 3.11 – Amostra ampliada em 20.000X	96
Figura 3.12 – Amostra ampliada em 30.000X	97
Figura 3.13 – Curva liberação de água x temperatura na zeólita natural.....	99
Figura 3.14 – Caracterização do ligante utilizado	100
Figura 3.15 - Curva viscosidade x temperatura para o ligante asfáltico	101
Figura 3.16 – Derrame basáltico no Rio Grande do Sul	102
Figura 3.17 – Caracterização da cal hidráulica.....	109
Figura 3.18 – Sacos da cal utilizada na pesquisa.....	109
Figura 3.19 – Diagrama de esforços da viga	114
Figura 3.20 - Adição de CAP e zeólitas naturais aos agregados	116
Figura 3.21 - Produção da mistura morna manualmente	117
Figura 3.22 - Mistura morna aguardando temperatura de compactação.....	117
Figura 3.23 - Simulador de Tráfego DAER/UFRGS.....	118
Figura 3.24 - Pista 2 – Controle estrutural da base através da viga Benkelman na base	120
Figura 3.25–Aplicação do perfilógrafo na seção transversal	123
Figura 3.26 - Pista 2 (LD) – Controle visual de trincas no C.A.	124
Figura 4.1 -Faixa granulométrica do projeto de mistura 1	127
Figura 4.2 - Determinação gráfica do projeto de mistura 1	129
Figura 4.3 - Faixa granulométrica do projeto de mistura 2.....	131
Figura 4.4 - Determinação gráfica do projeto de mistura 2	133
Figura 4.5 – Valores médios de MR das misturas mornas estudadas.....	136
Figura 4.6 – Valores médios de RT das misturas mornas estudadas.....	136
Figura 4.7 – Resultados de dano por umidade induzida	137
Figura 4.8 – Valores médios de MR	139
Figura 4.9 – Valores médios de RT	139
Figura 4.10 –Valores de dano por umidade induzida - MM2	140
Figura 4.11 – Composição granulométrica da mistura produzida e comparação com o projeto – MM1.....	142
Figura 4.12 – Comparação dos Módulos e Resiliência– MM1	143
Figura 4.13 – Comparação da Resistência à Tração– MM1	144
Figura 4.14 – Comparação do dano por umidade induzida de projeto e execução – MM1...	144
Figura 4.15 – Composição granulométrica da mistura produzida e comparação com o projeto – MM2.....	146

Figura 4.16 – Comparação dos Módulos e Resiliência– MM2	147
Figura 4.17 – Comparação da Resistência à Tração– MM2	148
Figura 4.18 – Comparação do dano por umidade induzida– MM2	148
Figura 4.19 – Retirada de placa de asfalto da pista 2.....	149
Figura 4.20 – Vigotas produzidas para o ensaio de fadiga.....	149
Figura 4.21 – Curvas Isotérmicas	151
Figura 4.22 – Representação da parte real a imaginária do módulo complexo.....	152
Figura 4.23 – Curva de fadiga obtida.....	153
Figura 5.1 - Detalhe misturador e janela por onde foram introduzidas as zeólitas	154
Figura 5.2 - Detalhe das pás no interior misturador em vista superior na	155
Figura 5.3 - Pesagem de zeólita para mistura com cal antes da adição no misturador	157
Figura 5.4 - Descarregamento da mistura zeólita + cal no misturador com controle do tempo	158
Figura 5.5 – Controle de temperatura da mistura através da temperatura do filtro de manga	158
Figura 5.6 - Temperatura de produção da mistura morna na usina (114,3°C)	159
Figura 5.7 – Caçamba coberta com lona para transporte da mistura morna	160
Figura 5.8 – Pesagem de 3kg de zeólitas naturais para inserção no misturador	161
Figura 5.9 – Inserção da zeólita no misturador	161
Figura 5.10 – Controle da temperatura no filtro de manga (127°C)	162
Figura 5.11 – Controle da temperatura da massa morna com termômetro tipo espeto	163
Figura 5.12 – Controle da temperatura da massa morna com termômetro tipo pistola a laser	163
Figura 5.13 – Gráfico Temperatura no filtro de manga x Temperatura da massa asfáltica ...	164
Figura 5.14 – Localização da construção das pistas experimentais no LAPAV/UFRGS.....	165
Figura 5.15 – Distância entre a usina de asfalto da COESUL e o LAPAV/UFRGS	166
Figura 5.16 – Temperatura da mistura morna ao chegar no LAPAV/UFRGS	167
Figura 5.17 – Mistura morna com deficiência de recobrimento	167
Figura 5.18 – Alguns agregados não cobertos totalmente pelo ligante	168
Figura 5.19 – Imprimação da pista existente.....	168
Figura 5.20 - Pista 1 - Estrutura do pavimento existente (Rohde, 2007) e capa executada ...	169
Figura 5.21 - Início do espalhamento da mistura morna (109,9°C).....	170
Figura 5.22 - Início e final da compactação da mistura morna com rolo de pneus (107,3°C e 86,8°C).....	170
Figura 5.23 - Início e final da compactação da mistura morna	171

Figura 5.24–Gráfico temperatura de usinagem x tempo máximo para aplicação da massa asfáltica	173
Figura 5.25 - Estrutura do subleito existente e pavimento executado.	174
Figura 5.26 - Pista 2 – Compactação do subleito argiloso.....	175
Figura 5.27 - Pista 2 – Verificação do subleito argiloso com viga benkelman.....	175
Figura 5.28 – Espalhamento da base de brita graduada.....	176
Figura 5.29 –Compactação da base de brita graduada.....	176
Figura 5.30 – Verificação da base de brita graduada através da viga benkelman.....	177
Figura 5.31 – Controle do grau de compactação base de.....	177
Figura 5.32 – Imprimação da base de brita graduada	178
Figura 5.33 - Pista 2 – Pista 1 e preparação da pista 2.....	178
Figura 5.34 – Medida de temperatura na caçamba na chegada ao LAPAV.....	179
Figura 5.35 - Início do espalhamento da mistura morna na primeira camada (122,2°C)	180
Figura 5.36 - Compactação da mistura morna na primeira camada (111,7°C)	180
Figura 5.37 - Final da compactação da mistura morna na primeira camada (97,5°C).....	181
Figura 5.38 - Espalhamento da segunda camada (106°C).....	181
Figura 5.39 - Final da compactação da mistura morna com rolo de chapa (95°C).....	182
Figura 6.1 – Esquema da pista de testes 1.....	185
Figura 6.2 – Pista 1 – Evolução do carregamento	185
Figura 6.3 – Pista 1 – Temperaturas ambiente diárias	188
Figura 6.4 – Pista 1 – Temperaturas ambiente diárias	188
Figura 6.5 – Pista 1 – Precipitações pluviométricas durante o carregamento.....	189
Figura 6.6 – Pista 1: Deflexão e raio de curvatura para N=0 (Seção 5).....	190
Figura 6.7 – Pista 1: Deflexão e raio de curvatura para N=9680 (Seção 5).....	190
Figura 6.8 – Pista 1: Deflexão e raio de curvatura para N=25750 (Seção 5).....	191
Figura 6.9 – Pista 1: Deflexão e raio de curvatura para N=40491 (Seção 5).....	191
Figura 6.10 – Pista 1: Deflexão e raio de curvatura para N=56206 (Seção 5).....	192
Figura 6.11 – Pista 1: Deflexão e raio de curvatura para N=72971 (Seção 5).....	192
Figura 6.12 – Pista 1: Deflexão e raio de curvatura para N=88453 (Seção 5).....	193
Figura 6.13 – Pista 1: Histórico de deflexões máximas (Seção 5)	194
Figura 6.14 – Pista 1, aparência final da pavimento após N de 103471 ciclos.	195
Figura 6.15 – Pista 1, aparência final da pavimento após N de 103471 ciclos.	196
Figura 6.16 – Esquema da pista de testes 2 LE	197
Figura 6.17 – Pista 2 LE – Evolução do carregamento.....	197

Figura 6.18 – Pista 2LE – Temperaturas ambiente diárias	199
Figura 6.19 – Pista 2LE – Temperaturas ambiente diárias	199
Figura 6.20 – Pista 2LE – Temperaturas ambiente diárias	200
Figura 6.21 – Pista 2LE – Temperaturas ambiente diárias	200
Figura 6.22 – Pista 2LE – Precipitações pluviométricas durante o carregamento	201
Figura 6.23 – Pista 2 LE: Deflexão e raio de curvatura para N=7300 (Seção 5)	202
Figura 6.24 – Pista 2 LE: Deflexão e raio de curvatura para N=10000 (Seção 5)	202
Figura 6.25 – Pista 2 LE: Deflexão e raio de curvatura para N=30000 (Seção 5)	203
Figura 6.26 – Pista 2 LE: Deflexão e raio de curvatura para N=49738 (Seção 5)	203
Figura 6.27 – Pista 2 LE: Deflexão e raio de curvatura para N=66000 (Seção 5)	204
Figura 6.28 – Pista 2 LE: Deflexão e raio de curvatura para N=91200 (Seção 5)	204
Figura 6.29 – Pista 2 LE: Deflexão e raio de curvatura para N=103357 (Seção 5)	205
Figura 6.30 – Pista 2LE: Histórico de deflexões máximas (Seção 5).....	206
Figura 6.31 – Pista 2 LE: Afundamentos de trilho de rodas – Seção 4	207
Figura 6.32 – Pista 2 LE: Afundamentos de trilho de rodas – Seção 5	207
Figura 6.33 – Pista 2 LE: Afundamentos de trilho de rodas – Seção 6	208
Figura 6.34 – Pista 2LE: Evolução dos ATR máximos (Seção 5).....	208
Figura 6.35 – Esquema da pista de testes 2 LD.....	209
Figura 6.36 – Fator de equivalência de operações.....	210
Figura 6.37 – Pista 2 LD – Evolução do carregamento	211
Figura 6.38 – Pista 2LD – Temperaturas ambiente diárias	213
Figura 6.39 – Pista 2LD – Temperaturas ambiente diárias	213
Figura 6.40 – Pista 2LD – Temperaturas ambiente diárias	214
Figura 6.41 – Pista 2LD – Temperaturas ambiente diárias	214
Figura 6.42 – Pista 2LD – Temperaturas ambiente diárias	215
Figura 6.43 – Pista 2LD – Precipitações pluviométricas durante o carregamento.....	215
Figura 6.44 – Pista 2 LD: Deflexão e raio de curvatura para N=38.400 (Seção 5).....	216
Figura 6.45 – Pista 2 LD: Deflexão e raio de curvatura para N=80.000 (Seção 5).....	217
Figura 6.46 – Pista 2 LD: Deflexão e raio de curvatura para N=160.000 (Seção 5).....	217
Figura 6.47 – Pista 2 LD: Deflexão e raio de curvatura para N=224.000 (Seção 5).....	218
Figura 6.48 – Pista 2 LD: Deflexão e raio de curvatura para N=320.000 (Seção 5).....	218
Figura 6.49 – Pista 2 LD: Deflexão e raio de curvatura para N=352.000	219
Figura 6.50 – Pista 2 LD: Deflexão e raio de curvatura para N=390.400 (Seção 5).....	219
Figura 6.51 – Pista 2 LD: Deflexão e raio de curvatura para N=538.080 (Seção 5).....	220

Figura 6.52 – Pista 2LD: Histórico de deflexões máximas (Seção 5)	221
Figura 6.53 – Pista 2 LD: Afundamentos por trilho de rodas na Seção 4.....	222
Figura 6.54 – Pista 2 LD: Afundamentos por trilho de rodas na Seção 5.....	222
Figura 6.55 – Pista 2 LD: Afundamentos por trilho de rodas na Seção 6.....	223
Figura 6.56 – Pista 2LD: Evolução dos ATR máximos (Seção 5)	223
Figura 6.57 – Pista 2 LD e LE: Aspecto final da evolução dos ATR.....	224
Figura 6.58 – Pista 2 LD e LE: Aspecto final da evolução dos ATR.....	224
Figura 6.59 – Ciclo do simulador de tráfego do LAPAV/UFRGS.....	225
Figura 6.60 – Posição dos furos de onde foram extraídos os CPs para	226
Figura 6.61 – Corpos de prova extraídos da Pista 2 - LD.....	227
Figura 6.62 – Espessura esperada de CA na pista 2 – LD antes do carregamento.....	227
Figura 6.63 – Espessura do CP extraído da pista 2 – LD no local do ATR máximo.	227
Figura 6.64 – Situação mais provável de ocorrência no revestimento asfáltico	228
Figura 6.65 – Pesagem dos corpos de prova extraídos da pista 2D.....	229
Figura 6.66 – Resultado da retroanálise através do SisPav 2009	230

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Redução percentual da emissão de gases em usinas de WMA	36
Tabela 2.2 – Reservas mundiais de zeólitas	80
Tabela 2.3 – Classificação das zeólitas	80
Tabela 2.4 – Fórmulas e propriedades de algumas espécies de zeólita	84
Tabela 3.1 – Características da zeólita natural tipo clinoptilonita utilizada na pesquisa.....	91
Tabela 3.2 – Conversão de unidades de referência.....	93
Tabela 3.3 – Composição da mistura morna 2 com teor de água liberado pelas zeólitas	98
Tabela 3.4 – Resultado do ensaio de Abrasão Los Angeles.....	103
Tabela 3.5 – Resultado do ensaio de Equivalente de Areia	104
Tabela 3.6 – Resultado do ensaio de Índice de Forma.....	105
Tabela 3.7 – Resultado do ensaio de absorção e da densidade do agregado graúdo	105
Tabela 3.8 – Resultado do ensaio de sanidade	106
Tabela 3.9 – Reservas lavráveis de Calcário nos estados brasileiros em 2006	108
Tabela 3.10 – Principais empresas produtoras de Calcário no Brasil, em 2005	108
Tabela 3.11 - Propriedades do solo argiloso existente.....	110
Tabela 3.12 - Tempo de operação do simulador para simular 10 ⁶ ciclos por carga	119
Tabela 4.1 - Temperaturas de estudo do asfalto morno	126
Tabela 4.2 – Composição granulométrica do projeto de mistura 1	127
Tabela 4.3 – Materiais usados no projeto de mistura 1.....	128
Tabela 4.4 – Massa específica dos materiais usados no projeto de mistura 1.....	128
Tabela 4.5 – Massa específica - Projeto de mistura 1.....	128
Tabela 4.6 – Projeto de mistura 1	129
Tabela 4.7 – Parâmetros do Projeto de mistura 1	130
Tabela 4.8 – Temperaturas e teores - Projeto de mistura 1	131
Tabela 4.9 – Composição granulométrica do projeto de mistura 2	131
Tabela 4.10 – Materiais usados no projeto de mistura 2.....	132
Tabela 4.11 – Massa específica dos materiais usados no projeto de mistura 2.....	132
Tabela 4.12 – Massa específica - Projeto de mistura 2.....	132
Tabela 4.13 – Projeto de mistura 2	133
Tabela 4.14 – Parâmetros Marshall - Projeto de mistura 2	134
Tabela 4.15 – Teor de asfalto mistura produzida – MM1	142
Tabela 4.16 – Granulometria da mistura produzida – MM1	142

Tabela 4.17 – Propriedade finais da mistura produzida – MM1	143
Tabela 4.18 – Teor de asfalto mistura produzida – MM2.....	146
Tabela 4.19 – Granulometria da mistura produzida – MM2.....	146
Tabela 4.20 – Propriedade finais da mistura produzida – MM2	147
Tabela 4.21 – Medidas dos pesos e determinação da densidade aparente das vigotas.....	150
Tabela 4.22 – Medidas dos corpos-de-prova (vigotas) para o ensaio de fadiga.....	150
Tabela 4.23 – Resultados do módulo complexo e ângulo de fase	151
Tabela 4.24 – Resultados obtidos dos ensaios de fadiga	153
Tabela 5.1– Variação da temperatura da mistura asfáltica morna durante as etapas.....	172
Tabela 5.2– Variação da temperatura da mistura asfáltica morna.....	183
Tabela 6.1 – Controle de chuvas durante acelerados na Pista 1	187
Tabela 6.2– Valores de deflexão e raio de curvatura para diferentes N – Pista 1	193
Tabela 6.3 – Controle de chuvas durante acelerados na Pista 2 LE	198
Tabela 6.4 – Valores de deflexão e raio de curvatura para diferentes N – Pista 2 LE	205
Tabela 6.5 – Número N corrigido.....	210
Tabela 6.6 – Controle de chuvas durante acelerados na Pista 2 LD.....	212
Tabela 6.7 – Valores de deflexão e raio de curvatura para diferentes N – Pista 2 LD	220
Tabela 6.8 – Espessura de CPs extraídos da Pista 2 LD	226

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

°C – Graus Celsius

€ - Euros

μm - Micrometros

% - Percentual

ϵ_t – Deformação específica recuperável

σ_t – Tensão de tração

4BP - Ensaio de fadiga de 4 pontos para misturas asfálticas

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - American Society for Testing and Materials

ATR - Afundamento por trilho de rodas

CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CA - Concreto Asfáltico

CaO - Óxido de cálcio

CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo

CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia / RS

CME – Centro de Microscopia Eletrônica da Ufrgs

CO₂ – Dióxido de Carbono

COESUL – Construtora Extremo-Sul Ltda

D₀ - Deflexão recuperável no eixo vertical de carga, em centésimos de milímetro (mm.10⁻²)

D_{20°C} - Deflexão corrigida para a temperatura de 20°C

DAER – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

D_t – Deflexão recuperável medida na temperatura "t" em centésimos de milímetro (mm.10⁻²)

D₂₅ – Deflexão recuperável a 25 centímetros do eixo vertical de carga, em centésimos de milímetro (mm.10⁻²)

e – Espessura da camada asfáltica em centímetros

EAPA – European Asphalt Association

EME – Mistura de Módulo Elevado

EA – Equivalente de Areia
ES – Especificação de Serviço
EUA - Estados Unidos da América
FHWA - Federal Highway Administration
FWD – Falling Weight Deflectometer
HRB – Highway Research Board)
Hz - Hertz
lb/pol² – libras por polegada ao quadrado
kN – Kilonewton
LAPAV – Laboratório de Pavimentos da Ufgrs
LCPC- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LD – Lado direito
LE – Lado esquerdo
LEA - Low Energy Asphalt
LERC - Laboratório de Ensaios em Revestimentos Cerâmicos
MCT (Miniatura, Compactado, Tropical)
ME - Método de Ensaio
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
MgO - Óxido de magnésio
MM1 – Mistura Morna (Projeto 1)
MM2 – Mistura Morna (Projeto 2)
MR - Módulo de Resiliência
NBR – Norma Brasileira
P2D – Pista 2 lado direito
P2E – Pista 2 lado esquerdo
PMF - Pré-misturado a Frio
PMPA - Prefeitura Municipal de Porto Alegre
PSI - Pound Force per Square Inch ou libra força por polegada quadrada
R - Raio de Curvatura em metros
RAP - Reclaimed asphalt pavement
REFAP – Refinaria Alberto Pasqualini
RRt - Resistência Retida à Tração
RS – Rio Grande do Sul
RT - Resistência à Tração

R_{tC} - Resistência à Tração Condicionada

R_{tNC} - Resistência à Tração Não Condicionada

SBU's - Unidades fundamentais de construção secundarias

SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

SMOV - Secretaria Municipal de Obras e Viação

t - Temperatura em °C medida no interior da camada de pavimento asfáltica

TRB - Transportation Research Board

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

USC - Unified Soil Classification

USIRF - L'Union des Syndicats de l'industrie Routière Française

WMA - Warm Mix Asphalt

1 INTRODUÇÃO

As rodovias e vias urbanas têm vital importância no desenvolvimento de uma nação, responsáveis por ser o meio por onde os veículos se deslocam, possibilitam o transporte diário de passageiros e cargas, para qualquer que seja o seu fim e a todo e qualquer momento.

No Brasil, o principal modo de transporte é o rodoviário, de acordo com o Ministério dos Transportes (2014), este modal é responsável, atualmente, por 58% do movimento de cargas no país.

Devido a esta importância, torna-se uma consequência dizer que esta modalidade é diretamente afetada cada vez que ocorrem danos nos pavimentos que impeçam ou dificultem o trânsito sobre as vias existentes, bem como existe a necessidade da ampliação e manutenção da malha rodoviária, sempre com atenção especial para a qualidade dos pavimentos.

Diversos são os tipos de pavimentos empregados na construção destas estradas, ruas e avenidas, que incluem em sua camada final revestimentos como asfalto, concreto, paralelepípedos, blocos de concreto, pedras irregulares, etc.

Dentro dos tipos de revestimentos empregados o asfalto é o que apresenta maior utilização, principalmente em estradas rurais, onde predomina, mas também em vias urbanas, onde existe maior variação de revestimentos.

Algumas de suas vantagens são conforto ao rolamento, rapidez entre a sua execução e a sua liberação para o tráfego sobre o pavimento recentemente construído, praticamente imediato, o que em termos de trânsito e transporte tem um significado muito importante, tanto em estradas como em centros urbanos.

Assim, o interesse pelo estudo do revestimento asfáltico apresenta relevante importância, e vem sendo estudado em universidades, órgãos rodoviários, empresas públicas e privadas e profissionais da engenharia atuantes no segmento rodoviário.

Por ser um derivado do petróleo, o cimento asfáltico de petróleo (CAP) mostra sua nobreza como ligante no revestimento de pavimentos e vários são os estudos e aplicações com este produto, como concretos asfálticos (CA), pré-misturados a frio (PMF), emulsões asfálticas, tratamentos superficiais simples e duplos, diretos e invertidos, micro-revestimentos, etc.

Nos diferentes tipos de revestimentos betuminosos, o CA desponta como sendo o de maior utilização em rodovias e vias urbanas, o qual apresenta maior resistência e durabilidade frente aos outros tipos de revestimentos asfálticos e também o que possui um maior número de equipamentos desenvolvidos para a sua produção e aplicação.

Todavia o CA é um revestimento de pavimento que apresenta degradação com o tempo e problemas em consequência disto, o que leva a que sejam realizados estudos em suas variações de fabricação e execução na busca de melhores resultados em diversos fatores que podem ser analisados.

Fatores como estudos de agregados, incluindo os tipos, formas, configurações granulométricas, ligantes asfálticos nos seus diversos tipos bem como com a utilização de polímeros e outros tipos de aditivos que busquem melhorar as características do produto final.

O CA tradicional é produzido em usina, onde o ligante (CAP) é aquecido em torno de 150°C e os agregados em torno de até 170°C no momento em que se processa a mistura. Após a sua produção o mesmo é transportado por caminhões cobertos por lonas com objetivo de uma redução da perda de calor até os locais de aplicação quando é espalhado e compactado a uma temperatura inicial em torno de 140°C. Também existe uma recomendação técnica que somente se execute revestimentos asfálticos quando a temperatura ambiente for igual ou superior a 10°C.

Neste amplo e diversificado universo de possibilidades de estudos deste tipo de revestimento surge também à possibilidade de produzi-lo e executá-lo em temperaturas menores que as usuais do CA convencional, podendo haver benefícios técnicos, econômicos e ambientais.

Assim surgiu na Europa, mais especificamente na Alemanha, no final dos anos 90 um programa para se desenvolver a fabricação de massas asfálticas em menores temperaturas que as utilizadas, também conhecido por *Low Temperature Asphalt* (asfalto de baixa temperatura), que poderia, entre outras coisas, reduzir a emissão de gases, reduzir o envelhecimento por oxidação do asfalto devido a sua temperatura de produção e uma consequente redução do

aparecimento de trincas pelo endurecimento do ligante resultando também em uma melhoria em sua trabalhabilidade, aliando-se a isto vantagens ambientais e redução em custos energéticos.

Atualmente este procedimento está em plena expansão mundial, conhecido por Warm Mix Asphalt (WMA) ou asfalto morno.

Corrigan (2013) expõe que nos anos de 2004/2005 a tecnologia de misturas mornas era praticamente inexistente quando atualmente, em 2012 foram produzidas em torno de 85 milhões de toneladas anualmente, aproximadamente de 26% da produção total de mistura asfáltica nos Estados Unidos (EUA), e continua em crescimento.

No mesmo período, Corrigan (2013) informa que em torno de 14 tipos diferentes de tecnologias já foram avaliadas pela Federal Highway Administration (FHWA), contra nenhuma nos anos de 2004/2005.

Prowell, Hurley e Frank (2012), na terceira edição do livro “Warm Mix Asphalt – Best Practices” relatam a existência de vinte e duas tecnologias de misturas mornas contra 8 existentes na primeira edição de 2007.

Entre as principais tecnologias de produção de misturas mornas existentes atualmente podem ser destacadas as que seguem:

- Misturas mornas por processos de espuma, onde se destacam as tecnologias Accu-shear, Advera, Aquablack, Aspha-min, Astec – Double Barrel Green, Ecofoam II, Low Energy Asphalt (LEA), Meeker – Acqua Foam, Terex WMA System e Ultrafoam GX2 System.
- Processos por melhoradores de adesividade e aditivos surfactantes, representados por Cecabase, Evotherm, Rediset e Revix.
- Processos por ceras e aditivos orgânicos como Sasobit e SonneWarmix.

Segundo Sousa Filho (2006), a diminuição da temperatura de usinagem e compactação da mistura asfáltica, através da adição de zeólitas hidratadas na mistura pré-aquecida durante o ciclo de produção, ocorre pela expansão do volume do ligante, e conseqüente redução da viscosidade.

O processo tem base na estrutura cristalina das zeólitas, que permitem a liberação de água com aquecimento, criando um efeito de espuma no ligante, devendo ser incluída no primeiro grupo de tecnologias por processos de espuma.

Este trabalho estudou os processos de fabricação e aplicação deste tipo de revestimento asfáltico em condições existentes no Estado do Rio Grande do Sul, utilizando os agregados e ligantes disponíveis na região com a adição de zeólitas naturais, fornecidas para testes pela empresa Celta Brasil.

Neste caso, as zeólitas foram o agente que possibilitou a obtenção dos resultados pretendidos para a usinagem e aplicação do revestimento asfáltico em menores temperaturas, variando entre 110°C e 130°C na sua fabricação e entre 85°C e 105°C em sua execução. A palavra zeólita (zéo e lithos) tem origem grega e significa pedra que ferve.

1.1 JUSTIFICATIVA

Cresce em importância a utilização de misturas mornas uma vez que várias são as vantagens que este tipo de tecnologia pode trazer, tais como:

A possibilidade de haver uma redução de custos com energia, uma vez que os agregados, que correspondem a 95% em peso da mistura asfáltica, necessitariam ser aquecidos a uma temperatura em torno de 40°C menores que as usuais, trazendo economia ao processo de fabricação.

Com a temperatura de usinagem em temperatura mais baixa existe uma vantagem técnica quanto ao envelhecimento do ligante por oxidação, gerando uma diminuição no seu endurecimento e preservando um pouco mais as suas características elásticas.

A temperatura de produção mais baixa trás como consequência uma redução da emissão de gases poluentes responsáveis, entre outras coisas, pelo efeito estufa. Assim, as vantagens ambientais da redução destas emissões poderiam inclusive permitir a instalação de usinas produtoras de asfalto morno em locais onde talvez não fosse permitida a instalação de usinas produtoras de CA.

A possibilidade da execução deste revestimento morno em temperatura ambiente abaixo da mínima adotada para o CA convencional, que é de 10°C, assim em regiões mais frias, como é uma característica do Estado do Rio Grande do Sul, principalmente no inverno, onde frequentemente ocorrem temperaturas inferiores a 10°C, seria possível executar-se asfalto morno sem restrições, pelo menos em temperaturas acima de 0°C.

Vantagens aos trabalhadores, sobretudo operadores de vibro-acabadoras de asfalto e rastilheiros, uma vez que trabalhariam com mistura asfáltica com temperatura em torno de 30°C a 40°C abaixo da convencional. Esta vantagem é mais relevante quanto mais quente for a temperatura ambiente, porém se torna importante em qualquer condição, uma vez que também se espera menor emissão de fumos na execução do revestimento, melhorando as condições aos trabalhadores em sua exposição tanto a temperatura quanto aos vapores gerados.

Outro ganho relevante é de ser possível uma maior distância de transporte levando a um maior tempo para a execução do pavimento, podendo gerar redução de custos significativos em implantação de usinas móveis em lugares mais longes e que não podem ser atendidos por misturas convencionais devido à perda de temperatura em função do tempo de transporte, que é menor para este caso.

Estes fatores, aliados a uma tendência mundial da utilização de asfalto morno, ilustram a importância deste estudo, buscando novas soluções, porém que não comprometam o desempenho do pavimento. Informações vindas do exterior apontam para que em um período curto de até dez anos, somente venha a ser utilizado asfalto morno, ressaltando mais uma vez a importância de nos mantermos atualizados nos procedimentos de maior tecnologia utilizados mundialmente.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal desta tese foi verificar a viabilidade da produção de mistura asfáltica morna com utilização de zeólitas naturais para utilizá-la como revestimento em pavimentação de estradas e vias urbanas.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Especificamente pretendeu-se estudar:

- Projetos de misturas mornas com adição de zeólitas naturais.
- Temperaturas de usinagem de misturas mornas.
- Temperaturas de execução de misturas mornas.
- A produção de misturas mornas em usina de asfalto.
- A execução de misturas mornas em pista experimental.
- Características laboratoriais das misturas mornas
- O desempenho das misturas mornas com adição de zeólitas naturais em pistas experimentais.

O trabalho foi desenvolvido na cidade de Porto Alegre e limitado à execução de duas pistas experimentais e dois traços de misturas mornas, fabricadas em usina de asfalto e executadas e monitoradas no pátio do Laboratório de Pavimentos (LAPAV), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), junto ao simulador de tráfego.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A tese foi organizada em sete capítulos. O Capítulo I tratada INTRODUÇÃO ao assunto sobre misturas mornas, suas vantagens e desvantagens, uma comparação com a técnica convencional de pavimentação asfáltica e os objetivos, justificativas e organização da tese.

O Capítulo II, chamado de REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, aborda o referencial teórico sobre as zeólitas e misturas asfálticas mornas, englobando as diferentes técnicas para produção de misturas asfálticas em temperaturas intermediárias.

No Capítulo III, MATERIAIS E MÉTODOS, estão descritos e caracterizados os materiais utilizados os procedimentos adotados para que fossem alcançados os objetivos da pesquisa.

Dentro do Capítulo IV, denominado de APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ESTUDOS DE LABORATÓRIO DAS MISTURAS MORNAS COM ADIÇÃO DE ZEÓLITAS NATURAIS, mostra-se os estudos e ensaios de laboratório realizados e os resultados obtidos com as misturas mornas estudadas para utilização nas pistas experimentais.

Ao longo do Capítulo V, intitulado APRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO EM USINA DE ASFALTO E CONSTRUÇÃO DAS PISTAS EXPERIMENTAIS DA MISTURA MORNA COM ADIÇÃO DE ZEÓLITAS NATURAIS, são apresentados os procedimentos para a fabricação em usina de asfalto e construção das pistas experimentais com seus controles de temperaturas.

No Capítulo VI, MONITORAMENTO DAS PISTAS EXPERIMENTAIS EXECUTADAS COM MISTURA MORNA ATRAVÉS DA ADIÇÃO DE ZEÓLITAS NATURAIS, apresenta-se os resultados do monitoramento dos testes acelerados junto ao simulador de tráfego do LAPAV/UFRGS através do histórico dos carregamentos, parâmetros ambientais e de comportamento e resposta estrutural.

Ao final, no Capítulo VII, CONCLUSÕES E SUGESTÕES são feitas as análises, conclusões, comentários e considerações finais sobre a pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS

Surgiu na Europa, mais especificamente na Alemanha, no final dos anos 90, para atender as recomendações do protocolo de Kyoto, um programa para desenvolver misturas asfálticas em temperaturas menores que as utilizadas, também conhecido por *Low Temperature Asphalt* (asfalto de baixa temperatura).

A crescente conscientização mundial voltada ao meio ambiente na área de pavimentação rodoviária, principalmente no que diz respeito aos processos de usinagem das misturas asfálticas, faz crescer o interesse por medidas que visam a reduzir a emissão de gases poluentes na atmosfera proveniente da queima de combustão fóssil, aumentar a economia de energia e reduzir o processo de envelhecimento por oxidação do asfalto devido a sua temperatura de produção, que por consequência, preveniria o aparecimento precoce de trincas nos pavimentos.

Este tema vem sendo pesquisado durante a última década estando atualmente em fase de expansão mundial, conhecida por Warm Mix Asphalt (WMA) ou mistura asfáltica morna.

Existem diferentes técnicas que visam à redução em até 55°C nas temperaturas de fabricação e aplicação de misturas asfálticas a quente. Estes novos processos e produtos empregam variados meios mecânicos e químicos para reduzir a resistência ao cisalhamento da mistura nas temperaturas de construção mantendo ou melhorando o desempenho do pavimento.

As misturas asfálticas mornas diferem de outras misturas asfálticas pelas temperaturas nas quais são produzidas e pela resistência e durabilidade do produto final. As misturas asfálticas a frio são executadas em temperatura ambiente, variando entre 20 e 50°C, enquanto que misturas quentes são produzidas em temperaturas variando entre 145 e 170°C.

Misturas mornas são produzidas em temperaturas entre 100 a 150°C, conforme podemos observar na Figura 2.1, publicada pela EAPA, European Asphalt Association (2014). As misturas asfálticas a quente possuem maiores estabilidade e durabilidade se comparadas às misturas a frio, o que explica a utilização deste material em camadas mais delgadas de pavimentos com baixo volume de tráfego.

O principal objetivo das misturas asfálticas mornas é alcançar resistência e durabilidade equivalentes ou superiores às das misturas asfálticas a quente (NEWCOMB, 2007).

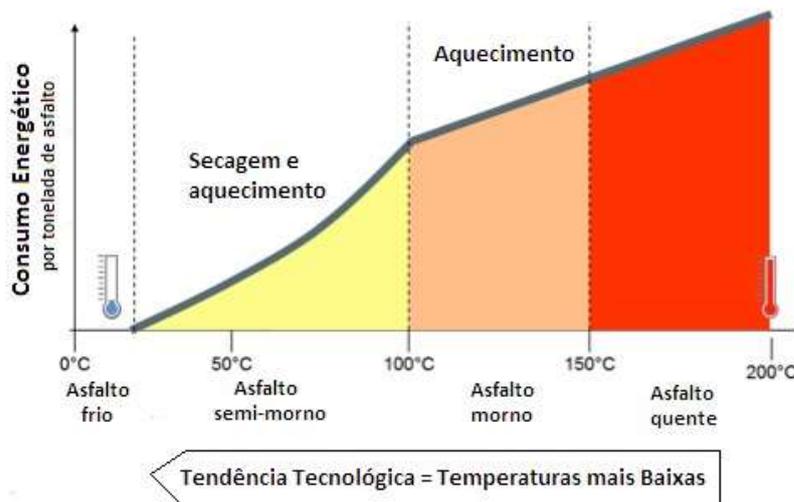


Figura 2.1 – Temperaturas e consumo energético para tipos de misturas asfálticas.
Fonte: Retirado e adaptado de <http://www.eapa.org/promo.php?c=202>

Conforme relata Otto (2009), o princípio tecnológico das misturas asfálticas mornas é baseado na redução da viscosidade dos ligantes betuminosos dentro de determinados limites de temperatura, permitindo desta forma o total encobrimento do agregado em temperaturas abaixo daquelas que tradicionalmente seriam necessárias para a produção de CA e este fator também contribui, de alguma forma, para o processo de compactação.

Entre os principais benefícios que podem ser observados com a utilização e que impulsionaram o crescimento das misturas asfálticas mornas conforme D'Angelo et al (2008) são os que seguem:

- Melhor compactação no campo de modo que pode permitir a possibilidade de trabalhos em distâncias mais longas e, estendendo este poder de transporte a maiores distâncias, pode tornar o WMA mais econômico.

- Aspectos ambientais e de desenvolvimento sustentável, especialmente com a redução do consumo de energia que resulta na redução das emissões de CO₂, a redução dos recursos naturais (combustível) e da produção de CO₂ é um fator fundamental do desenvolvimento sustentável sendo que na Europa esta redução é obrigatória com a adesão e ratificação da União Européia ao Protocolo de Kyoto.
- Bem estar dos trabalhadores, sobretudo em comparação ao CBUQ e outras misturas que são produzidas em temperaturas superiores, os empreiteiros tem notado que a temperaturas reduzidas melhoram o conforto dos trabalhadores e a sua produtividade.

Quanto a sua execução também são observadas as seguintes vantagens:

- Capacidade de ser executado em temperaturas mais frias e ainda obter densidade.
- Capacidade de ser transportado a maiores distâncias e ainda ter trabalhabilidade e potencial de compactação.
- Capacidade da mistura ser compactada com menos esforço em condições normais, sem muito frio e não a distâncias muito longas.
- Capacidade de incorporar maiores porcentagens de RAP.

A Tabela 2.1 apresentada por D'Angelo et al (2008) mostra a redução, em percentual, da emissão de gases em usinas que utilizam o processo de produção de misturas mornas em alguns países da Europa.

Tabela 2.1 - Redução percentual da emissão de gases em usinas de WMA
Fonte: D'Angelo et al (2008)

Emissão	Noruega	Itália	Holanda	France
CO ₂	31.5	30-40	15-30	23
SO ₂	NA	35	NA	18
VOC	NA	50	NA	19
CO	28.5	10-30	NA	NA
NO _x	61.5	60-70	NA	18*
Dust	54.0	25-55	NA	NA

O aquecimento durante o processo de usinagem das misturas asfálticas tem como finalidades a redução secagem dos agregados pétreos, a redução da viscosidade do asfalto e a manutenção da temperatura da mistura (MOTTA, 2011).

A seguir serão descritos os principais tipos de processos desenvolvidos para misturas asfálticas mornas, cabe salientar que as tecnologias a serem apresentadas transcrevem informações dos seus fabricantes, aplicadores e utilizadores, não se constituindo de aprovação quanto a sua composição, aplicação e desempenho uma que legitimidade destas tecnologias podem não ter sido determinadas.

2.1.1 Processos por espuma

As tecnologias com espuma utilizam pequenas quantidades de água fria injetados no ligante quente ou diretamente na câmara de mistura de asfalto. A água evapora rapidamente e é incorporada ao ligante, produzindo um grande volume de espuma.

A ação da espuma no ligante aumenta temporariamente o volume do ligante e reduz a viscosidade, o que melhora o mistura e trabalhabilidade. Nestes processos deve ser adicionada água suficiente para provocar a formação de espuma, porém sem excesso para que não ocorram problemas de adesão.

Alguns dos produtores aconselham o uso de aditivos que melhoram a adesividade, para garantir que a susceptibilidade de uma mistura asfáltica a umidade seja minimizada.

Os aditivos líquidos melhoradores de adesividade são recomendados para processos de produção de misturas mornas, sendo adicionados ao ligante apenas antes da mistura com os agregados, tipicamente em 0,5% do peso de ligante (ZAUMANIS, 2010).

A seguir serão abordadas as tecnologias de produção de mistura morna por processos de espuma mais utilizadas nos tempos atuais

2.1.1.1 Accu-Shear[®]

O processo por espuma Accu-Shear[®] trata de um equipamento desenvolvido pela empresa norte americana STANSTEEL (2014), com sede em Louisville, estado de Kentucky, e conforme informações técnicas em sua página na web é composto de um conjunto para injetar água junto com o CAP e, desta forma, combinar estes materiais e promover a mistura morna.

O asfalto líquido e água naturalmente não se misturam, o Accu-Shear[®] opera com um processo que força os dois líquidos, água e CAP, a se misturarem com a aplicação de pressão semelhante a um processo de emulsão, por mistura mecânica, em vez de simplesmente injetar os produtos com fluxo de fluido laminar.

Misturando forçadamente a água com o asfalto líquido, a formação de espuma ocorre e a fusão dos líquidos é mantida durante um período mais longo.

Neste processo também é possível introduzir outros aditivos além da água.

O sistema é constituído pelos seguintes módulos principais, os quais são essenciais para o desempenho do sistema:

- Gabinete para armazenamento de água
- Sistema de controle
- Moinho para a mistura sob pressão do CAP e água com injeção sobre os agregados provenientes do tambor secador para a realização da mistura.

A Figura 2.2 mostra o equipamento para mistura pressurizada do processo Accu-Shear[®] e a Figura 2.3 e Figura 2.4 ilustram o equipamento montado em uma usina de asfalto.



Figura 2.2 – Equipamento para mistura pressurizada do sistema Accu-Shear[®]
Fonte: Retirada de <http://www.stansteel.com/accuinstall.asp>



Figura 2.3 – Sistema Accu-Shear[®] montado em usina de asfalto
 Fonte: Retirada de <http://www.stansteel.com/accuinstall.asp>



Figura 2.4 – Reservatório de água em evidência
 Fonte: Retirada de <http://www.stansteel.com/accuinstall.asp>

2.1.1.2 Advera[®] WMA

Advera[®] WMA é um aditivo mineral produzido pela empresa PQ CORPORATION (2014), com sede em Malvern, estado da Pennsylvania nos Estados Unidos, com objetivo da formação de espuma para a produção de mistura de asfalto morna.

Conforme o fabricante, o Advera[®] WMA é um mineral sintético, uma zeólita sintética, um produto químico inorgânico em forma de pó, que tem tamanho padrão e teor de umidade entre 18 e 20%, que é química e estruturalmente ligado à molécula do mineral (Figura 2.5).

O material está em equilíbrio a este teor de umidade, necessitando temperaturas acima de 100°C para libertar a água.

A liberação de água para fora dos poros sub-mícron provoca o aparecimento de micro-bolhas que espumam o asfalto líquido, reduzindo a sua viscosidade e melhorando a trabalhabilidade da mistura asfáltica.

A espuma é liberada ao longo do tempo, que dá trabalhabilidade de longa duração.



Figura 2.5 – Aparência, microscopia e rótulo da zeólita sintética Advera
Fonte: Smith (2007)

Segundo Walker (2009), o Advera[®] WMA foi testado em misturas densas e abertas e pode ser usado em qualquer usina de CA, devendo ser introduzido através de um alimentador ligado ao misturador, em uma dosagem de 0,25% em peso da mistura de asfalto, para qualquer tipo de mistura.

Conforme informações da empresa PQ Corporation (2014), fabricante do material, as dosagens mínima e máxima são de 0,1% e 0,3% em peso das mistura asfálticas, e as temperaturas de produção ficam entre 118°C e 125°C. Na Figura 2.7 e Figura 2.8, Neitzke e Wasil (2009) apresentam a maneira de se introduzir a zeólita Advera em uma produção de WMA junto ao misturador através de um dosador.



Figura 2.6 – Adaptação para introdução de Advera[®] WMA em usina de asfalto.
Fonte: Neitzke e Wasil (2009)



Figura 2.7 - Adaptação para introdução de Advera[®] WMA em usina de asfalto.
Fonte: Neitzke e Wasil (2009)

A seguir, na Figura 2.9, Oberding e Kesterson (2009) mostram adaptações feitas em usina para introdução da zeólita sintética Advera[®] WMA.



Figura 2.8 – Adaptação para introdução de Advera[®] WMA em usina de asfalto.
Fonte: Neitzke e Wasil (2009)



Figura 2.9 – Adaptação para introdução de Advera[®] WMA em usina de asfalto.
Fonte: Oberding e Kesterson (2009)

O Advera[®] WMA é transportado pneumaticamente através de uma porta colocada perto da linha de entrada do CAP, e dirigido para a corrente ligante, antes de entrar em contato com o agregado.

Ele pode ser armazenado a granel em caminhões, vagões ferroviários (Figura 2.11) ou em um silo (Figura 2.10). De qualquer maneira um equipamento alimentador permanente ou portátil deve ser usado. Se for armazenado num silo pode ser empregado ar comprimido seco.

Também existe a opção de armazenamento em big-bags (Figura 2.10), em sacos de 1.000 libras (aproximadamente 450 kg), esta opção é usada para projetos de pequeno e médio porte, utilizando equipamento de alimentação portátil.

Advera[®] WMA deve ser armazenado protegido da chuva e, se armazenado corretamente, tem validade por tempo indeterminado.



Figura 2.10 - Armazenagem em silo e em big-bags da zeólita sintética Advera[®] WMA
Fonte: Smith (2007)



Figura 2.11 - Armazenagem em vagões ferroviários da zeólita sintética Advera[®] WMA
Fonte: Smith (2007)

A seguir, na Figura 2.12, Neitzke e Wasil (2009) mostram a execução de um trecho de rodovia com Advera[®] WMA na entrada leste da Estrada do Parque Nacional de Yellowstone, nos EUA.



Figura 2.12 - Aplicação de WMA com zeólita sintética Advera[®] em Yellowstone Park (EUA)
Fonte: Neitzke e Wasil (2009)

2.1.1.3 AQUABlack[®]

O sistema de produção de mistura morna AQUABlack[®] WMA é realizado através de um equipamento desenvolvido pela empresa MAXAM EQUIPMENT INC (2014), com sede na cidade de Kansas City, estado de Missouri, nos EUA.

De acordo com informações da Maxam (2014), é um processo em que uma pequena quantidade de água é introduzida no asfalto quente sob pressão através de um bocal para formar espuma. O volume de água se transforma em vapor à pressão atmosférica e se expande em várias ordens de magnitude.

Quando a água, sob pressão, é misturada ao asfalto quente, se transforma em vapor gera com resultado uma expansão do ligante e a correspondente redução na viscosidade mistura.

O sistema Maxam AQUABlack[®] consiste de uma pequena câmara de mistura (Figura 2.13 e Figura 2.14) contendo um bocal de injeção de água com alta velocidade para gerar a espumação do asfalto quando as duas correntes de água e de CAP são combinadas.

A pressão de água típica é de 700 a 1000 lb/pol² e, quando o CAP é espumado, expande inicialmente de 12 a 14%, mas quase imediatamente cai para 65% a 80% do volume.

O abastecimento de água é conectado diretamente na caixa que realiza a medição e bombeamento. O abastecimento de água pode ser a partir de um tanque ou a partir de um abastecimento de água municipal. A pressão de água não deve exceder a 75PSI.

A taxa de dosagem da água é controlada através de uma percentagem da taxa de fluxo do CAP com um variador de velocidade da bomba de água, com a água adicionada a uma taxa entre 1,5% a 3,0% da taxa de fluxo do CAP.



Figura 2.13 – Detalhe do Foamer do AQUABlack[®]
Fonte: Clyne (2010)



Figura 2.14—Câmara de mistura e injeção sob pressão do sistema AQUABlack[®]

Fonte: Retirado de <http://www.co-asphalt.com/documents/Warm%20Mix/MaxamCaltransFinalReport.pdf>

Na Figura 2.15 é mostrado o painel touchscreen do sistema AQUABlack[®] com o detalhamento da entrada de água junto à câmara de mistura (Foamer).

A câmara de mistura é introduzida na linha de alimentação de CAP existente, imediatamente antes do CAP entrar no tambor misturador (Figura 2.15).

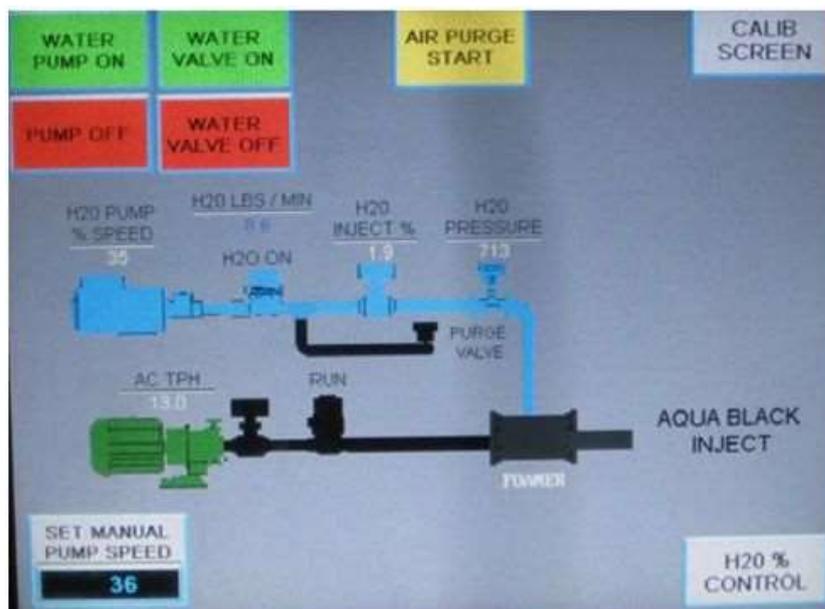


Figura 2.15 – Painel de controle touchscreen do AQUABlack[®]

Fonte: Retirado de <http://www.co-asphalt.com/documents/Warm%20Mix/MaxamCaltransFinalReport.pdf>

2.1.1.4 Aspha-min[®]

O Aspha-min[®] é uma zeólita sintética, um pó com granulometria fina (Figura 2.16), para a produção de mistura de asfáltica morna produzido pela empresa EUROVIA SERVICES GmbH (2014), em Bottrop, na Alemanha. É um processo de espuma que reduz a viscosidade do CAP e conseqüentemente possibilita a produção de mistura asfáltica em temperaturas menores dos que as usuais.

Conforme a Eurovia (2014), é um zeólito sintético fabricado (Silicato sódico de alumínio), o qual foi cristalizado termicamente. A percentagem de água contida internamente pelo zeólito é de 21%, em massa, que é liberada com o aumento da temperatura.

Na adição de Aspha-Min[®] à mistura ao mesmo tempo em que o ligante, uma pulverização de água muito fina é criada e esta liberação de água cria uma expansão de volume de ligante que resulta em uma espuma de asfalto que permite maior trabalhabilidade da mistura e revestimento dos agregados a temperaturas mais baixas.



Figura 2.16 – Aparência da zeólita sintética Aspha-min[®]
Fonte: Retirado de <http://www.aspha-min.com/asphamin-en.html>

Conforme Hurley e Prowell (2005), a empresa Eurovia sugere a utilização de 0,3% de zeólita Aspha-min na produção do WMA, o que pode resultar em uma redução da temperatura em aproximadamente 15°C na temperatura típica de produção do CA e com base em pesquisas realizadas, recomenda que o teor de asfalto e projeto de mistura seja realizado sem a adição da zeólita, e que mais pesquisas devem ser feitas para avaliar o desempenho destas misturas em campo.

Esta redução na temperatura pode levar a uma redução de 30 por cento no consumo de energia de combustível. A tecnologia da Eurovia também pode ser usada com ligantes modificados com polímero bem como com a adição de asfalto reciclado.

Através da utilização de Aspha-min[®] as temperaturas usuais das misturas asfálticas podem ser reduzidas em aproximadamente 30°C. Além disso, a diminuição da temperatura de produção pode reduzir o envelhecimento térmico do betume.

Da mesma forma que a Advera[®] WMA pode ser acondicionado em big-bags ou silo (Figura 2.17) e é injetado através de dosador (Figura 2.18) junto ao CAP na entrada do tambor misturador.



Figura 2.17 – Armazenamento de Aspha-min[®] em big-bags e silo
Fonte: Barthel, Marchand e Devivere (2004)



Figura 2.18 – Equipamento injetor de Aspha-min[®]
Fonte: Bistor (2007)

2.1.1.5 Astec Double Barrel Green[®]

O Double Barrel Green[®] é um sistema desenvolvido pela empresa ASTEC INC (2014), que possui sede em Chattanooga, Tennessee, nos EUA, para a produção de massa asfáltica morna pelo processo de espuma.

O sistema de mistura, conforme a Astec (2014) consiste em injetar uma pequena quantidade de água no CAP para criar bolhas microscópicas. Estas pequenas bolhas agem para reduzir a viscosidade do CAP permitindo a mistura a ser efetuada e trabalhada a temperaturas mais baixas.

A água é fornecida ao sistema através de uma bomba de êmbolo capaz de medir com precisão a quantidade de água para o sistema. Utilizando controles de alimentação, a velocidade da bomba é calibrada de modo a manter um fluxo adequado de água com base no fluxo de CAP.

A água é injetada no CAP através de uma série injetores (Figura 2.19 e Figura 2.20) de aço inoxidável que se encontram acima da câmara de formação de espuma. O CAP flui através da câmara de formação de espuma onde a água e o CAP são cuidadosamente misturados para produzir mecanicamente um CAP espumado.

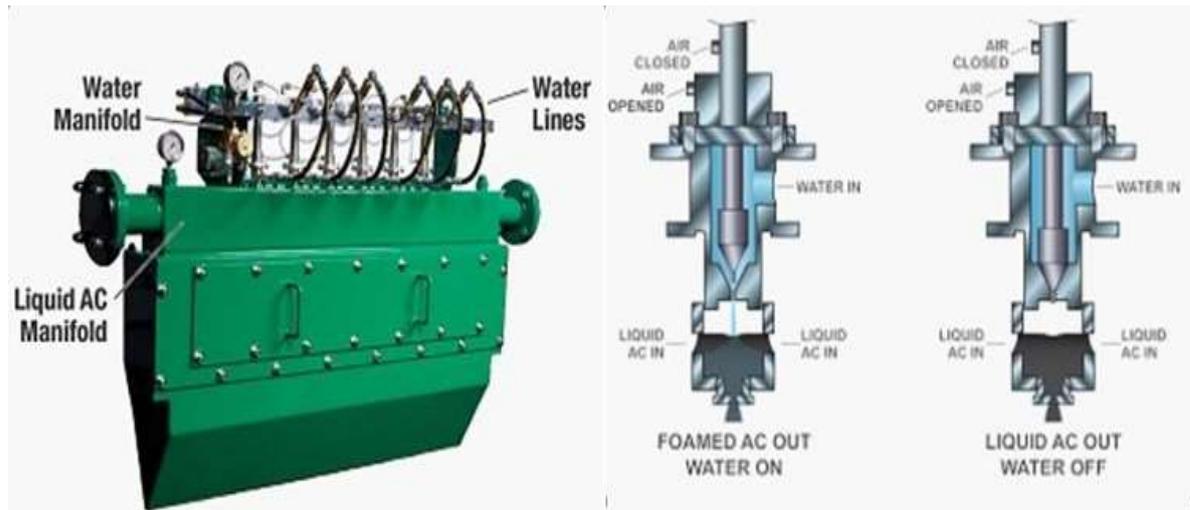


Figura 2.19 – Detalhamento do injetor de água do sistema Astec Double Barrel Green®

Fonte: Retirado de http://www.astecinc.com/images/file/literature/Astec_Warm_Mix_Asphalt_Systems.pdf



Figura 2.20 – Sistema Astec Double Barrel Green® implantado em usina

Fonte: Retirado de http://www.astecinc.com/images/file/literature/Astec_Warm_Mix_Asphalt_Systems.pdf

Um reservatório de água anticorrosivo (Figura 2.21) funciona com uma válvula para enchimento automático. Se abastecimento de água é perdido, ao baixar o nível, um alarme alerta os operadores de modo que o problema pode ser resolvido rapidamente, sem perder mistura.



Figura 2.21 – Reservatório de água do sistema Astec Double Barrel Green®

Fonte: Retirado de http://www.astecinc.com/images/file/literature/Astec_Warm_Mix_Asphalt_Systems.pdf

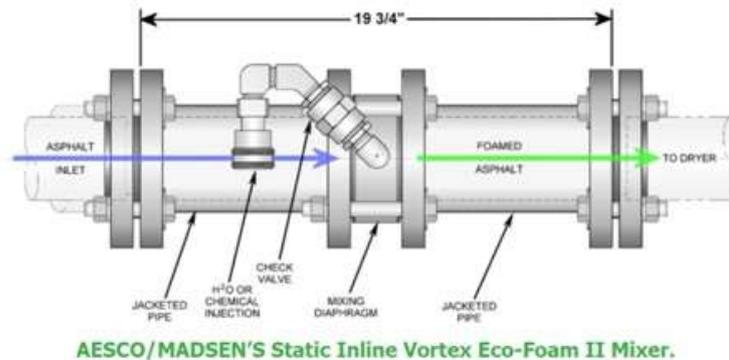
2.1.1.6 Ecofoam II

O Ecofoam II é um equipamento fabricado pela AESCO / MADSEN (2014), com sede em Auburn, estado norte americano de Washington, sendo um misturador estático (Figura 2.22), em que os fluidos água e CAP são injetados e rapidamente misturados por uma combinação da formação de vórtices com a ocorrência de cisalhamento por turbulência induzida, o que produz uma mistura espumada.

De acordo com a AESCO (2014) no AESCO/Madsen Vortex Inline Eco-Foam II Mixer, o CAP flui para o misturador estático e é forçado através do misturador a formar um fluxo de alta velocidade. A água é injetada em baixa velocidade (Figura 2.23) a jusante em fluxo invertido na região das guias do mixer.



Figura 2.22 – Misturador estático do sistema Ecofoam II
 Fonte: Retirado de <http://www.aescomadsen.com/documents/EcoFoamII.pdf>



AESCO/MADSEN'S Static Inline Vortex Eco-Foam II Mixer.

Figura 2.23 – Detalhamento do injetor de água no misturador Ecofoam II
 Fonte: Retirado de <http://www.aescomadsen.com/documents/EcoFoamII.pdf>

Isto acelera efetivamente a mistura do asfalto e água através do aumento da área de contato entre o asfalto com alta velocidade e a água com baixa velocidade.

Através de orifício da placa ocorre uma grande turbulência (Figura 2.24) que melhora o processo de mistura através do desprendimento de vórtices que acontecem quando um fluido passa pelo orifício formando oscilações. As oscilações, ou redemoinhos, a jusante criam zonas de baixa pressão, que também ajudam no processo de mistura.

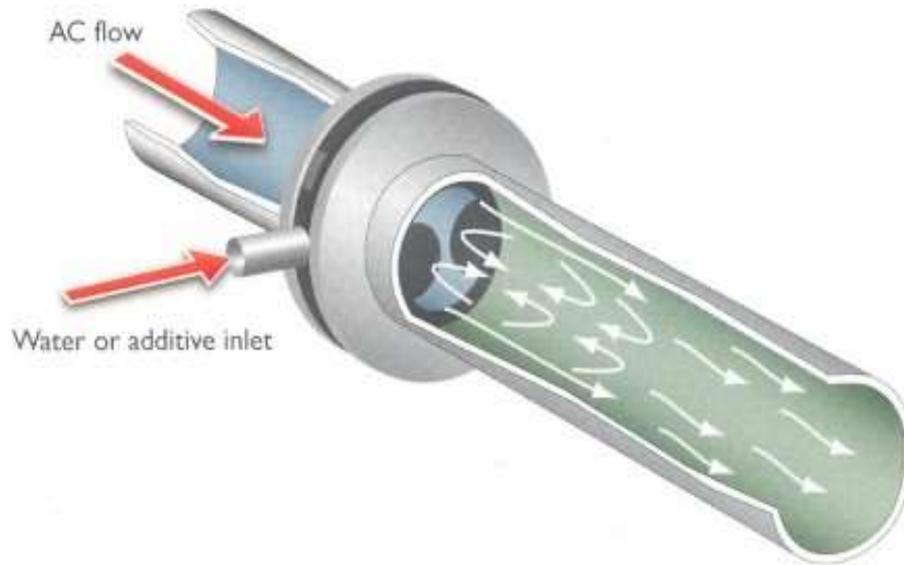


Figura 2.24 – Turbulência formada no interior do misturador Ecofoam II
 Fonte: Retirado de <http://www.aescomadsen.com/documents/EcoFoamII.pdf>

A água atua como o agente de formação de espuma, ao injetar a água diretamente para o centro do asfalto líquido isso faz com que a água se transforme imediatamente em vapor sob a forma de pequenas bolhas. Quando combinado com o asfalto quente, o resultado é uma mistura "espuma de asfalto".

Esta espuma de asfalto reduz temporariamente a viscosidade do CAP durante o processo de mistura. Isto permite que o agregado tenha um revestimento eficiente em temperaturas que são, em alguns casos, 10°C a 20°C inferiores ao CA convencional. Isto resulta em temperaturas de mistura em torno de 125°C a 135°C, mantendo boa trabalhabilidade durante o processo de espalhamento.

Além disso, este sistema (Figura 2.25) inclui um variador de pressão na água bombeada e medição do sistema através de controles computadorizados, proporcionando um funcionamento totalmente automático ou manual do processo de injeção em um ponto pré-determinado do conjunto.



Figura 2.25 – Equipamentos do sistema Ecofoam II
Fonte: Retirado de <http://www.aescomadsen.com/documents/EcoFoamII.pdf>

2.1.1.7 Low Energy Asphalt (LEA)

Asfalto de baixa emissão, ou Low Energy Asphalt (LEA), é uma tecnologia de asfalto morno desenvolvida pela empresa McCONNAUGHAY TECHNOLOGIES (2014), com sede na cidade de Cortland, estado de Nova Iorque, nos EUA, que utiliza mistura morna através de formação de espuma do asfalto em conjunto com um aditivo químico que melhora a trabalhabilidade misturas, de revestimento, e também as características de aderência.

Originalmente desenvolvida em França, explica a McConnaughay (2014), o processo LEA baseia-se na mistura sequencial do CAP (contendo o aditivo químico melhorador de adesividade) devendo ser adicionado quente aos agregados graúdos, seguido pela introdução dos agregados miúdos (pode ser areia) molhados na temperatura ambiente (Figura 2.26), que irão gerar a formação de espuma.



Figura 2.26 – Agregados miúdos molhados na temperatura ambiente no processo LEA
Fonte: Harder (2007)

Conforme a LEA-CO (2014), a fração de agregados miúdos molhados, que pode conter teor de 40% do total da mistura não é aquecida neste processo. Deve notar-se que a areia (ou agregados finos) transporta a maior parte da umidade de todos os agregados, conseqüentemente, exigindo a maior quantidade de energia para secar.

Como os agregados miúdos entram molhados e não precisam secar, o processo de baixa energia (LEA), conforme informações do idealizador, fornece a maior redução no consumo de energia entre todos os processos atualmente disponíveis.

Os aditivos químicos melhoradores de adesividade para este processo podem ser adicionados tanto no tanque de CAP, quanto diretamente no misturador, junto com a injeção do CAP, sendo isto facilmente conseguido através da utilização de uma bomba de regulação variável, ligada por mangueiras ao recipiente que contém o aditivo e o conduzam até o misturador, como se pode observar na Figura 2.27

O cuidado que deve ser tomado ao se injetar o aditivo durante o processo é de que ele seja introduzido com uma taxa adequada de modo que seja distribuído uniformemente por todo o CAP.

As taxas típicas de dosagem dos aditivos são de 0,2% a 0,6% em peso do ligante de asfalto. Doses mais elevadas, como 0,8% em peso de aglutinante, podem ser feitas para misturas que contenham mais de 25% de Reclaimed Asphalt Pavement (RAP).



Figura 2.27 – Sistema de injeção de aditivo no processo LEA
Fonte: Harder (2007)

A Figura 2.28 mostra a sequência do processo de LEA1, que compreende as seguintes fases:

- Fase 1 – Os agregados graúdos, e parte dos miúdos se necessário, são aquecidos a temperaturas entre 130° e 150°C e são misturados ao CAP aquecido a 170°C.
- Fase 2 – Os agregados ficam totalmente envolvidos pelo CAP criando um filme no seu entorno.
- Fase 3 – Os agregados miúdos molhados na temperatura ambiente são misturados aos agregados quentes da fase 2 gerando uma expansão do ligante.
- Fase 4 – A expansão do ligante junto com os agregados miúdos em temperatura ambiente formam um filme ao redor de todos agregados e reduzem a temperatura da mistura à aproximadamente 100°C.
- Fase 5 – O equilíbrio térmico da mistura produz uma mistura final com temperaturas entre 95°C e 98°C e com um percentual residual de 0,5% de água que permite boa trabalhabilidade.

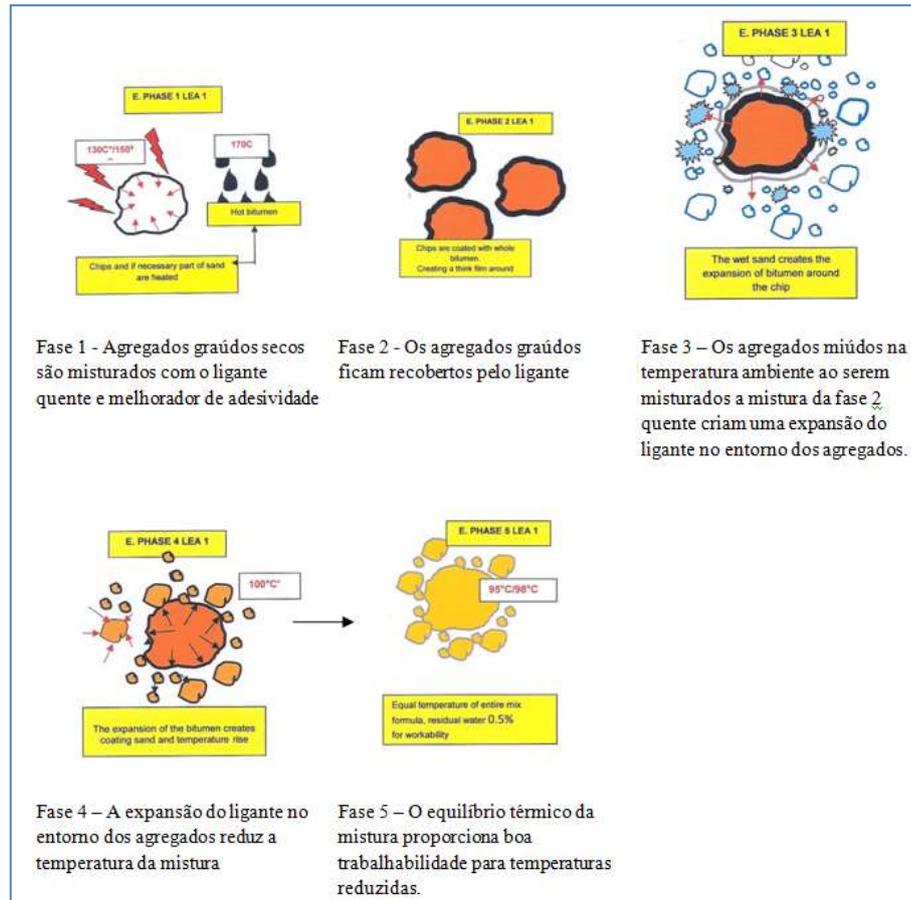


Figura 2.28–Sequência de processo LEA

Fonte: Retirado e adaptado de <http://www.lea-co.com/en/description-process-sequencing-lea%C2%AE1>

2.1.1.8 Meeker – Acqua Foam

O sistema Acqua Foam para a obtenção de mistura morna é desenvolvido pela empresa MEEKER EQUIPMENT INC (2014), com sede na cidade de Hatfield, estado norte americano da Pennsylvania, e que também utiliza o processo de espuma de asfalto.

De maneira geral o aditivo (água) é calibrado e adicionado ao processo de fabricação em uma taxa entre 1,25% e 3% do teor de CAP determinado no projeto da mistura. O percentual de aditivo (água) é introduzido continuamente e a pressão é mostrada no medidor do sistema.

A água é bombeada através de um medidor (Figura 2.29) orientado por um computador que determina a quantidade de água a ser fornecida para o processo. A mistura morna é calibrada através do painel de controle onde se verifica a porcentagem adequada de água. O operador é notificado na tela de todos os desvios de água fornecida para o processo.



Figura 2.29 – Medidor de água do sistema Meeker – Acquafoam.
Fonte: Garret (2009)

Conforme a Meeker (2014), o sistema de mistura quente é projetado para trabalhar com pressões de água injetada em torno de 160 psi. O projeto do tubo injetor (Figura 2.31) considera as bolhas de vapor geradas no asfalto líquido através da agitação este, bem como a pressão da água. Isto garante uma distribuição adequada em todo o asfalto líquido com um perfeito efeito de espuma.

As temperaturas de produção da mistura morna variam entre 121°C e 135°C e a temperatura de compactação deverá ocorrer a partir dos 135°C devendo ser concluída até a temperatura de 71°C, podendo ser liberada ao tráfego somente após atingir a temperatura de 60°C.

Não há nenhum efeito negativo ao se usar RAP em misturas asfálticas mornas através do sistema MEEKER de WMA, permitindo usar percentagens mais elevadas de RAP devido a viscosidade reduzida e a diminuição do envelhecimento da mistura devido a temperaturas mais baixas de produção.

O sistema é projetado para operar em usinas gravimétricas e volumétricas e consiste em três componentes principais que são o painel de controle, o medidor de água (Figura 2.29) e o misturador de água e CAP (Figura 2.30).

O sistema MEEKER WMA de espumação é instalado na linha de injeção do CAP em uma usina tipo drum mix e junto ao misturador em uma usina de batelada. O abastecimento de água está ligado diretamente a um tanque localizado sobre o medidor.

Como já dito a água deverá ser adicionada a um percentual entre 1,25% e 3,0% do CAP, porém existe uma recomendação de que seja utilizada a porcentagem de água de 1,3%. A água será fixada em uma percentagem constante com a vazão e variará automaticamente de acordo fluxo de CAP.

A temperatura da mistura deve ser mantida entre 121°C e 135°C° sendo que a utilização de asfalto reciclado ou borracha pode exigir temperaturas ligeiramente mais altas mistura sendo aceitável a espumação acima de 150°C.



Figura 2.30 – Misturador de água e CAP do sistema Meeker – Acquafoam.
Fonte: Garret (2009)



Figura 2.31 – Tubo injetor da mistura de água e CAP no misturador- Sistema Meeker – Acquafoam.
Fonte: Garret (2009)

2.1.1.9 Terex[®] WMA System (Grupo Fayat – Bomag Marini)

A Terex[®] é uma empresa com sede em Westport, estado de Connecticut, nos Estados Unidos, porém está presente no mundo inteiro inclusive com sede no Brasil na cidade de Barueri, em São Paulo. Ela desenvolveu um sistema de mistura asfáltica morna espuma para usinas de asfalto em 2008 com conceito simples de usar água para produzir espuma de asfalto.

Em março de 2013, o Grupo FAYAT anuncia a compra aquisição da Terex Roadbuilding Latin America e passa a dar prosseguimento nos projetos de usinas de asfalto, incluindo o processo de mistura morna, na América Latina este segmento passou a ser controlado pela empresa BOMAG MARINI, pertencente ao Grupo FAYAT.

Conforme Musil (2009), o sistema consiste de dois componentes principais, um tanque para armazenamento contínuo de 250 galões de água com um medidor e capacidade de bombeamento (Figura 2.32) e uma câmara para a mistura do CAP com a água e expansão do ligante.

A câmara de expansão é instalada na linha existente de entrada do CAP na usina e possui um ponto de mistura para o CAP líquido e a água.



Figura 2.32 – Tanque de água, medidor e bombeamento
Fonte: Musil (2009)

Após a mistura, o CAP espumado é imediatamente injetado no misturador para cobrir completamente o agregado, na Figura 2.33 pode-se ver um esquema do sistema TEREX[®] WMA e na Figura 2.34 um detalhe dos bicos injetores de asfalto espumado no misturador.

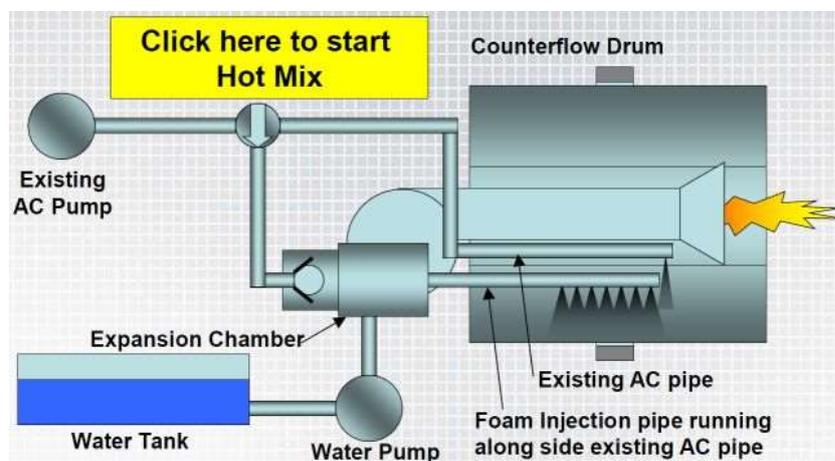


Figura 2.33 – Esquema do sistema TEREX[®] WMA
Fonte: Musil (2009)



Figura 2.34 – Detalhe da câmara de expansão e dos bicos injetores de asfalto espumado
Fonte: Musil (2009)

2.1.1.10 Ultrafoam GX2 system

Este processo de mistura morna foi desenvolvido pela empresa norte americana GENCOR INDUSTRIES INC (2014), com sede na cidade de Orlando, na Flórida, sendo mais um processo com utilização de espuma com o objetivo de reduzir a viscosidade do asfalto e as temperaturas de usinagem e compactação.

Considerada uma das técnicas mais econômica e ambientalmente correta, a introdução de água no processo que faz o CAP espumar em uma distribuição uniforme ao redor da superfície dos agregados obtendo um recobrindo máximo, abaixando a viscosidade do CAP e melhorando a trabalhabilidade da mistura a temperaturas mais baixas.

De acordo com a Gencor (2014), o sistema Ultrafoam GX2 é constituído pelo gerador especial espuma, que pode ser facilmente acoplado a linha de injeção existente de asfalto que vai para o tambor misturador (Figura 2.35).



Figura 2.35 – Gerador de espuma Gencor – Ultrafoam GX2.

Fonte: Retirado de <http://www.gencorgreenmachine.com/index.php?page=equipment>

O equipamento é revestido por óleo quente para a retenção de calor adequada da espuma quente. Um motor de velocidade variável e bomba de água são montados em uma peça unificada, que inclui um filtro de entrada, medida de volume, interruptor de pressão, válvula de alívio de pressão, medidor de fluxo de água e mangueiras.

Um método simples, robusto e seguro para injetar vapor no processo de espuma, usando somente a energia da bomba que injeta a CAP e água. O Ultrafoam GX2 pode alcançar consistentes taxas de produção variadas de asfalto espumado sem o uso de um misturador para dar poder ao dispositivo. Como resultado, o CAP e a água podem ser introduzidos a diferentes taxas de fluxo (Figura 2.36) e temperaturas mantendo os dois fluxos em contato íntimo de forma eficiente.



Figura 2.36 – Controlador da entrada de água e CAP Gencor – Ultrafoam GX2

Fonte: Garret (2009)

Para fazer o asfalto espumado, deve ser injetada uma porcentagem em torno de 1,25% a 2%, em peso do CAP, de água no centro do fluxo de CAP (Figura 2.37) e depois conduzida para dentro do tambor misturador (Figura 2.38) para proceder a mistura junto aos agregados.

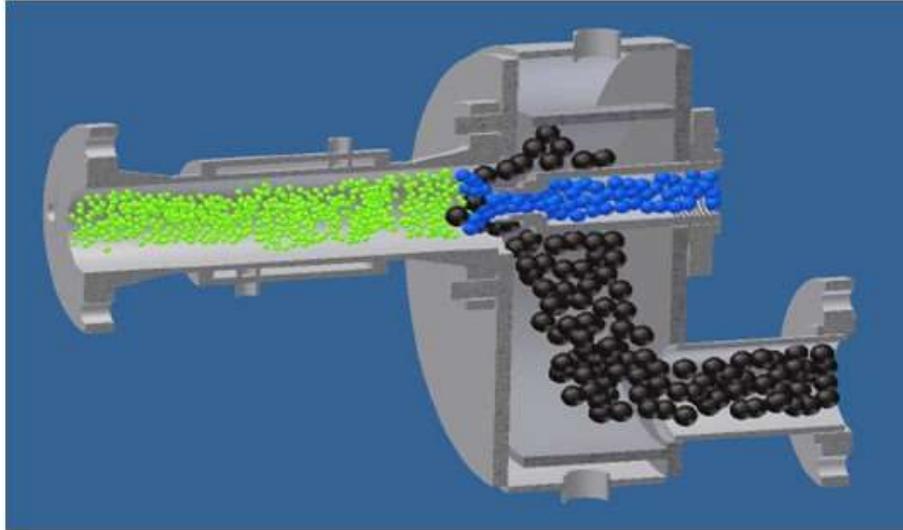


Figura 2.37 – Mistura de água e CAP no Gerador de espuma Gencor – Ultrafoam GX2
Fonte: Garret (2009)

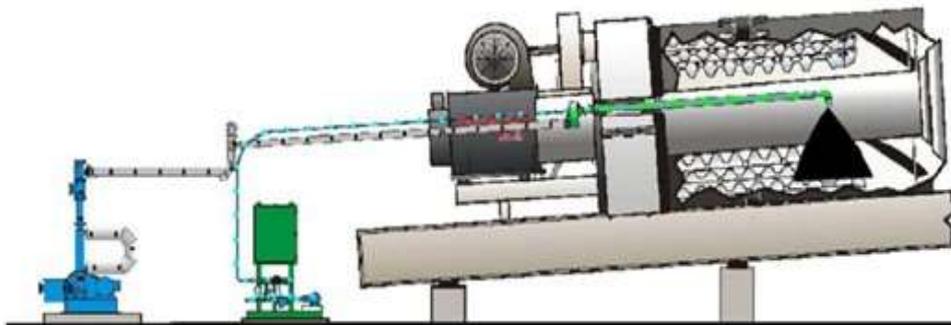


Figura 2.38 – Injeção de CAP espumado no tambor misturador da usina
Fonte: Garret (2009)

Devido a este projeto, o Ultrafoam GX2 mantém uma excelente relação CAP e água em quaisquer taxas de produção gerando bolhas menores e mais estáveis, criando um asfalto morno muito consistente pelo processo de espuma.

2.1.2 Processos por aditivos químicos melhoradores de adesividade e aditivos tensoativos

Os aditivos químicos são mais um tipo de tecnologia mistura morna que é usada comumente. Eles incluem uma combinação melhoradores de adesividade com agentes de emulsificação, agentes tensoativos, polímeros e aditivos para melhorar a mistura, a trabalhabilidade e a compactação.

A quantidade de aditivo e a redução da temperatura de depende do produto específico utilizado. O tipo de aditivo químico pode ser utilizado na forma de uma emulsão ou adicionado ao ligante e, em seguida, misturado com os agregados quentes. Isso resulta em alterações relativamente pequenas na usina de asfalto ou para o processo de produção da mistura morna.

A seguir serão mostrados os processos de produção de misturas mornas, através da adição de aditivos químicos, mais utilizadas nos tempos atuais.

2.1.2.1 Cecabase RT[®]

Cecabase RT[®], fabricado pela CECA (2014), uma subsidiária do Arkema Group, com sedes na Europa, Japão e Norte da África, é um tipo de aditivo químico tensoativo, livre de água e usado para produzir massa asfáltica quente.

Conforme informa a Ceca (2014), ao ser misturado no ligante antes do contato com os agregados, Cecabase RT[®] permite reduzir as temperaturas de produção e de compactação em até 40°C, mantendo as propriedades da mistura final, pelo menos, igual ao padrão HMA.

O Cecabase RT[®] pode ser adicionado ao ligante onde quer que seja mais conveniente, no tanque de armazenamento ou na linha de injeção de ligante antes do misturador. É facilmente solúvel no ligante e não necessita de pré-mistura.

A taxa de dosagem normal está compreendida entre 0,2% e 0,5% do peso de ligante.

Como a maioria dos produtos químicos utilizados na pavimentação, Cecabase RT[®] é um material perigoso e deve ser manuseado com cuidado e com todos os equipamentos

adequados de segurança (luvas, óculos de proteção, luvas longas ...) para evitar queimaduras químicas em caso de contato.

No entanto, quando usado com a dose recomendada, o produto não altera a classificação aglutinante em relação à saúde e regulamentação de segurança.

A Figura 2.39 mostra um tanque para armazenamento do produto químico junto ao local de produção da mistura morna.



Figura 2.39 – Tanque de armazenamento do Cecabase RT[®]

Fonte: Retirado de

http://www.warmmixasphalt.com/submissions/dec2009/Tuesa.m/03_CecabaseRTWMATWGdec09v2.pdf

2.1.2.2 Evotherm[®]

A MEADWESTVACO CORPORATION (2014), com sede em Richmond, estado de Virginia, Estados Unidos, fabricante do Evotherm[®], apresenta três diferentes tipos de aditivos químicos: Evotherm[®] - Emulsão Tecnológica (ET), Evotherm[®] - Tecnologia de Asfaltos Dispersos (DAT) e Evotherm[®] - Terceira Geração (3G/Revix).

A MeadWestvaco (2014), explica que o mecanismo pelo qual o aditivo Evotherm[®] ET facilita a produção de misturas WMA é através da introdução de uma emulsão à base de água para os agregados quentes durante o processo de mistura.

Ao entrar em contato com os agregados quentes, a emulsão à base de água transforma-se em vapor, o que faz com que o cimento asfáltico espume.

A produção da emulsão à base de água, de acordo com a MeadWestvaco, envolve o uso de um produto químico que contém os aditivos necessários para melhorar o revestimento de grãos e aumentar a trabalhabilidade da mistura WMA produzidas utilizando esta tecnologia.

Conforme a MeadWestvaco (2014), a Tecnologia Evotherm[®] DAT é semelhante ao Evotherm[®] ET, que utiliza uma emulsão à base de água para a produção de misturas WMA.

No entanto, em vez de introduzir a emulsão à base de água na mistura, é diretamente injetado na linha do ligante imediatamente antes da entrada na câmara de mistura.

Ainda de acordo com a MeadWestvaco (2014), em contraste com as tecnologias anteriores, o Evotherm[®] 3G/Revix utiliza aditivos químicos isentos de água que não reduz a viscosidade do ligante, em vez disso, o aditivo químico reduz a fricção interna da mistura, permitindo que o cimento asfáltico comporte-se como se fosse aquecido a uma temperatura mais elevada.

Semelhante a tecnologia Evotherm[®] DAT, o aditivo 3G pode ser diretamente injetado na linha do ligante antes de entrar na câmara de mistura ou também ser pré-misturado com o cimento asfáltico.

A dosagem ótima de qualquer um dos aditivos Evotherm[®] varia entre 0,4% a 0,7% em peso total do ligante asfáltico.

É esperado que a utilização desta dosagem possa facilitar a produção de misturas WMA cerca 28°C a 56°C menor do que as misturas de HMA produzidas usando o mesmo cimento asfáltico.

A Figura 2.40 mostra um tanque típico para armazenamento e fornecimentos do Evotherm[®] à mistura morna junto a usina de asfalto.



Figura 2.40 –Bomba e tanque e típico utilizado para fornecimento de Evotherm[®] à mistura
 Fonte: Retirado de http://mwv.com/en-us/asphalt-innovations/products/easset_upload_file502_15242_e.pdf

2.1.2.3 Rediset[®]

O Rediset[®] é um aditivo químico produzido pela empresa multinacional AKZO NOBEL (2014) com sedes nos Estados Unidos em 525 West Van Buren Street, Chicago, Illinois, na Europa, na Suécia, em Stenungsund e na Ásia, na China, em Shangai e tem como foco principal a redução das temperaturas de mistura e pavimentação e a melhoria da trabalhabilidade da mistura abordando a danos por umidade na mistura quente e a secagem ineficiente do agregado em baixa temperatura garantindo uma solução de custo eficaz.

Os danos de umidade prejudicam os mecanismos de coesão e adesão ocorrendo falha de adesão (Figura 2.41) em função de a água ter uma maior afinidade em relação ao asfalto, assim ele não consegue se agregar com uma superfície molhada e falha de coesão porque a inclusão de água no asfalto vai enfraquecer a resistência coesiva.



Figura 2.41–Falha de adesão na mistura asfáltica
 Fonte: Retirado de http://www.warmmixasphalt.com/submissions/57_20080101_Prem%20Naidoo%20-%20Akzo%20Nobel%20Rediset%20WMX.pdf

O aditivo é constituído de pastilhas sólidas (Figura 2.42) e deve ser adicionado ao tanque de CAP (Figura 2.43) também podendo ser adicionado à mistura a quente.



Figura 2.42–Rediset[®] na forma de pastilhas sólidas

Fonte: Retirado de http://www.warmmixasphalt.com/submissions/57_20080101_Prem%20Naidoo%20-%20Akzo%20Nobel%20Rediset%20WMX.pdf



Figura 2.43–Inserção de pastilhas de Rediset[®] no tanque de CAP

Fonte: Retirado de http://www.warmmixasphalt.com/submissions/57_20080101_Prem%20Naidoo%20-%20Akzo%20Nobel%20Rediset%20WMX.pdf

A Akzo Nobel (2014), explica que o aditivo tem como função melhorar a trabalhabilidade da mistura, reduzir a viscosidade do asfalto, reduzir a tensão superficial do asfalto sendo mais fácil para cobrir os agregados e mais fácil para compactar, sendo possível reduzir temperaturas de mistura e compactação e aumentar a resistência a danos por umidade.

O Rediset[®] fornece ao asfalto maior afinidade com o agregado em comparação com água e atua como uma ponte que liga asfalto e agregados, estas ligações são resistentes à ação da água com o aditivo aumentando a resistência coesiva do asfalto.

O mecanismo pelo qual este aditivo que facilita a produção de misturas WMA é altamente dependente dos tensoativos utilizados. Estes agentes tensoativos reduzem a tensão superficial do ligante de asfalto, permitindo um revestimento do agregado eficaz a temperaturas inferiores às tradicionais. Este processo também é acreditado para melhorar a trabalhabilidade e compactabilidade de misturas de asfalto a temperaturas mais baixas.

O produto também é fornecido na forma líquida, o que facilita o manuseio e medição na usina de asfalto e chamado de Rediset[®] LQ, que pode ser pré-misturado com o ligante ou injetado diretamente no CAP, pouco antes do ligante é introduzido na câmara de mistura.

A dosagem ótima de Rediset[®] em pastilhas ou Rediset[®] LQ varia entre 0,3% a 0,6%, em peso, de teor de CAP. Geralmente, as doses dentro deste intervalo não mudam o grau de desempenho do ligante asfáltico, e permitem que as misturas WMA possam ser produzidas em temperaturas 22°C a 33°C inferiores aos tradicionalmente utilizados para a produção de HMA.

2.1.3 Processos por ceras e aditivos orgânicos

Os processos que utilizam aditivos orgânicos apresentam uma diminuição na viscosidade acima do ponto de fusão do aditivo ou cera e, como resultado, reduz a viscosidade do ligante em que são combinados proporcionando a fabricação de misturas asfálticas mornas em temperaturas abaixo das usuais.

A seguir serão mostradas as tecnologias por ceras e aditivos orgânicos mais utilizados nos tempos atuais.

2.1.3.1 Sasobit®

Sasobit® é uma cera sintética produzida durante o processo de gaseificação do carvão. Ele funciona como um auxiliar de compactação e permite a produção e compactação da mistura de asfalto a temperaturas mais baixas do que as utilizadas para HMA.

Sasobit® é fornecido na forma de grãos (ou pastilhas) ou flocos e pode ser adicionado à mistura por injetor dentro do tambor misturador (Figura 2.44) ou de ser incorporada ao ligante dentro do tanque.

A SASOL WAX (2014), fabricante de Sasobit®, com sedes na Europa, América, África, Ásia e Oriente Médio não recomenda introduzi-lo diretamente na mistura asfáltica, pois isso pode resultar em uma distribuição heterogênea da cera dentro do misturador.



Figura 2.44 – Cêra Sasobit® introduzida no tambor misturador por injetor
Fonte: Adaptado de Shaw (2007)

No entanto, a necessidade de modificação da planta para a pré-mistura de Sasobit® com o ligante pode aumentar o custo global das misturas produzidas utilizando esta tecnologia.

A dosagem Sasobit[®] ótima, recomendada pela Sasol Wax (2014), varia entre 3 a 4 % de cera em peso do ligante, permitindo a produção de misturas de asfalto com uma redução da temperatura de redução de 10°C a 30°C.

Como explica Middleton e Forfylow (2008), Sasobit[®] é um aditivo orgânico tipo cera, fabricado através do processo de Fischer-Tropsch. As ceras originadas pelo processo de Fischer-Tropsch são hidrocarbonetos alifáticos de cadeia longa, produzidas a partir de gaseificação de carvão.

Estas ceras têm um ponto de fusão em torno de 98°C, com alta viscosidade a temperaturas mais baixas e baixa viscosidade em temperaturas altas.

As ceras se solidificam no asfalto entre 65°C e 115°C e, quando combinadas com o ligante, atuam como um "melhorador de fluxo", diminuindo a viscosidade do ligante na mistura e também as temperaturas de compactação. Quando Sasobit[®] atinge temperaturas abaixo de seu ponto de fusão uma estrutura cristalina é formada no ligante que conduz a uma estabilidade.

Como Sasobit[®] é entregue na forma de uma pastilha, o produto pode ser adicionado na usina de asfalto através de vários métodos diferentes.

O método preferencial requer um alimentador especialmente construído com um ventilador que se conecta diretamente ao misturador. O aditivo também pode ser adicionado ao sistema de RAP existente ou misturado diretamente nos tanques de CAP para ação em estado de fusão.

2.1.3.2 SonneWarmix[™]

SonneWarmix[™] é uma tecnologia de asfalto morno produzida pela SONNEBORG INC (2014), com sede em Mahwah, estado de New Jersey, nos Estados Unidos.

É um aditivo químico a base de cera composta por hidrocarbonetos parafínicos que pode ser distribuído em galões, caminhões tanque (Figura 2.45) ou vagões tanques.



Figura 2.45 – Caminhão tanque para transporte de SonneWarmix™.
Fonte: Retirado de <http://www.ecobit.com/>

Os caminhões e vagões tanque devem ser aquecidos a uma temperatura entre 95°C e 120°C para uma descarga adequada e também devem ser aquecidos nas mesmas temperaturas para o seu uso.

De acordo com a Sonneborg (2014), ele deve ser misturado com o CAP, podendo ser introduzido no tanque ou a jusante no fluxo do ligante, mas antes do misturador.

A taxa de adição irá variar 0,5-1,5% dependente do uso e da percentagem de RAP, RAS, borracha ou polímeros, porém a taxa de adição máxima para misturas sem RAP, RAS ou polímeros é de 0,75%.

A temperatura típica de produção e compactação do WMA utilizando SonneWarmix™ deve ser de 10°C a 15°C menor do que o recomendado para a HMA. O projeto de mistura também deve ser considerado a esta temperatura. A temperatura produção real pode ser ajustado para auxiliar o empreiteiro para alcançar a compactação de campo.

O mecanismo para SonneWarmix™ é de que ao ser misturar este aditivo com o ligante ele ajuda a reduzir a sua viscosidade a temperaturas acima do ponto de fusão da cera adicionada.

2.2 USO DE MISTURAS MORNAS NO MUNDO

O Warm Mix Asphalt foi introduzido nos Estados Unidos em 2004, proveniente da Europa. Desde então, os EUA se tornaram grandes defensores e líderes na adoção da tecnologia. Em 2012, cerca de um quarto de toda tonelagem massa asfáltica foi produzida como mistura morna.

O WMA engloba uma gama de tecnologias utilizadas para reduzir temperaturas de produção e execução das misturas de asfalto trazendo uma variedade de benefícios ao processo de construção, ao meio ambiente e à segurança do trabalhador.

Em 2013, a National Asphalt Pavement Association (NAPA, 2014) recebeu o prestigiado prêmio “NOVA Award” do Forum de Inovação da Cosntrução (CIF) nos EUA, devido ao seu trabalho para incrementar o uso de misturas mornas.

Na escolha da mistura morna para ganhar um Prêmio NOVA, os investigadores citaram sua capacidade de melhorar a compactação, reduzir o uso de combustível ou energia, melhorar o conforto do trabalhador, prolongar a temporada de pavimentação, e reduzir os custos gerais de pavimentação.

De acordo com a NAPA (2014) o percentual de companhias que trabalham com mistura morna vem crescendo anualmente como se observa na Figura 2.46 e, em 2012, mais de 25% da produção total de mistura asfáltica nos EUA foram de misturas mornas, que também vem apresentando um crescimento anual significativo conforme podemos observar na Figura 2.47.

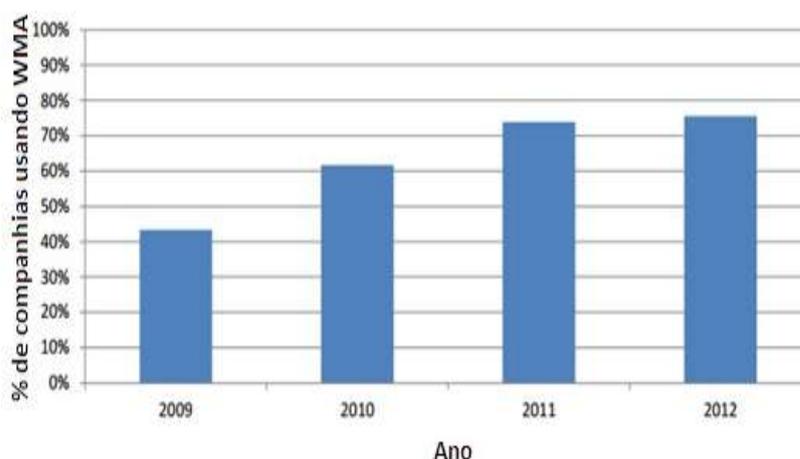


Figura 2.46 – Percentual de companhias utilizando WMA nos EUA
Fonte: NAPA (2014)

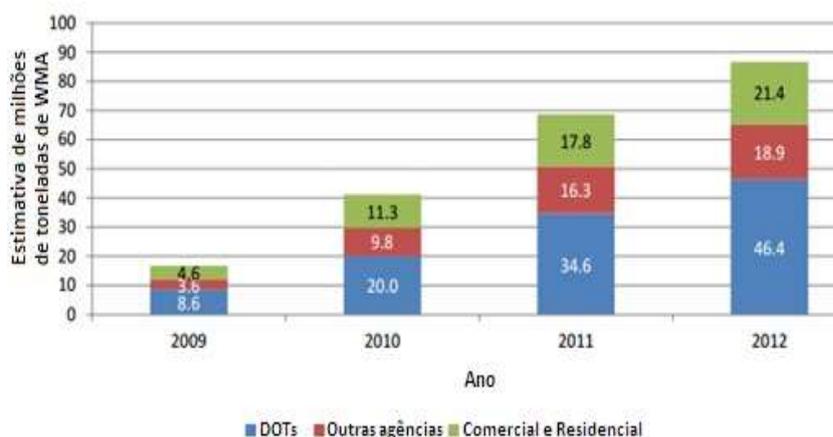


Figura 2.47 – Evolução do uso de WMA nos EUA
Fonte: NAPA (2014)

A European Asphalt Pavement Association (EAPA, 2014) relata a experiência de alguns países membros no uso das tecnologias durante 2013.

Na República Checa existem progressos recentes na tecnologia WMA, pesquisa da Universidade Técnica Tcheca em Praga (CTU) e Universidade Técnica de Brno (VUT) levaram à especificações nacionais preliminares para WMA (TP 238) publicados pelo Ministério dos Transportes checo em 2012.

Esta especificação também é válida para o mástico colocado em temperaturas mais baixas do que no passado. Alguns trabalhos foram realizados com este tipo de mástico (MA) pela empresa Eurovia. Algumas experiências com este MA também foram realizadas por outros empreiteiros checos, porém o WMA para camadas de asfalto compactado é usado com mais frequência.

Divisões tchecas de algumas empresas multinacionais como Skanska e Porr estão aptas a usar esta tecnologia, se for exigido.

A implantação do WMA na República Checa foi descrita em um artigo sobre a Conferência HAPA em WMA por Fiedler (2013).

Em 2013 todas as camadas de asfalto do pavimento em um importante túnel rodoviário em Praga foram pavimentadas com WMA. O uso de WMA no túnel era uma exigência da Administração. Durante a pavimentação da WMA, em outubro de 2013, as emissões deste túnel foram medidos pelo Transport Research Centre CDV (<http://www.cdv.cz/en/>). O

relatório final das medições de emissão em alguns locais de trabalho será publicado pela CDV em 2014.

Há também um projeto de pesquisa de três anos chamado "O uso mais eficaz de camadas do pavimento de asfalto recuperados para a produção de novas misturas asfálticas" (TA02030549) financiado pela Agência de Tecnologia da República Checa. O relatório final deste projeto será publicado em 2014. A primeira seção experimental foi realizada em uma estrada secundária em outono de 2013 pela empresa Fronek. Esta empresa tem um tambor paralelo em sua usina de asfalto que permite a adição de 50% da RAP. O uso de WMA (tecnologia de espuma) que lhes permitiu manter a temperatura de produção a cerca de 130 ° C. O projeto de mistura foi realizado em cooperação com a CTU.

Um projeto de pesquisa chamado CESTI começou em 2013. Uma parte dela vai se concentrar no desenvolvimento do WMA de baixa temperatura Mastic Asphalt, alguns empreiteiros principais e as universidades CTU (Praga) e, VUT (Brno) vão participar neste projeto.

Na Dinamarca, a empresa NCC produz WMA utilizando a tecnologia de espuma. Em setembro de 2012, eles realizaram um estudo em colaboração com a Direção das Estradas da Dinamarca na autoestrada 321 em Ulladulla, onde foi feita pavimentação com WMA exatamente sob as mesmas condições (no meio de um dia útil) como o asfalto tradicionalmente é executado.

O produto utilizado foi um polímero modificado (SMA 11) e a temperatura foi reduzida em aproximadamente 20°C. Os materiais e a taxa de compactação foram examinados e foram obtidos dados volumétricos e de adesão similares ao asfalto tradicional. A produção foi quase idêntica ao CA convencional e pode ser facilmente aplicado por vibro-acabadora. O endurecimento do WMA foi ligeiramente menor do que o asfalto tradicional produzido.

Com base nesses estudos o restante do trabalho foi feito como WMA e os dados foram muito satisfatórios.

Este trabalho da NCC abriu as portas do WMA para vários outros trabalhos, incluindo "GAB II" nas seções Tuse - Vig e Aaby - Middelfart. (GAB II é uma mistura de camada de base. Ela é uma mistura com um grau de 32 mm, um elevado teor de areia (~ 65%) em que é adicionada uma fração de agregados de aluvião 16/32).

Na França de hoje, o uso de WMA esta cada vez mais desenvolvido. A fim de aumentar o uso de WMA, a associação francesa “L'Union des Syndicats de l'industrie Routière Française” (USIRF) escreveu uma recomendação para promover o uso WMA:

"O USIRF recomenda o uso sistemático de WMA, exceto em casos especiais; Nesses casos, através de limitações técnicas específicas ou em caso de recusa motivada da autoridade rodoviária. O USIRF lembra que o incentivo à utilização de WMA é um dos objetivos do acordo voluntário dos atores do projeto, construção e manutenção de infraestrutura rodoviária, estrada e do espaço público urbano”. Assinou em 25 março de 2009 Jean Louis Marchand, presidente da USIRF.

Desde essa data, a utilização de WMA tem aumentado para atingir 7,5% da produção total do asfalto em 2012. Além disso, os documentos franceses estão em andamento para explicar e facilitar o uso WMA e uma conclusão é a seguinte:

"No estado atual do conhecimento, as primeiras avaliações ambientais e realizados acompanhamentos, podemos recomendar apenas fortemente o uso de misturas asfálticas mornas para atender às expectativas ambientais"

Todas as técnicas para diminuir a temperatura de mistura poderão ser utilizadas na França e os diferentes estudos realizados mostraram que as especificações técnicas (performances mecânicas do concreto asfáltico) são atingidas seja qual for o processo utilizado.

Por fim, cada vez mais frequentemente, WMA são produzidos e utilizados com asfalto reciclado, gerando uma melhor resposta ambiental.

Na Noruega, em 2010, a Associação de Produtores de asfalto (FAV) iniciou um novo projeto chamado Low Temperature Asphalt "LTA-2011" para estudar as consequências para a saúde dos trabalhadores e a qualidade do asfalto. A temperatura de produção foi reduzida em 30°.

As conclusões desse estudo foram:

Não há diferenças significativas na carga de trabalho para os trabalhadores nem diferença na qualidade para WMA contra HMA, porém existe redução de 50% dos fumos.

Em 2012, a Autoridade Norueguesa de Inspeção do Trabalho queria acelerar o uso de WMA e para conseguir isso, a administração da estrada na Noruega premiou os contratantes com um

bônus de €4/ton, quando produzido em pelo menos 25°C abaixo da produção convencional, assumindo os mesmos requisitos de qualidade, este procedimento se repetiu em 2013 e agora em 2014.

Até o final de 2013, três empreiteiros (em 16 plantas diferentes) produziram 210.000 toneladas de WMA.

Na Noruega, a indústria do asfalto tem a responsabilidade de melhorar o ambiente de trabalho e responder às recomendações IARC para baixar a temperatura de produção, promovendo a WMA em colaboração com a Administração Rodoviária Norueguesa.

Na Suécia, em 2013, foram produzidas cerca de 145 000 toneladas de WMA usando o método KGO, uma espécie de WMA desenvolvido por Karl-Gunnar Olsson. Eles não estavam usando espuma ou aditivos em 2013, com o método KGO (Karl-Gunnar Ohlson), as frações grosseiras da mistura agregado são inicialmente revestidas com betume e os agregados finos, filler e areia, são adicionados mais tarde. Isto resulta em uma mistura com melhores propriedades de compactação de modo a que pode ser produzida, preparada e compactada a um nível de temperatura mais baixa.

Na Turquia, as especificações técnicas de Rodovias contêm disposições para lidar com misturas com aditivos para WMA, sujeitos a demonstração de desempenho equivalente. Até agora não há nenhuma experiência de campo em rodovias.

Há um projeto de pesquisa para desenvolver tecnologia de produção de WMA conduzido pela Direção Geral de Estradas de Rodagem e do Conselho de Pesquisa Científica e Tecnológica. O estudo será finalizado até o final de 2015. O objetivo principal é a produção de aditivos domésticos para WMA.

Além disso, as áreas de transporte de algumas universidades têm pesquisas sobre aditivos e também espuma de asfalto. Em Istambul há seções experimentais construídas em vias urbanas, utilizando zeólitas e cera em 2012. O desempenho dessas seções é muito bom, similar à técnica de produção de asfalto convencional.

Na Suíça há um projeto de pesquisa está em andamento para incluir as tecnologias de WMA. Produtores e empreiteiros estão divulgando suas tecnologias de misturas mornas.

2.3 ZEÓLITAS

O aditivo utilizado nesta pesquisa para a fabricação da mistura morna foi a zeólita natural, assim, neste item serão mostrados detalhamentos sobre este material que é de relevante importância nesta tese.

Conforme explica Shinzato (2008), as zeólitas têm sido estudadas nos últimos anos devido à variedade de aplicações tecnológicas que possuem, como tratamento de solos, tratamento de água e efluentes, produção de cimento pozolânico e concreto, fabricação de detergentes e ração para animais e também como aditivo para a execução de misturas asfálticas mornas entre outras utilidades.

Este mineral foi descoberto em 1756 pelo mineralogista sueco Baron Axel Fredrick Cronstedt e foi chamado de “zeólita” que tem como origem os termos “zéo” e “lithos”, de origem grega, que pode ser traduzido por “pedra que ferve”, pela sua característica de liberar bolhas quando imerso na água e vapor quando submetido ao aquecimento.

Hoje em dia, em torno de 50 tipos de zeólitas naturais foram identificadas em jazidas em diferentes locais do mundo e mais de 150 foram sintetizadas e patenteadas (SOARES, 2010).

A clinoptilolita, mordenita, heulandita e phillipsita são zeólitas naturais mais exploradas no mundo.

No Brasil este mineral não é explorado de maneira comercial, apenas estudos sobre a sua existência em determinadas regiões do país.

Dal Bosco et al (2004) utilizaram zeólitas naturais coletadas no município de Morro Reuter/RS, Bernardi et al (2009) realizaram estudos com mineral zeolítico da Formação Corda na Bacia do Parnaíba/MA, Murata (1987) apud Bernardi et al (2008) estudou a possibilidade da existência de espécies de zeólitas na bacia do Paraná.

Existem poucos dados sobre reservas mundiais de zeólitas, Sheppard (1975) apud Luz (1994) uma estimativa sobre os depósitos de zeólitas nos Estados Unidos e Eyde e Shelton (1991) apud Luz (1994) em Cuba, de onde 45% se extrai zeólita natural do tipo clinoptilonita, de onde veio o material utilizado neste estudo.

A Tabela 2.2 mostra os dados disponíveis de Estados Unidos e Cuba e de países que possuem reservas potenciais.

Tabela 2.2 – Reservas mundiais de zeólitas
Fonte: Luz (1994)

Ano	País	Reserva (10 ⁶ t)
1968	Estados Unidos	120
	França	-
	Hungria	-
	Bulgária	-
	Japão	-
1990	Cuba (45% clinoptilonita)	669

Já estimativas realizadas pelo “United States Geological Survey” em artigo de Virta (2007) indicam que a produção anual mundial de zeólitas naturais esteja entre 2,5 e 3 milhões de toneladas, com base em informações de países produtores, tais como China (de 1,75 a 2,25 milhões de toneladas), Coreia do Sul (175 mil toneladas), Japão (140 a 160 mil toneladas), Estados Unidos (65,5 mil toneladas), Cuba (35 a 45 mil toneladas), Hungria e Turquia (30 a 35 mil toneladas) entre outros de menor volume.

2.3.1 Classificação das Zeólitas

Existem diversas maneiras de classificação das zeólitas, porém em grande parte se trata de modificações na classificação estabelecida por Breck (1974), que define por unidades fundamentais de construção secundárias (SBU's) as estruturas resultantes das ligações dos tetraedros (que são as unidades primárias) como estruturas tridimensionais e classificadas em 7 grupos (Tabela 2.3):

Tabela 2.3 – Classificação das zeólitas
Fonte: Breck (1974)

Grupo	Classe	Zeólita
1	SR4 - anel simples de 4 tetraedros	analcima, phillipsita
2	SR6 - anel simples de 6 tetraedros	erionita, offretita
3	DR4 - anel duplo de 4 tetraedros	zeólita A e P
4	DR6 - anel duplo de 6 tetraedros	faujasita, chabazita
5	Complexa 4 - 1 T ₅ O ₁₀	natrolita, thomsonita
6	Complexa 5 - 1 T ₈ O ₁₆	mordenita, epistilbita
7	Complexa 4 - 4 - 1 T ₁₀ O ₂₀	heulandita, estilbita, clinoptilonita

Conforme Shinzato (2007), o tamanho da abertura dos poros, na estrutura das zeólitas, é dependente da quantidade de átomos de oxigênio presentes na abertura dos poros, o que resulta em as zeólitas também poderem ser classificadas de acordo com o tamanho dos seus poros.

Pabalan e Bertetti (2001) dizem que as zeólitas são constituídas de aluminossilicatos hidratados, formados por estruturas tridimensionais de tetraedros de SiO_4 e de AlO_4 , cuja deficiência de carga (que tem como causa a substituição isomórfica do Si^{4+} pelo Al^{3+}) é compensada por cátions alcalinos e/ou alcalinos terrosos localizados nas cavidades dos anéis de oxigênio, e **“nessas cavidades, a água e outras moléculas podem se instalar e/ou movimentar, permitindo uma reversível hidratação”** e uma troca iônica que equivale à substituição do Si^{4+} por Al^{3+} nos tetraedros estruturais.

“As zeólitas englobam um grande número de minerais naturais e sintéticos que apresentam características comuns. São aluminossilicatos hidratados de metais alcalinos e alcalinos terrosos (principalmente sódio, potássio, magnésio e cálcio), estruturados em redes cristalinas tridimensionais, compostas de tetraedros do tipo TO_4 ($T = \text{Si, Al, B, Ge, Fe, P, Co} \dots$) unidos nos vértices através de átomos de hidrogênio.

A estrutura das zeólitas apresenta canais e cavidades interconectadas de dimensões moleculares, nos quais se encontram os íons de compensação, moléculas de água ou outros adsorvatos e sais. Este tipo de estrutura microporosa confere às zeólitas uma superfície interna muito grande, quando comparada à superfície externa. A estrutura da zeólita permite a transferência de matéria entre os espaços intracristalinos, no entanto essa transferência é limitada pelo diâmetro dos poros das zeólitas. Dessa forma, só podem ingressar ou sair do espaço intracristalino aquelas moléculas cujas dimensões são inferiores a um certo valor crítico, que varia de uma zeólita para outra.” (LUZ, 1995, p. 4)

Luz (1995) nos mostra na Figura 2.48 as unidades estruturais básicas das zeólitas, na Figura 2.49 as unidades de construção secundária e na Figura 2.50 a estrutura das zeólitas.

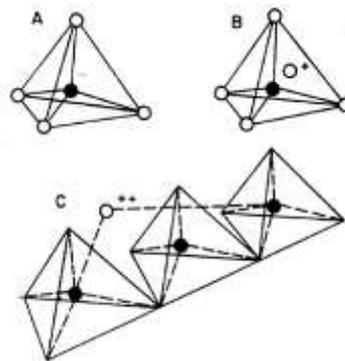


Figura 2.48 - Unidades estruturais básicas das zeólitas. A. Tetraedro com um átomo de silício no centro e átomos de oxigênio nos vértices. B. Tetraedro com átomo de Al substituindo o Si e ligado a um cátion monovalente para compensar a diferença de carga entre o Si e o Al.

Fonte: Luz (1995) apud Clifton (1987)

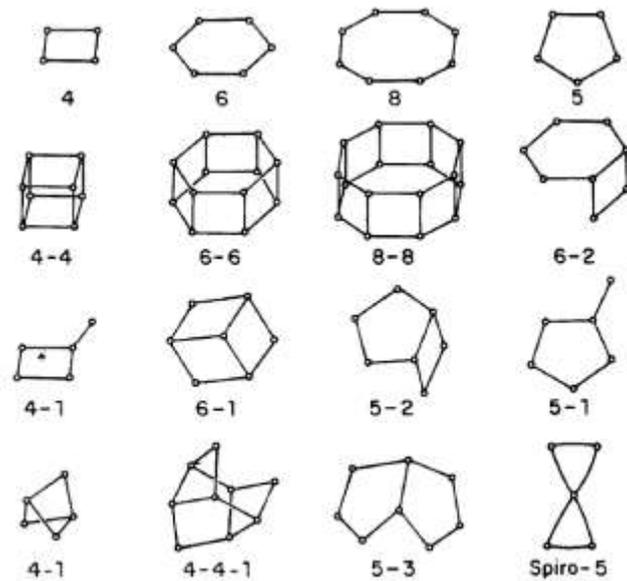


Figura 2.49 - Unidades de construção secundária das zeólitas
Fonte: Luz (1995) apud Meier (1992)

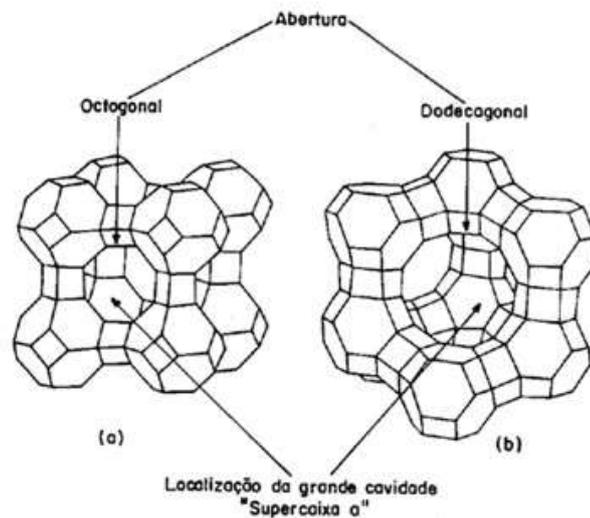


Figura 2.50 - Estrutura das zeólitas.
Fonte: Luz (1995) apud Gianneto (1989)

Conforme Aguiar et al (2001), a estrutura microporosa existente nas zeólitas faz com que elas tenham uma superfície interna muito maior do que a externa, permitindo que haja transferência de massa entre o espaço cristalino e o meio externo, porém esta transferência pode ser limitada pelo diâmetro dos poros da estrutura zeolítica.

Cada tetraedro de AlO_4 na estrutura carrega uma carga negativa que é equilibrada por cátions de carga positiva, tais como de sódio $[Na^+]$, potássio $[K^+]$, ou $[Ca^{2+}]$, a Figura 2.51 mostra fotos de zeólitas naturais tipo clinoptilonitas onde é possível verificar a sua estrutura cristalina.

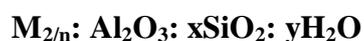


Figura 2.51 - Fotos de zeólitas naturais: a) Clinoptilonita-K b) Clinoptilonita-Na c) Clinoptilonita-CA
Fonte: Bogdanov et al (2009)

Estes cátions univalentes e/ou bivalentes podem ser substituídos através de troca iônica de outros íons.

Por causa das forças eletrostáticas não é possível fazer uma ligação Al-O-Al, eles são constituídos por "T-átomos" que são tetraedros ligados um ao outro por pontes de oxigênio.

Outros "T-átomos" com P, Ga, Ge, Be também podem existir na estrutura, uma fórmula geral para uma zeólita natural pode ser escrita como:



Onde "M" é o cátion de equilíbrio de carga, "n" a carga do cátion, "x" é geralmente ≥ 2 , e "y" é "o número de moléculas de água no vazios das zeólitas" (BOGDANOV ET AL, 2009).

A Tabela 2.4, apresentada por Bernardi et al (2008), mostra a propriedade de algumas espécies de zeólitas onde se pode observar que o tipo "clinoptilonita", utilizado na pesquisa, possui um volume de vazios determinado pelo conteúdo de água em torno de 39% e uma fórmula que possui quantidade significativa de água na sua estrutura e, como já comentado, a maior parte das zeólitas tem como característica absorver e perder água sem causar danos a

sua estrutura cristalina, assim o calor é capaz de expulsar a água que está retida na zeólita e entregá-la ao sistema que proporcionará a redução da viscosidade do ligante asfáltico através do processo de espuma.

A quantidade de água no interior de um zeólita natural é variável uma vez que ela tanto absorve como libera água com facilidade, ela pode armazenar de 30 a 40% do seu peso em água, porém a água facilmente disponível deverá estar próxima a um teor próximo de 6% que é a sua umidade natural, existindo mais uma parcela de água de reserva que pode chegar a um teor de água que pode ser liberada em torno de 15% do seu peso, quando aquecida a mais de 100°C.

O teor de água que ainda persiste, para ser liberado, precisa de temperaturas acima de 1000°C, quando o mineral se aproximar do seu ponto de fusão e então começa a ocorrer a sua decomposição.

Tabela 2.4 – Fórmulas e propriedades de algumas espécies de zeólita
Fonte: Bernardi et al (2008)

Zeólita	Fórmula	Volume vazio* (%)	Dimensão dos canais (Å)	Estabilidade térmica	CTC** (meq.g ⁻¹)
Analcima	Na ₁₆ (Al ₁₆ Si ₃₂ O ₉₆).122H ₂ O	18	2,6	Alta	4,54
Chabazita	(Na ₂ ,Ca) ₆ (Al ₁₂ Si ₂₄ O ₇₂).40H ₂ O	47	3,7 X 4,2	Alta	3,81
Clinoptilolita	(Na ₄ K ₄)(Al ₈ Si ₄₀ O ₉₆).24H ₂ O	39	3,9 x 5,4	Alta	2,54
Erionita	(Na,Ca ₅ ,K) ₉ (Al ₉ Si ₂₇ O ₇₂).27H ₂ O	35	3,6 X 5,2	Alta	3,12
Faujasita	Na ₅₈ (Al ₅₈ Si ₁₃₄ O ₃₈₄).27H ₂ O	47	7,4	Baixa	3,39
Ferrierita	(Na ₂ Mg ₂)(Al ₆ Si ₃₀ O ₇₂).18H ₂ O	39	4,3 x 5,5 3,4 X 4,8	Baixa	2,33
Heulandita	Ca ₃ (Al ₈ Si ₂₈ O ₇₂).24H ₂ O	28	4,0 x 5,5 4,4 X 7,2 4,1 x 4,7	Alta	2,91
Laumontita	Ca ₄ (Al ₈ Si ₁₆ O ₄₈).16H ₂ O	31	4,6 X 6 , 3	Baixa	4,25
Mordenita	Na ₈ (Al ₈ Si ₄₀ O ₉₆).24H ₂ O	47	2,9 X 5,7 6,7 X 7,0	Alta	2,29
Phillipsita	(Na,K) ₁₀ (Al ₁₀ Si ₂₂ O ₆₄).20H ₂ O	50	4,2 X 4,4 2,8 X 4,8 3,3	Alta	3,87
Estilbita	(CaO) _{0,82} (Na ₂ O) _{0,19} (K ₂ O) _{0,15} (MgO) _{0,56} (Fe ₂ O ₃) _{0,30} (TiO ₂) _{0,11} (Al ₂ O ₃) _{1,85} (SiO ₂) ₁₆ (H ₂ O) _{4,7}				2,5

*Determinado pelo conteúdo de água. ** Capacidade de troca catiônica.

A Clinoptilonita é um dos tipos de zeólita natural, sendo um aluminosilicato de sódio, potássio e cálcio hidratado e que possui a seguinte fórmula molecular básica:



Ela pertence à família das heulanditas, junto com a laumontita e mordenita, entre outras, a Figura 2.52 mostra os componentes principais da sua estrutura.

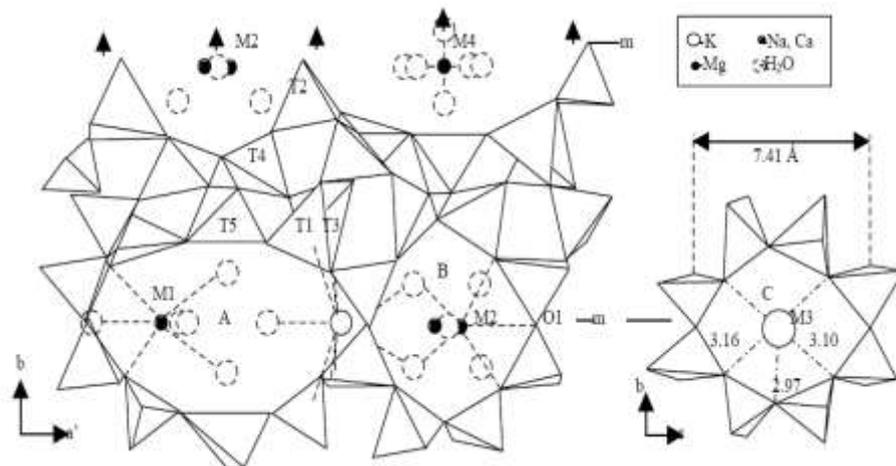


Figura 2.52 – Estrutura da Clinoptilonita.
Fonte: Gutierrez (2004)

Conforme Gutierrez (2004), a composição química da série heulandita-clinoptilonita (HEU-Clino) são caracterizadas por fortes mudanças na relação Si/Al e da composição dos cátions trocáveis. Os membros desta série são diferenciados de acordo com o seu teor de sílica (maior teor contra o menor teor de sílica). Zeólitas com baixos teores de sílica são ricas em cálcio e muitas vezes contêm Ba e Sr, enquanto que as zeólitas que possuem alto teor de sílica são ricas em potássio, sódio e magnésio. A ocorrência de cátions de metais alcalinos, de potássio, é mais comum em zeólitas do topo clinoptilonita, mas existem clinoptilonitas na natureza com alto teor de sódio também.

2.3.1.1 Propriedades e aplicações das zeólitas naturais

Luz (1994) comenta que todas as zeólitas que possuem um valor comercial devem isto, pelo menos, a uma de três propriedades importantes, que são a “adsorção”, a “catálise” e a “capacidade de troca catiônica”.

A capacidade de “troca catiônica” deve-se ao desequilíbrio de cargas que irão atrair o cátion mais próximo, de forma que seja mantida a neutralidade, sendo uma função da relação Si e Al, sendo expressa em número de cátions por unidade de volume ou massa, que está disponível para troca.

Ferret (2004) explica que esta é a principal função das zeólitas na fórmula de detergentes, trocando seus cátions pelos Ca^{2+} presentes na água e desta forma removendo a sua dureza.

A propriedade de “catálise” se está relaciona com as superfícies ativas da estrutura das zeólitas, com o sistema interno de passagens e vazios, o tamanho das cavidades internas e a propriedade de troca catiônica.

A propriedade de “adsorção” se relaciona com a grande superfície interna, por sua estrutura cristalina ser caracterizada por grandes cavidades espaçosas dentro de uma estrutura microporosa, a mordenita, por exemplo, tem uma superfície interna de $400 \text{ m}^2/\text{g}$, e a clinoptilonita possui em torno de $300 \text{ m}^2/\text{g}$.

Na propriedade de adsorção, associada à capacidade de “dessorção”, onde no primeiro caso moléculas de água são armazenadas nas cavidades estruturais e no segundo estas moléculas são liberadas facilmente, que se baseia o processo de mistura morna pelo processo de espuma utilizando a zeólita natural como aditivo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DA PESQUISA

O trabalho proposto tem caráter experimental, buscando uma aplicação prática que resulte em dados para a utilização de mistura morna com adição de zeólitas naturais em estradas e vias urbanas.

Para que o objetivo geral e os objetivos específicos pudesse ser alcançados foram utilizados os materiais e metodologia descritos a seguir, que resultaram em dados para a análise e considerações finais desta tese.

Os experimentos deste trabalho foram realizados na usina de asfalto e laboratório da empresa COESUL – Construtora Extremo-Sul Ltda, na Área de Testes de Pavimentos DAER/UFRGS e no Laboratório de Pavimentação da UFRGS (LAPAV/UFRGS), no Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da UFRGS, no Laboratório de Asfalto da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), na Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul (CIENTEC) e no Laboratório de Ensaio em Revestimentos Cerâmicos (LERC), da Escola SENAI Mario Amato - Núcleo de Tecnologia Cerâmica, em São Bernardo do Campo/SP.

Tais experimentos se tornaram possíveis devido à disponibilidade da empresa COESUL em participar da pesquisa, fornecendo materiais, equipamentos e mão-de-obra para a fabricação das misturas mornas e construção das pistas experimentais.

Também foi de fundamental importância a participação da empresa CELTA BRASIL Ltda. no desenvolvimento desta pesquisa, com o fornecimento das zeólitas naturais, que serviram como o agente que possibilitou a fabricação da mistura asfáltica em temperaturas inferiores as usuais.

Igualmente importantes foram as participações dos outros órgãos citados, como UFSC, CIENTEC e CME/UFRGS e LERC/SENAI, que contribuíram com a sua tecnologia.

A pesquisa também contou com o apoio da Prefeitura Municipal de Porto Alegre (PMPA), que tem interesse na utilização da tecnologia dentro do município, tanto para a produção de uma mistura morna de boa relação custo-benefício em suas usinas de asfalto, para uso no município através da sua Divisão de Conservação de Vias Urbanas, quanto para um melhor conhecimento das tecnologias existentes para contratação de serviços terceirizados.

Deu-se início na pesquisa com o objetivo geral de descobrir se é viável produzir uma mistura asfáltica morna com a adição de zeólitas naturais em uma usina de asfalto e aplicá-la na prática, porém que esta mistura não tivesse um custo muito acima do custo de um concreto asfáltico convencional, uma vez que pretendendo-se utilizá-la pela PMPA, é importante que para seu uso em larga escala possa existir uma relação custo-benefício interessante aos cofres públicos.

A opção da mistura morna com utilização de zeólitas naturais se deu pelo motivo de haver fornecedor deste material interessado em participar da pesquisa e que, em uma análise prévia, mostrou ter uma boa relação custo-benefício como se procurava inicialmente, satisfazendo este quesito que era importante nesta tomada de decisão.

Para possibilitar o estudo foram feitos estudos laboratoriais de misturas mornas e convencionais, foram produzidas misturas mornas em usina de asfalto e foram construídas duas pistas experimentais na Área de Testes de Pavimentos do LAPAV/UFRGS.

Neste capítulo serão mostrados maiores detalhes sobre a metodologia utilizada para os estudos, monitoramentos e avaliações realizados.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste item apresentam-se os materiais (ligantes, agregados e zeólita natural) utilizados no projeto da mistura morna, nos ensaios laboratoriais, na produção do asfalto morno e na construção das pistas experimentais.

3.2.1 Zeólitas Naturais

A zeólita natural utilizada neste experimento é do tipo Clinoptilonita, importada de Cuba proveniente da mina de San Andres, localizada na província de Holguin, com capacidade de produção de 80.000 ton/ano, saindo através do Porto de Santiago e distribuída no Brasil pela empresa Celta Brasil Ltda., a qual forneceu material.

A Figura 3.1 mostra a zeólita natural utilizada na pesquisa retirados da mina de San Andres, em Cuba. Pode-se observar que é um mineral de coloração clara, próxima ao branco, levemente esverdeada, e que quando retirada do seu estado natural possui granulometria graúda, equivalente a grandes blocos de rocha. Na mesma figura se observa a aparência dos planos de corte natural deste mineral logo após a sua extração.



Figura 3.1 – Blocos de zeólita natural em Cuba
Fonte: Celta Brasil Ltda.

É possível ser observado, na Figura 3.2, o perfil geológico de uma região já explorada na mina de San Andreas, em Cuba, onde se percebe que o material aflora perto da superfície sendo, por este motivo, de fácil extração.

Já na Figura 3.3 se observa o material mineral extraído depois de britado na área de produção, sendo possível se fabricar zeólitas naturais com granulometrias variadas, as quais irão variar dependendo de qual será a sua utilização.



Figura 3.2 – Perfil em corte da jazida de zeólita natural em Cuba
Fonte: Celta Brasil Ltda.



Figura 3.3 – Zeólita natural após britagem
Fonte: Celta Brasil Ltda.

A caracterização da zeólita natural, do tipo clinoptilonita, utilizada nesta pesquisa e provenientes da mina de San Andreas, em Cuba, e fornecida pela empresa Celta Brasil Ltda., apresenta a composição química e granulometria informadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Características da zeólita natural tipo clinoptilonita utilizada na pesquisa
Fonte: Celta Brasil

SiO ₂	62 a 64%
Al ₂ O ₃	10 a 12%
Fe ₂ O ₃	0,8 a 1%
CaO	0,3 a 1%
Na ₂ O	4 a 6%
K ₂ O	2 a 4%
LOI	11 a 13%
Massa específica	0,98 kg/dm ³
Granulometria	325 mesh

Uma análise do material por difração de Raio-X, efetuada pelo Laboratório de Ensaio em Revestimentos Cerâmicos (LERC), da Escola SENAI Mario Amato - Núcleo de Tecnologia Cerâmica, em São Bernardo do Campo/SP, mostrou o seguinte resultado Figura 3.5.

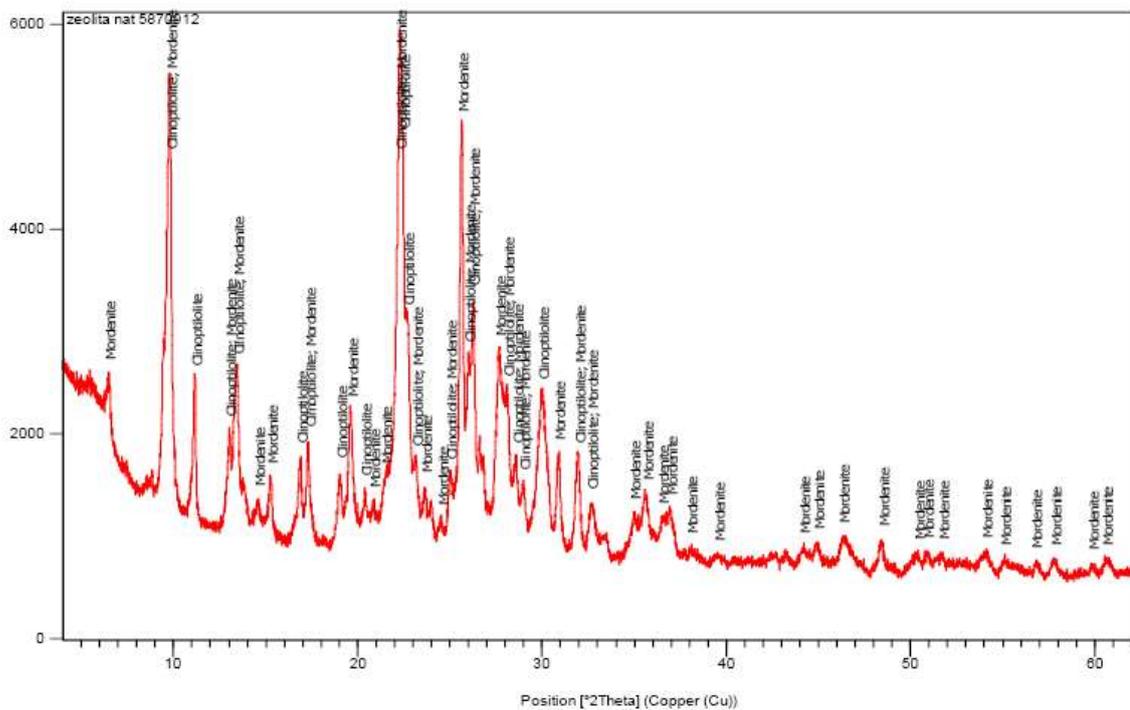


Figura 3.4 – Resultado da difração de raio-x da zeólita da pesquisa
Fonte: Laboratório de Ensaio em Revestimentos Cerâmicos (LERC)

A interpretação do resultado da difração de raio-x pelo LERC apontou a composição mineralógica formada por uma zeólita 98% do tipo clinoptilonita e 2% do tipo modernita conforme mostrado na figura 3.5.

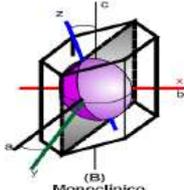
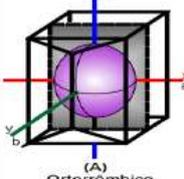
CLASSIFICAÇÃO MINERALÓGICA	ESPÉCIE	% DA FASE ENCONTRADA NA AMOSTRA	FÓRMULA SIMPLIFICADA	SISTEMA CRISTALINO
ZEOLITA	CLINOPTIOLITA	98%	$(Na_xK_yCa_zSi_{60}Al_{10}O_{380} \cdot nH_2O)_z$	MONOCLÍNICO EIXOS: (a ≠ b ≠ c ≠ a) ÂNGULOS ENTRE EIXOS: (α = γ = 90°; β ≠ 90°)  (B) Monoclinico
ZEOLITA	MORDERNITA	02%	$(Na_xCa_yK_z[Al_xSi_yO_{40}] \cdot 28H_2O)$	ORTORRÔMICO EIXOS: (a ≠ b ≠ c ≠ a) ÂNGULOS ENTRE EIXOS: (α = β = γ = 90°)  (A) Ortorrômico

Figura 3.5 – Resultados da análise por difração de raio-x da zeólita da pesquisa
Fonte: Laboratório de Ensaio em Revestimentos Cerâmicos (LERC)

Para estudar com um pouco mais de profundidade este mineral, foi realizada junto a Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul (CIENTEC) outra difração de raio-x na zeólita natural, cujo resultado esta mostrado na Figura 3.6.

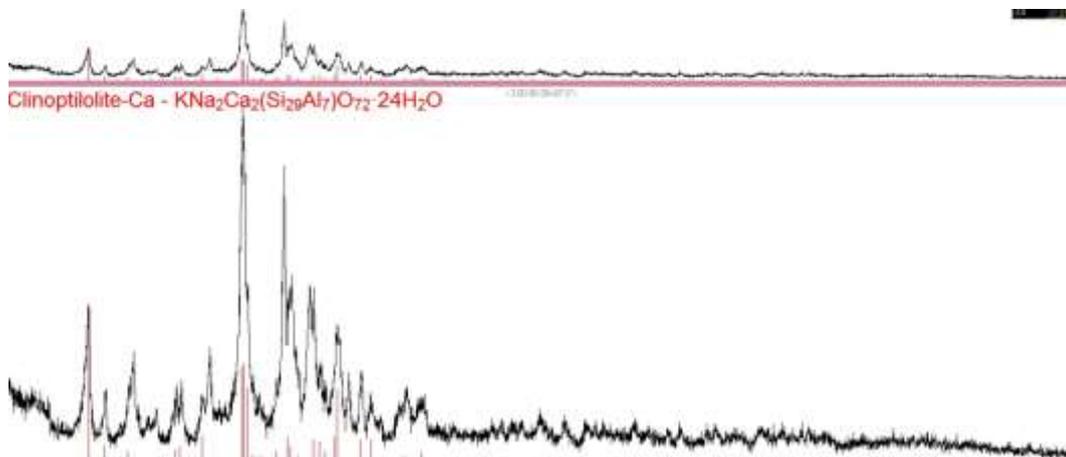


Figura 3.6 – Resultados de análise por difração de raio-x da zeólita da pesquisa
Fonte: Fundação de Ciências e Tecnologia do RS (CIENTEC)

Técnicos da CIENTEC explicaram que estes difratogramas não são de fácil interpretação, porém observa-se uma boa coincidência dos picos do padrão mineralógico de uma zeólita natural do tipo clinoptilonita com o material analisado.

Para ampliar a análise e caracterização da zeólita foram tiradas fotografias microscópicas no Centro de Microscopia Eletrônica (CME), da UFRGS.

A granulometria da zeólita usada na pesquisa é de 325 mesh, ou seja, de material que passa na peneira com malha de 0,044mm, a Tabela 3.2 abaixo relaciona este valor com outras unidades e como se pode observar, se trata de um pó muito fino.

Tabela 3.2 – Conversão de unidades de referência

MESH	POLEGADAS	MICRÔMETRO	MILIMETROS
325	0,0017	44	0,044

Para a análise do material em uma microscópico de varredura eletrônica, é preciso que sejam preparadas amostras em “STUBS”, que são pequenas peças metálicas. Assim foram preparadas amostras em “STUBS” (Figura 3.7), contendo a menor quantidade de material possível para poder-se obter boas imagens junto ao microscópio eletrônico MEV.

Para isto uma porção muito pequena, coletada com a ponta de um palito de dente foi rapidamente pulverizada sobre uma fita de carbono adesiva colocada no topo do stub e logo em seguida soprada.

O material que restou para a análise microscópica foi somente a porção que ficou aderida sobre a película de carbono, praticamente imperceptível.

Logo em seguida a amostra foi encaminhada para metalização porque, pelo motivo de não ser um material condutivo, necessita ser recoberta por uma camada ultrafina de material condutivo, que serve para melhorar o contraste para a geração das imagens, nesse caso o material usado para metalização foi o ouro.



Figura 3.7 – Amostras preparadas em STUBs

O microscópio eletrônico por varredura (MEV) é capaz e produzir imagens da amostra em ampliações de até 300.000X, porém, como observado durante a visualização, isto depende do tipo de amostra e, para ampliações maiores, é cada vez mais difícil de se obter um bom foco e uma imagem perfeita, nesse caso esta situação pode ser comprovada.

O microscópio utilizado foi o “Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL JSM 6060” (Figura 3.8), que conforme já mencionado, pertence à UFRGS e fica localizado no CME – Centro de Microscopia Eletrônica no Campus do Vale em Porto Alegre/RS.



Figura 3.8 – Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL JSM 6060

Para melhor avaliação das fotografias lembra-se que $1\mu\text{m}$ equivale a $0,001\text{mm}$, ou seja, um milésimo de milímetro, as barras mostradas nas fotografias expressam comprimentos em “ μm ” para que haja uma comparação.

Da Figura 3.9 à Figura 3.12 estão mostradas fotografias microscópicas ampliadas 4.500X, 15.000X, 20.000X e 30.00X, respectivamente, provavelmente retiradas da superfície de “um grão”, uma vez que o diâmetro da partícula analisada possui em torno de 20 a $25\mu\text{m}$.

As imagens sugerem que a estrutura da zeólita realmente porosa com a existência de um número muito grande de micro cavidades que conferem a ela uma superfície interna muito grande quando comparada com a externa com capacidade de armazenar moléculas de água.

Apesar de poder-se observar a existência desta estrutura porosa não foi possível, através das imagens, verificar se existe água alojada nestas cavidades.

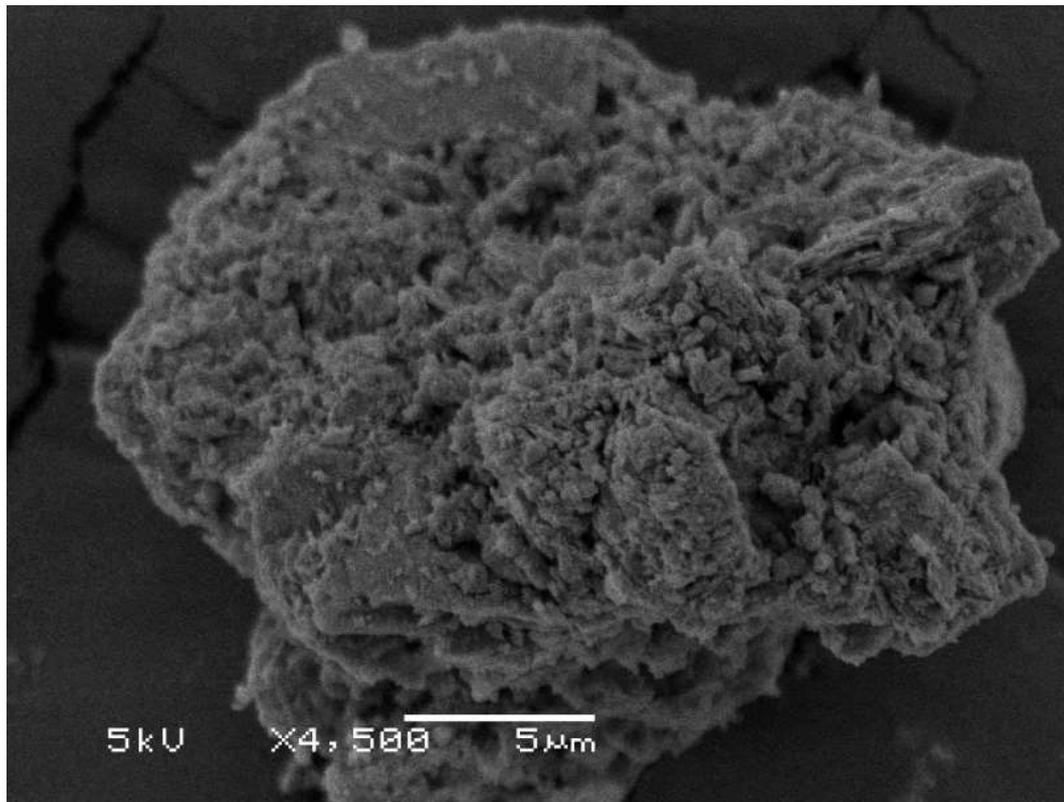


Figura 3.9 – Amostra ampliada em 4.500X

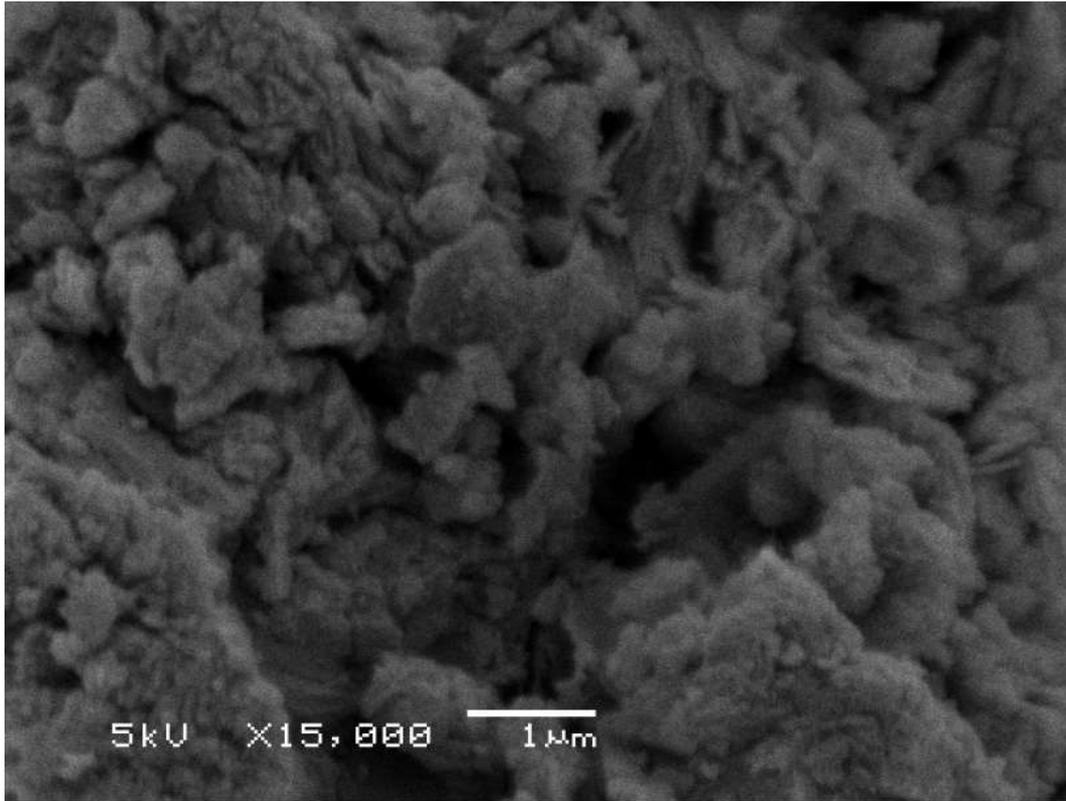


Figura 3.10 – Amostra ampliada em 15.000X

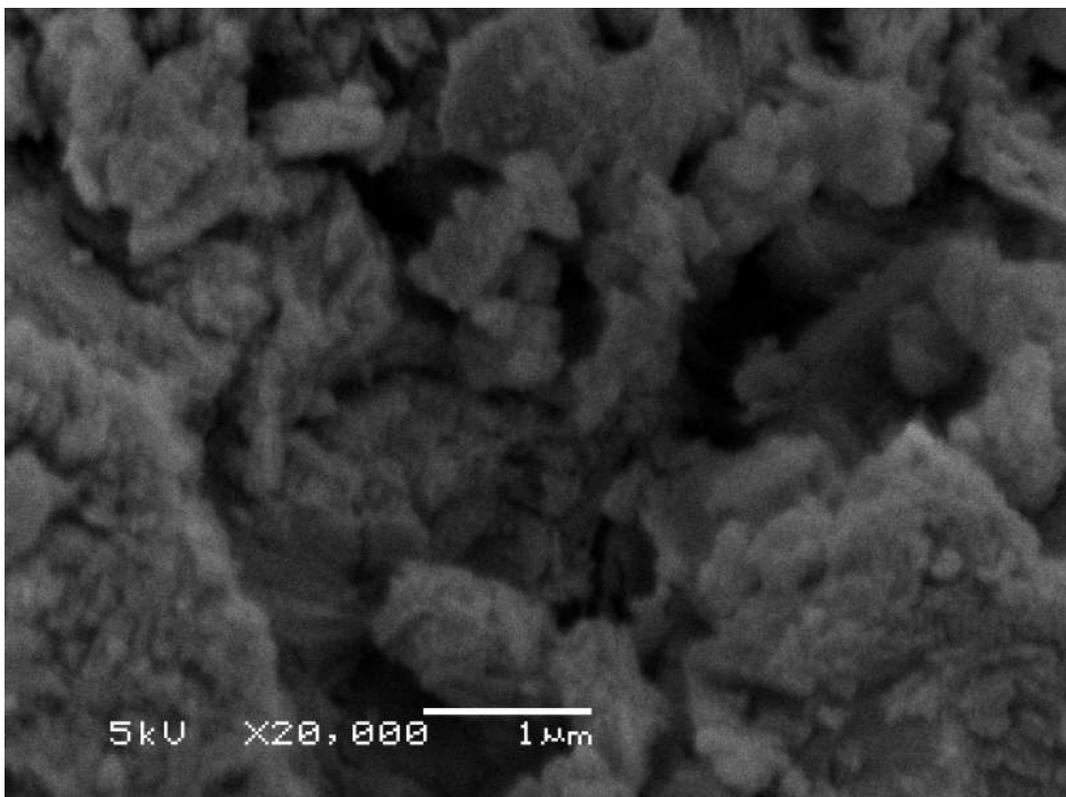


Figura 3.11 – Amostra ampliada em 20.000X

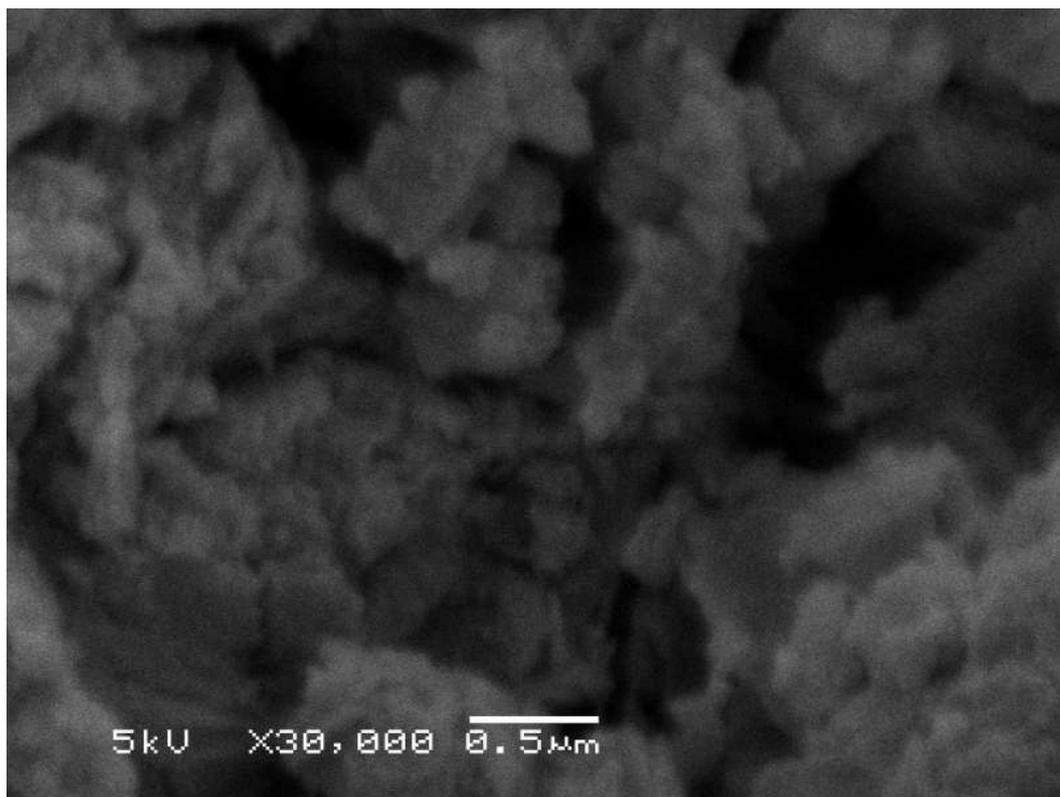


Figura 3.12 – Amostra ampliada em 30.000X

Em esclarecimentos feitos por Jorge A. Febles, responsável pela Divisão de Zeólitas da mineradora Cubana, foi informado que em seu estado natural a zeólita do tipo clinoptilonita utilizada na pesquisa possui um teor de umidade em torno de 4% a 6% do seu peso, conforme ensaios realizados onde a amostra é pesada em seu estado natural e levada a um forno na temperatura de 100°C pelo período de uma hora.

Esta quantidade de água é liberada imediatamente quando a zeólita é submetida a temperaturas acima de 100°C, porém ainda existe uma parcela de água facilmente disponível, que junto com o teor de umidade natural da zeólita, pode liberar até 15% do seu peso quando aquecida acima de 100°C.

Porém este valor é de difícil determinação, pois é uma característica da zeólita absorver e fornecer água com facilidade, desta forma o teor de água a ser liberado quando do aquecimento da zeólita do tipo clinoptilonita usada na pesquisa deverá estar situado entre 4% e 15% do seu peso.

Ainda resta outra parcela de água na sua estrutura, porém está ligada diretamente à sua composição mineralógica, e que precisa de temperaturas acima de 1000°C para começar a ser suprimida até que o material atinja o seu ponto de fusão, perto de 1300°C e comece a se decompor.

Ensaio realizado na amostra na CIENTEC regrado pela norma ABNT NBR NM 18:2012 – Determinação de perda ao fogo, utilizada para análise química de cimento Portland, porém adequada às zeólitas naturais em função da sua granulometria e objetivo de verificar a perda de água, onde a amostra é aquecida a uma temperatura de 950°C, demonstrou uma perda de 15,7% em massa, onde possivelmente este valor seja referente a evaporação de água, uma vez que não ocorreu decomposição do material.

Assim, a água liberada para promover a espumação do ligante com conseqüente redução da sua viscosidade e, desta forma, proporcionar a mistura asfáltica morna através da adição das zeólitas naturais utilizadas nesta pesquisa, considerando uma média de liberação de água na ordem de 5%, deverá estar em torno de 150ml por tonelada de mistura asfáltica morna uma vez, que foi utilizado 3kg de zeólitas por tonelada fabricada.

Como exemplo, a Tabela 3.3 mostra uma simulação da quantidade, em peso, de material utilizado para a produção de uma tonelada da mistura morna que foi executada na pista 2, com uma média de 5% do peso da zeólita natural em água liberada.

Tabela 3.3 – Composição da mistura morna 2 com teor de água liberado pelas zeólitas

Material	%	Peso (kg)
Agregados	93,80%	938,00 kg
Ligante	5,90%	59,00 kg
Zeólitas (mineral)	0,30%	2,85 kg
Água liberada das cavidades das zeólitas		0,15 kg
Total	100,00%	1000,00 kg

Este dado é relevante neste estudo para que se entenda a quantidade de água que foi liberada a sua ação sobre o ligante, possibilitando a formação de espuma, redução da viscosidade do CAP e trabalhabilidade na mistura morna.

Observando a relação água/ligante, verifica-se que para 59kg de ligante foram adicionados aproximadamente 0,15 kg de água, em uma analogia rápida pode-se dizer que para cada 60kg de CAP foram utilizados em torno de 150 ml de água, liberada pela zeólita natural, para que ocorresse a redução da sua viscosidade.

Porém é cabível lembrar que os agregados, ao passarem pelo tambor secador na temperatura de 130°C, possam não receber uma secagem completa, contribuindo também com pequeno percentual de água na mistura.

A Figura 3.13 apresenta um gráfico de liberação de água pela zeólita natural, medida pela sua perda de massa, em função da elevação da temperatura.

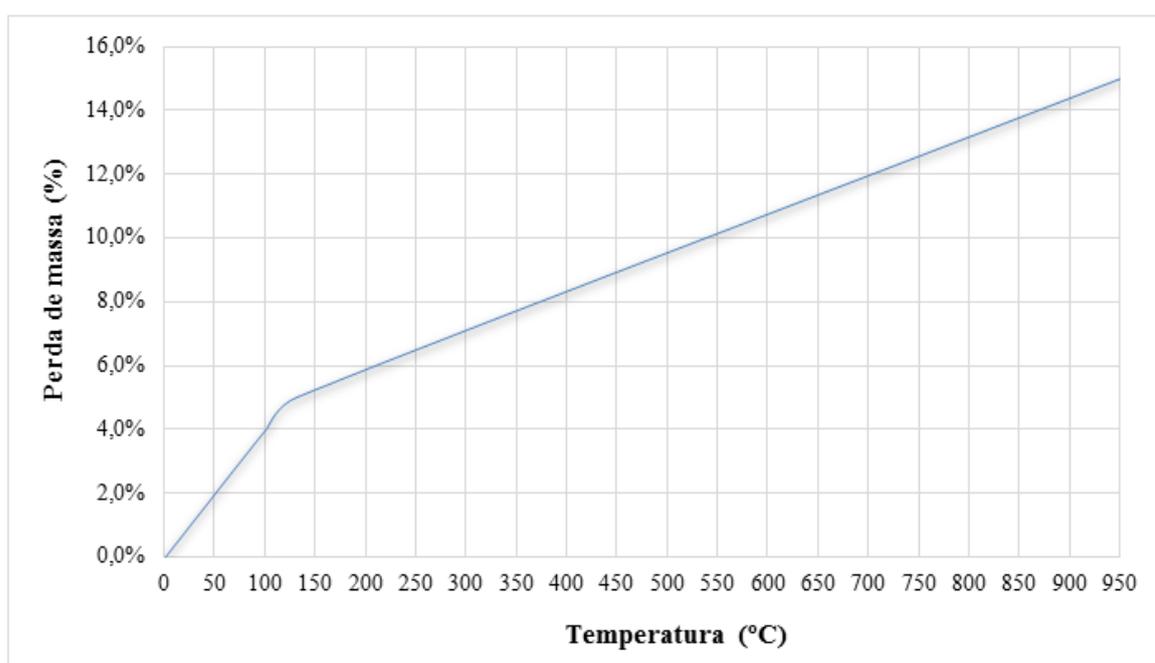


Figura 3.13 – Curva liberação de água x temperatura na zeólita natural

É possível se perceber nas fotos microscópicas a existência de cavidades na zeólita que tornam sua superfície interna muito grande. Como é uma característica da zeólita adsorver e liberar água e possuindo um melhor conhecimento de como ela funciona, entende-se como possível adicionar-se água ao material para que ele atinja o teor de água desejado antes da produção da mistura morna.

3.2.2 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)

O cimento asfáltico de petróleo (CAP) utilizado na pesquisa foi do tipo 50/70, fornecido pela REFAP – Petrobrás, conforme especificações constantes na Figura 3.14.

A viscosidade do CAP mostra a sua capacidade de mobilidade molecular e a magnitude das forças atrativas do ligante betuminoso, sendo diretamente influenciada pela temperatura. Desta forma, as forças intermoleculares diminuem com o aumento da temperatura, elevando o poder do ligante de cobrir os agregados e, conseqüentemente, o inverso também ocorre.

A curva viscosidade x temperatura do ligante utilizado, determinada pelos ensaios SAYBOLT FUROL, norma ABNT NBR 14950:2003 - Determinação da viscosidade Saybolt Furol e DNER ME 04/94 – Determinação da Viscosidade Saybolt Furol de materiais betuminosos a alta temperatura, está apresentada na Figura 3.15 a seguir.

PETROBRAS				
Produto: CIMENTO ASFÁLTICO 50/70 Código: 71K Local de amostragem: TQ 24596D	Laboratório REFAP/OT/QP Endereço: Av. Getúlio Vargas, 11000 CEP 92420-221 Canoas - RS Telefone: (51)3415-2243 Fax: (51)3415-2248			
Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
PENETRAÇÃO	D 5	50 a 70	57	0,1mm
PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	46 min	49,6	grau C
VISCOSIDADE BROOKFIELD 135GC-SO21 20RPM	D 4402	274 min	352,5	cp
VISCOSIDADE BROOKFIELD 150 GC-SP21	D 4403	112 min	178	cp
VISCOSIDADE BROOKFIELD 177GC SP21	D 4404	57 a 285	65,75	cp
RTFOT PENETRAÇÃO RETIDA	D5	55 min	72	%
RTFOT-AUMENTO DO PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	8 max	3,8	grau C
RTFOT - DUCTIBILIDADE A 25GC	D 113	20 min	>147	cm
RTFOT VARIAÇÃO EM % MASSA	D 2872	-0,50 a 0,50	-0,108	%
DUCTIBILIDADE A 25 GC	D 113	60 min	>147	cm
SOLUBILIDADE NO TRICLOROETILENO	D 2042	99,5 min	100	% massa
PONTO DE FULGOR	D 92	235 min	236	grau C
ÍNDICE DE SUSCETIBILIDADE TÉRMICA	X 018	-1,5 a 0,7	-1	N/A
DENSIDADE RELATIVA A 20/4 GRAUS CELSIUS	D 70	Anotar (1)	1,002	N/A
AQUECIMENTO A 177 GC	X 215	NESP (2)	NESP	N/A
Notas				
(1) Ensaio não faz parte da especificação, informação para fins de faturamento				
(2) NESP = Não espuma				
- Visc SSF 135°C = 183,5 Visc SSF 150°C = 94,1 Visc SSF 177°C=35,8				

Figura 3.14 – Caracterização do ligante utilizado
Fonte: Petrobras – REFAP

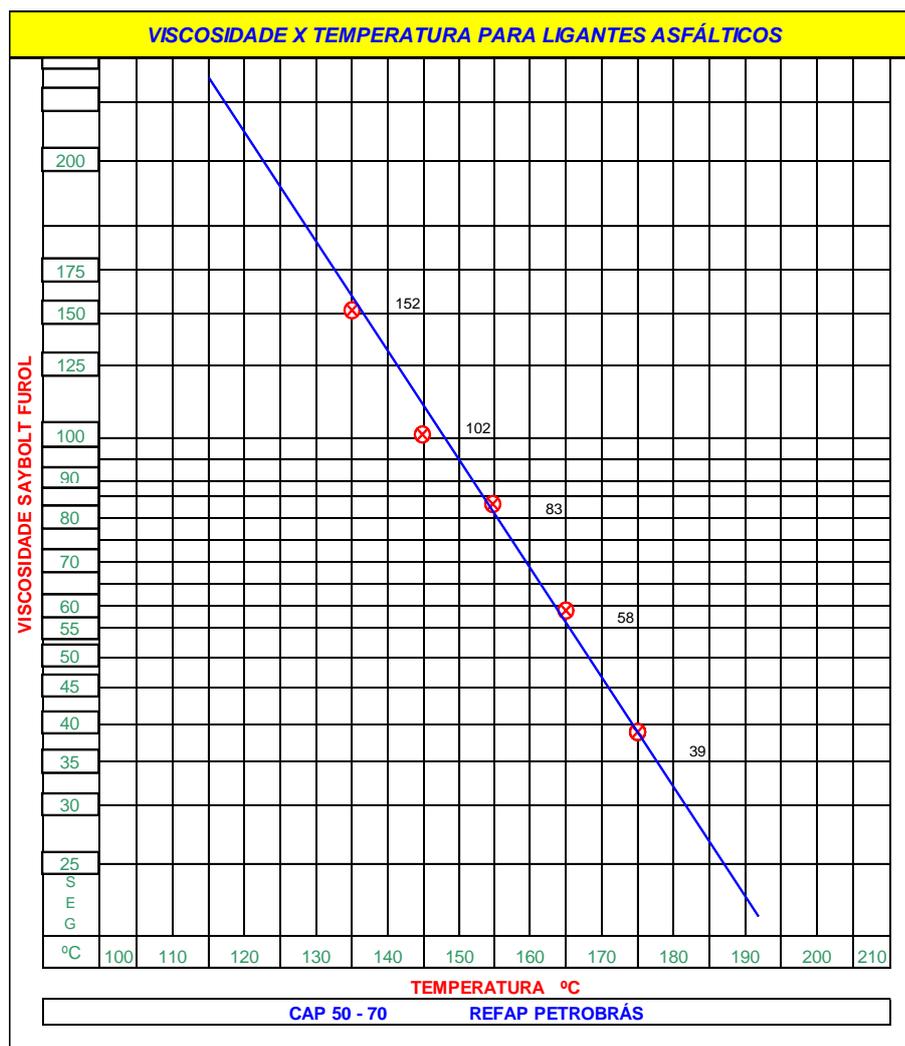


Figura 3.15 - Curva viscosidade x temperatura para o ligante asfáltico

3.2.3 Agregados pétreos

Os agregados utilizados foram rochas basálticas, provenientes de jazida localizada na cidade de Triunfo/RS, em região situada no início do planalto basáltico.

Este mineral é semelhante ao encontrado em pontos variados no estado, sendo considerada a rocha mais representativa desta região, que conforme pode ser observado na Figura 3.16, o derrame basáltico atinge mais de 50% do território do estado do Rio Grande do Sul.

Os agregados foram fornecidos pela empresa Coesul, que também é proprietária da jazida.

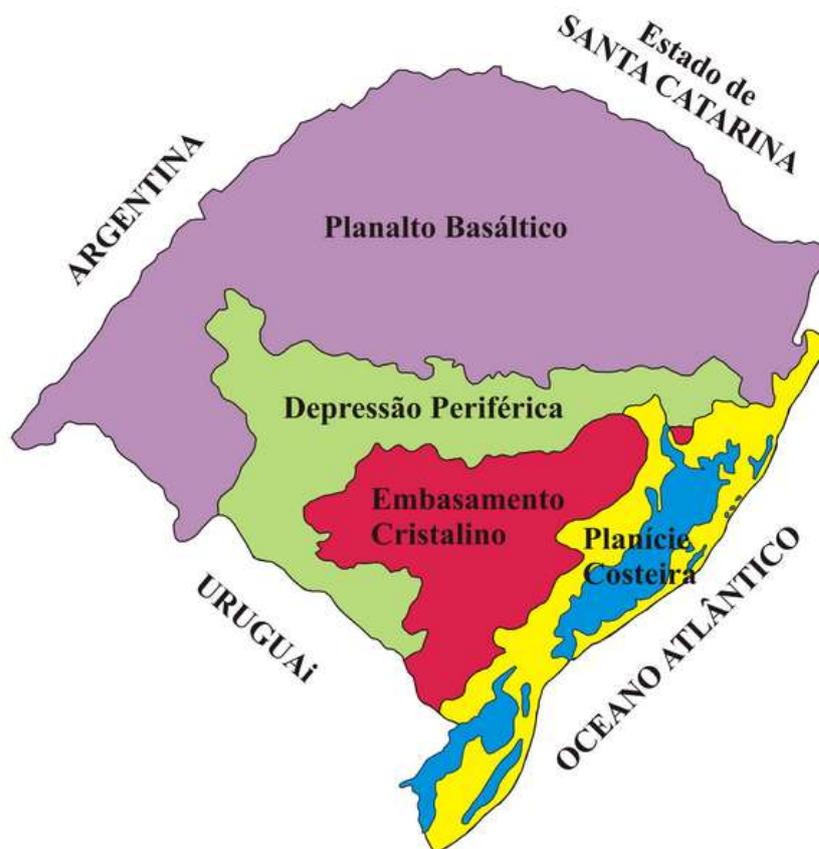


Figura 3.16 – Derrame basáltico no Rio Grande do Sul
 Fonte: Retirado de <http://www.ufrgs.br/paleotocas/GeomorfologiaRS.jpg>

Nas misturas asfálticas, o teor de agregados constitui a sua maior parte, atingindo percentuais acima de 90%, mostrando assim sua importância e justificando a necessidade do conhecimento das suas propriedades.

Para uma melhor caracterização dos agregados utilizados, conforme recomendam as normas brasileiras, foram realizados os ensaios tecnológicos abaixo relacionados cujos procedimentos e resultados serão apresentados nos subitens a seguir:

- Desgaste Mecânico: Determinação da abrasão Los Angeles.
- Equivalente de areia.
- Forma: Determinação do índice de forma.
- Determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo.
- Durabilidade: Avaliação da durabilidade pelo emprego de sulfato de sódio ou magnésio.
- Adesividade à ligante asfáltico – Agregado graúdo - Adesividade à ligante betuminoso.

3.2.3.1 Determinação da Abrasão Los Angeles

A rigidez do agregado graúdo possui relação com os esforços solicitados por abrasão durante a fabricação, espalhamento e compactação da mistura, além da abrasão que ocorre com a ação do tráfego.

O ensaio de Abrasão Los Angeles, regrado pelo método de ensaio DNER-ME 035/98, é um método para determinar o nível de abrasão do agregado.

O resultado do ensaio é analisado pela perda de massa do material em relação à massa inicial da amostra. A Tabela 3.4 apresenta o resultado obtido no ensaio para o agregado basáltico utilizado na pesquisa, conforme a norma DNIT-ES 031/06, a perda de massa deve ser igual ou menor que 50%.

Tabela 3.4 – Resultado do ensaio de Abrasão Los Angeles

Peso inicial (g)	Peso final (g)	Perda de massa (%)
5004,5	4284,7	14,38%

3.2.3.2 Equivalente de Areia

O ensaio, descrito pela norma DNER-ME 054/97, tem como objetivo determinar a presença de finos plásticos no agregado miúdo.

Para a realização do procedimento se coloca uma amostra de material que passa na peneira n°4 em uma proveta contendo solução de cloreto de cálcio, glicerina e formaldeído, deixando em repouso por vinte minutos. Após, se agita o conjunto por trinta segundos e, posteriormente, se completa a proveta com a mesma solução até um nível pré-determinado. Após um tempo de repouso se realiza a leitura com uma régua da altura do material floculado (h_1). Com o auxílio de um pistão padronizado introduzido na proveta, faz-se a leitura da altura do material depositado (h_2). O equivalente de areia (EA) é determinado pela fórmula:

$$\bullet \quad EA = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

Para que o agregado miúdo possa ser utilizado em misturas betuminosas, recomenda-se, de acordo com a norma DNIT ES 031/06, que o equivalente de areia deva ser igual ou superior ou igual a 55 %.

A Tabela 3.5 apresenta os resultados do equivalente de areia para três amostras coletadas do agregado utilizado na pesquisa.

Tabela 3.5 – Resultado do ensaio de Equivalente de Areia

Amostra	Leitura no topo da areia (cm)	Leitura no topo de argila (cm)	Equivalente de areia
1	7,9	10,8	73%
2	8,0	10,8	74%
3	7,9	10,7	74%
Média			74%

3.2.3.3 Determinação do índice de forma

Este método de ensaio determina a variação dos eixos multidirecionais das partículas que compõe os agregados utilizados na fabricação da mistura asfáltica, tendo como resultado o índice de forma.

A recomendação da especificação de serviço DNIT-ES 031/06 é de que o índice de forma seja superior a 0,5, determinado de acordo com o método de ensaio DNER-ME 086/94.

Os resultados apresentam valores entre 0 e 1, quanto mais próximo de 1 os agregados apresentam forma mais aproximada da cúbica, valores abaixo de 0,5 indicam uma maior variação dos eixos e quanto mais próximos de zero as formas dos agregados serão mais alongadas e lamelares.

A Tabela 3.6 apresenta os resultados de índice de forma para os agregados utilizados com granulometrias de 3/4” e 3/8”.

Tabela 3.6 – Resultado do ensaio de Índice de Forma

Graduação	Circular		Peso amostra (g)	Total Inicial (g)	Crivo I			Crivo II		
	Passante	Retido			Abertura (mm)	Retido (g)	% Retida	Abertura (mm)	Retido (g)	% Retida
A	76,0	63,5	3000		38			25,0		
	63,5	50,0	3000		32			21,0		
	50,0	38,0	3000		25			17,0		
	38,0	32,0	3000		19			12,7		
Índice de Forma										
B	32,0	25,0	2000		16			10,5		
	25,0	19,0	2000		12,7			8,5		
	19,0	16,0	2000		9,5			6,3		
Índice de Forma										
C 3/4"	19,0	16,0	2000	2038	9,5	1097,7	53,86	6,3	639,3	31,37
	16,0	12,7	2000	2051,9	8	1022,2	49,82	5,3	706	34,41
	12,7	9,5	2000	2036,5	6,3	909,3	44,65	4,2	809,9	39,77
Índice de Forma										
0,7										
D 3/8"	12,7	9,5	1000	1011,3	6,3	173,3	17,14	4,2	448,2	44,32
	9,5	6,3	1000	1013,2	4,8	303,1	29,92	3,2	384,7	37,97
Índice de Forma										
0,4										

Nesta tabela é possível observar que houve uma variação um pouco acima da recomendada para os agregados com granulometria de 3/8", com um valor de índice de forma abaixo dos 0,5 previstos na especificação.

3.2.3.4 Determinação da absorção e densidade do agregado graúdo

A absorção e a densidade do agregado graúdo foram determinadas de acordo com o método de ensaio DNER-ME 081/98. A Tabela 3.7 mostra os resultados do teste realizado nos agregados graúdos, com granulometrias de 3/4" e 3/8", apresentando conformidade.

Tabela 3.7 – Resultado do ensaio de absorção e da densidade do agregado graúdo

3/4"	Peso Imerso após 24h imerso (PI)	Peso Ar após 24h imerso (PH)	Peso Ar após 24h estufa (PS)	Dreal PS/(PS-PI)	Daparente do Grão PS/(PH-PI)	Absorção $\frac{100(PH-PS)}{PS}$
1	480,11	745,4	733,7	2,893	2,766	1,595
2	486,55	759,8	747,2	2,867	2,734	1,686
			Média =	2,880	2,750	1,640
3/8"						
1	431,33	674,3	660,6	2,881	2,719	2,074
2	427,06	667,2	654,9	2,874	2,727	1,878
			Média =	2,878	2,723	1,976

3.2.3.5 Sanidade de agregados pelo uso de sulfato de sódio

Apresenta-se o resultado da sanidade dos agregados utilizados na Tabela 3.8, determinada através do procedimento de ensaio DAER/RS-EL 104/01 – Sanidade de agregados pelo uso de sulfato de sódio, onde se deseja perda em massa com valor máximo de 12%. Os resultados obtidos estão adequados ao padrão do ensaio.

Tabela 3.8 – Resultado do ensaio de sanidade

Análise granulométrica e cálculos das perdas							
Itens	Tamanho das partículas	Peneiras Nominais Frações ensaiadas	Fator de ponderação (A)	Peso da Amostra (g)			% Parcial = $100 \times (P_o - P_n) / P_o$ (B)
				Inicial (P _o)	Final (P _n)	Perda (P _o - P _n)	
Agregado Graúdo	3/4" (19,1 mm)	1/2" (12,7 mm)	20	750	745,3	4,7	0,63%
	1/2" (12,7 mm)	3/8" (9,52 mm)	15	500	497,1	2,9	0,58%
	3/8" (9,52 mm)	nº 4 (4,76 mm)	38	300	296,4	3,6	1,20%
	3/8" (9,52 mm)	nº 4 (4,76 mm)	38	300	295,9	4,1	1,37%
Perda total média da amostra do agregado graúdo							
Agregado Miúdo	nº 4 (4,76 mm)	nº 8 (2,38 mm)	22	100	96,6	3,4	3,40%
	nº 8 (2,38 mm)	nº 16 (1,19 mm)	19	100	96,9	3,1	3,10%
	nº 16 (1,19 mm)	nº 30 (0,59 mm)	24	100	96,5	3,5	3,50%
	nº 30 (0,59 mm)	nº 50 (0,297 mm)	20	100	96,6	3,4	3,40%
	nº 50 (0,297 mm)	nº 100 (0,149 mm)	10	100	96,1	3,9	3,90%
Perda total média da amostra do agregado miúdo							

3.2.3.6 Agregado graúdo – Adesividade à ligante betuminoso

Este ensaio, descrito pelo Método de Ensaio (ME) DNER ME 078/94 – Agregado graúdo – Adesividade a ligante betuminoso, é realizado com 500g de agregados passantes na peneira 19mm e retidos na peneira 12,7mm, e define que a adesividade que o agregado tem a um ligante betuminoso é a propriedade que este agregado possui de ser aderido por este ligante.

O ensaio avalia o não descolamento da película betuminosa que envolve o agregado quando esta mistura é submetida à ação de água destilada à 40°C durante 72 horas.

Observa-se visualmente o descolamento da película betuminosa após o período do ensaio, o resultado será considerado satisfatório caso não ocorra deslocamento da película betuminosa, e insatisfatório caso haja deslocamento parcial ou total da mesma.

Este ensaio foi executado nas condições de temperaturas de mistura propostas para às misturas mornas e com a adição de zeólitas naturais ao ligante no momento da mistura.

Em qualquer situação o resultado foi considerado satisfatório.

3.2.4 Cal hidratada

Conforme o Anuário Mineral Brasileiro (2006), as reservas de calcário lavráveis no Brasil alcançam 43,7 bilhões de toneladas (incluindo as reservas de calcita, calcita ótica e conchas calcárias), distribuídas pelos estados brasileiros.

A participação no total das reservas de cada estado brasileiro com possibilidade de extração pode ser observada na Tabela 3.9.

De acordo com levantamento realizado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), constante do Universo da Mineração Brasileira (NEVES e DA SILVA, 2007), existem em torno de 74 empresas (com diferente razão social), que operam minas de calcário classificadas como grandes ou médias.

A Tabela 3.10 apresenta as principais empresas que mineram calcário no Brasil, no ano de 2005, conforme o Anuário Mineral Brasileiro (2006) e sua participação no total do valor comercializado.

Como a pesquisa procurou, sempre que possível, usar materiais existentes na região, a cal hidráulica utilizada foi proveniente da empresa Dagoberto Barcellos, localizada na cidade de Caçapava do Sul/RS, uma das principais mineradoras do Brasil conforme se observa na Tabela 3.10.

Tabela 3.9 – Reservas lavráveis de Calcário nos estados brasileiros em 2006
 Fonte: Anuário Mineral Brasileiro 2006 (DNPM 2006)

Estado	Reservas (milhões de toneladas)	Participação
Minas Gerais	9.824	22,5%
Mato Grosso do Sul	7.522	17,2%
Paraná	4.681	10,7%
Mato Grosso	3.542	8,1%
São Paulo	3.116	7,1%
Goiás	2.159	4,9%
Bahia	2.095	4,8%
Ceará	2.021	4,6%
Rio de Janeiro	2.019	4,6%
Rio Grande do Norte	1.930	4,4%
Paraíba	1.403	3,2%
Espírito Santo	756	1,7%
Sergipe	655	1,5%
Pará	554	1,3%
Pernambuco	343	0,8%
Maranhão	299	0,7%
Rio Grande do Sul	279	0,6%
Piauí	136	0,3%
Distrito Federal	118	0,3%
Tocantins	104	0,2%
Amazonas	64	0,1%
Alagoas	52	0,1%
Santa Catarina	34	0,1%

Tabela 3.10 – Principais empresas produtoras de Calcário no Brasil, em 2005
 Fonte: Anuário Mineral Brasileiro 2006 (DNPM 2006)

Empresa	Estados onde opera	Participação
Cimento Rio Branco SA	PR, RJ, RS, SC, SP	7,6%
CBE – Companhia Brasileira de Equipamento	CE, ES, MA, PA, PE, RN,	5,7%
CIPLAN Cimento Planalto SA	DF	5,3%
Companhia Cimento Portland Itaú	GO, MG, MS, RJ, SP	3,7%
Companhia Siderúrgica Nacional	MG	2,9%
Holcim (Brasil) SA	MG, PR, RJ	2,5%
Mineração Belocal Ltda.	MG	2,2%
Dagoberto Barcellos SA	RS	2,1%
Companhia Mineradora Geral	SP	2,0%
Britacal Ind. & Com. De Brita e Calcário Brasília Ltda.	GO, MG	1,7%

As características mais importantes do calcário são os teores de cálcio e magnésio, expressos respectivamente em percentagens de CaO (óxido de cálcio) e MgO (óxido de magnésio).

O calcário é classificado em calcítico ou dolomítico quando apresenta menor ou maior teor de óxido de magnésio (%MgO), o calcário dolomítico geralmente apresenta teor acima de 12% de MgO.

A cal hidráulica utilizada é fabricada a partir de calcário dolomítico, como pode ser observado na caracterização do material mostrada na Figura 3.17, ou seja, com grande teor de MgO, sendo obtida pela adição de cinzas minerais à Cal Hidratada, podendo ser usada imediatamente com maior segurança aos operadores.

O material foi fornecido pela empresa Coesul e veio acondicionado em sacos com 20kg como mostrado na Figura 3.18.

Registro do Produto Cal Hidráulica Primor			
EXIGÊNCIAS QUÍMICAS	REQUISITOS	LIMITES	ANÁLISE
	Densidade	_____	581,89 g/l
	Perda ao Fogo	_____	15,95%
	Resíduo Insolúvel	_____	39,90%
	CO ₂ (Anidrido Carbônico)	_____	1,70%
	Óxidos Totais	_____	60,32%
	Ox. ã hidratado	_____	8,83%
	CaO	_____	30,54%
	MgO	_____	20,16%

EXIGÊNCIAS FÍSICAS	FINURA (%retida acumulada)		
	ABERTURA	LIMITES	ANÁLISE
	Peneira 0,600 mm	≤ 0,5%	0,00%
	Peneira 0,075 mm	≤ 15%	5,57%

*Análises químicas e físicas realizadas de acordo com os métodos determinados pelo Sistema da Qualidade.

Figura 3.17 – Caracterização da cal hidráulica
Fonte: Dagoberto Barcellos S.A.



Figura 3.18 – Sacos da cal utilizada na pesquisa

3.2.5 Subleito argiloso existente

A pista de testes 2 foi construída desde a camada de base, sendo executada sobre o subleito argiloso existente na área de teste de pavimentos do LAPAV/UFRGS. Gonçalves (2002) descreveu em sua tese de doutorado, como podemos observar na Tabela 3.11, as propriedades do solo argiloso existente e utilizado como reforço do subleito neste experimento.

A pista de testes 1 foi construída sobre uma pista pré-existente com estrutura detalhada no capítulo 5, porém esta pista também teve sua estrutura construída sobre o mesmo subleito argiloso da pista 2.

Tabela 3.11 - Propriedades do solo argiloso existente

Propriedade	Valor
Fração argilosa	24%
Limite de liquidez	42%
Limite de plasticidade	26%
Índice de plasticidade	16%
Densidade real dos grãos	2,85
Teor ótimo de umidade	22,70%
Peso específico aparente seco máximo	16,3 kN/m ³
Classificação MCT	LG ¹
Classificação USC	CL
Classificação HRB	A-7-6
Índice de Suporte Califórnia máximo	15%
Índice de Suporte Califórnia mínimo	10%
Expansão	0,19%
n (na umidade ótima) modelo $M_R=K\sigma_d^n$	2700
K (na umidade ótima) modelo $M_R=K\sigma_d^n$	-0,56
Módulo de resiliência (retroanálise FWD)	230 MPa
Teor ótimo de umidade	8,70%
Densidade aparente	2,362
% que passa na peneira nº 200	4,30%
Equivalente de areia	>50%
Índice de lamelaridade	<40%
Absorção	1,20%
Diâmetro máximo	3/4"

3.3 ESTUDOS MISTURA MORNA EM LABORATÓRIO

Para estudos laboratoriais das misturas mornas foram realizados os seguintes ensaios tecnológicos, cujos resultados serão apresentados no capítulo IV, denominado de APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ESTUDOS DE LABORATÓRIO DAS MISTURAS MORNAS COM ADIÇÃO DE ZEÓLITAS NATURAIS.

3.3.1 Determinação da massa específica

A massa específica das misturas foi determinada através da norma brasileira (NBR) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ABNT/NBR 15619:2012 - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas que tem por origem o ensaio AASHTO T 209-99 – Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures (Rice Test), que permite encontrar a massa específica da mistura de agregados e ligante utilizando vácuo com maior precisão, em equipamento existente no LAPAV/UFRGS.

Esta Norma estabelece o método para determinação em laboratório da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica de misturas asfálticas não compactadas. Este ensaio pode ser aplicado por ocasião do projeto de dosagem das misturas asfálticas ou para a avaliação e controle das misturas asfálticas que estão sendo produzidas em usina ou laboratório.

3.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio segue as especificações da Norma ABNT/NBR 15087:2012, onde descreve o método para determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos de misturas asfálticas, moldados em laboratório ou extraídos de pavimentos com revestimentos asfálticos.

É usado para a determinação da deformabilidade das misturas asfálticas e consiste na aplicação de um carregamento em amostras cilíndricas, o resultado é uma tensão de tração considerada uniforme no plano que é perpendicular ao de aplicação da carga.

3.3.3 Dano por umidade induzida

Ensaio normalizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da Norma Brasileira ABNT NBR 15617:2011 - Misturas asfálticas - Resistência do dano por umidade induzida, possuindo origem no método Lottman Modificado (AASHTO T 283-89) da American Association of State Highway and Transportation Officials.

Tem por objetivo simular os danos e perda de resistência que tem como causa a umidade nos pavimentos, ou seja, a suscetibilidade das misturas asfálticas ao dano por umidade, particularmente na avaliação e previsão da resistência da combinação dos agregados com o ligante e aditivo, avaliando a adesividade das misturas asfálticas.

O ensaio é realizado em corpos de prova cilíndricos moldados conforme as metodologias Marshall ou Superpave, com índice de vazios de $7 \pm 1\%$, onde as amostras são analisadas pela resistência a tração de corpos de prova, uns condicionados e outros sem condicionamento.

Segundo Ceratti e Reis (2011), os corpos de prova submetidos a condicionamento simulam as tensões internas induzidas pelas cargas do tráfego quando ocorre presença de água na mistura.

A relação dada pelo quociente da resistência à tração (R_{tC}) das amostras condicionadas pela resistência à tração (R_{tNC}) das amostras não condicionadas é chamada de Resistência Retida à Tração (RRt), onde o valor mínimo desejável nesta relação é igual a 0,7.

Os ensaios foram realizados no LAPAV/UFRGS, seguindo os procedimentos de moldagem de corpos-de-prova e ensaios de Resistência à tração por compressão diametral, sendo considerado de fundamental importância no estudo das misturas mornas e decisivo na avaliação das respostas encontradas.

Desta forma é de relevante importância os ensaios de dano por umidade induzida e adesividade agregado-ligante no estudo das misturas mornas.

A tecnologia de mistura morna com adição de zeólitas, para ser eficiente, deve reduzir a temperatura de fabricação da mistura, na prática isto significa a redução da temperatura dos agregados uma vez que estes, em média, representam 95% da mesma.

O ligante, mesmo estando em uma temperatura usual de 155°C irá reduzir a sua temperatura ao entrar em contato com os agregados que estão em temperatura inferior.

Um grande problema das misturas asfálticas é a deficiência de adesividade causadas pela ação deletéria da água, por isso existe a necessidade de que os agregados estejam secos e este procedimento ocorre no tambor secador.

Uma vez que no tambor secador a temperatura deverá estar inferior a usual pode não ocorrer uma secagem suficiente dos agregados porém esta situação poderá ser melhorada com a cobertura dos agregados e a sua proteção contra chuvas e umidade.

Porém a utilização de um aditivo, no caso a zeólita, que libera água no seu procedimento de espumação também pode agravar esta propriedade, sendo esta a maior crítica dos fabricantes de outras tecnologias que não utilizam água para produzirem suas misturas mornas.

Desta forma se torna muito importante a determinação do dano por umidade induzida e de adesividade agregado-ligante para verificar, se após a tecnologia de produção de mistura morna pelo processo de espumação, a mistura tem as condições exigidas por norma nestes quesitos e para não comprometer a tecnologia.

3.3.4 Módulo de resiliência

O Módulo de Resiliência (MR) de misturas betuminosas é definido como a relação entre a tensão de tração (σ_t), aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a deformação específica recuperável (ε_t) correspondente à tensão aplicada, em uma dada temperatura (T), conforme descreve a equação a seguir:

$$MR = \left(\frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \right)_T$$

O ensaio de MR, que possui procedimentos especificados pelo Método de Ensaio DNER ME 133/94 – Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência e Norma ABNT NBR 16018:2011 - Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida, que descreve procedimentos para o ensaio por compressão diametral de corpos de prova de misturas asfálticas moldados em laboratório ou obtidos em campo,

visando à determinação do módulo de resiliência, do módulo de carregamento e, opcionalmente, do coeficiente de Poisson. Estes parâmetros são úteis para a caracterização da deformabilidade das misturas asfálticas.

O ensaio consiste na aplicação de pulsos de carga semi-senoidais com duração de 0,1s e um repouso de 0,9s, resultado de uma aplicação de carga com frequência de 60 ciclos por minuto cuja duração de cada carga tem o tempo de 0,1s.

3.3.5 Fadiga

A resistência à fadiga de misturas asfálticas pode ser considerada como a sua capacidade de responder à repetição de cargas de tráfego, sem que haja fissuração significativa ou dano prematuro na camada de revestimento do pavimento sob determinadas condições ambientais.

De acordo com Cavalcanti et al (2013), o ensaio de fadiga de quatro pontos, também conhecido por ensaio 4BP, vem sendo muito utilizado na engenharia de materiais para a previsão da vida de fadiga pela garantia que o material trabalhe apenas a flexão, sem que haja influência de esforços normais ou cortantes. Ele é realizado de maneira que permita que no centro da viga exista momento constante máximo ou mínimo (quando for invertido o sentido da força) e inexistência de cortante, ou seja, na condição de flexão pura e, desta forma, que se garanta que as trincas não ocorrerão devido ao cisalhamento, conforme mostrado Figura 3.19:

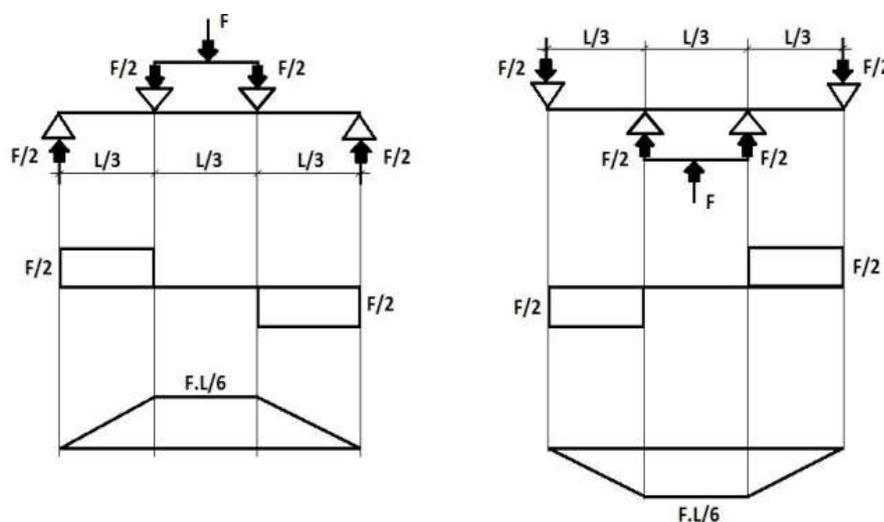


Figura 3.19 – Diagrama de esforços da viga
Fonte: Cavalcanti et al (2013)

Ainda conforme Cavalcanti et al (2013) os momentos máximo e mínimo ocorrem devido à inversão do sentido da força no ensaio, o que gera tração das fibras inferiores e superiores da viga em momentos diferentes mas de mesma duração e este tempo total equivale a um ciclo.

O ensaio de fadiga de 4 pontos para misturas asfálticas, ou 4BP, é descrito pelas normas AASHTO T321-07 e ASTM D 7460-08 e definem o parâmetro de rigidez à flexão da viga como a relação entre a tensão máxima de tração e a deformação máxima da viga,

Adhikari e You (2010) apud Cavalcanti et al (2013), diz que a rigidez é o parâmetro para se definir a condição de fadiga da viga onde a norma da AASHTO define o fim do ensaio quando a rigidez da viga alcança 50% da rigidez inicial e a norma da ASTM recomenda 40%. Esta redução de rigidez ocorre devido às microfissuras que evoluem durante a aplicação de ciclos de cargas.

As normas estabelecem para o ensaio frequência de 5Hz a 10Hz e temperatura de 20°C, porém os equipamentos permitem que estes dados sejam modificados, proporcionando uma análise mais profunda dos materiais e avaliações em situações diferentes de tráfego e clima.

Existem vários modelos para previsão da vida de fadiga de misturas asfálticas, mas os mais comuns se baseiam na deformação ou na tensão.

Para a execução do ensaio de fadiga de 4 pontos são utilizadas vigotas de misturas asfálticas que tanto podem ser moldadas em laboratório como extraídas de pistas de rolamento. Esta vigotas devem possuir comprimento de $380\text{mm} \pm 6\text{mm}$, largura de $63\text{mm} \pm 6\text{mm}$ e altura de $50\text{mm} \pm 6\text{mm}$.

A temperatura para a realização o ensaio conforme a norma é de $20^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$, porém orientase a condicionar os corpos de prova no mínimo por 2 horas para que não haja influência da temperatura.

3.4 PRODUÇÃO DA MISTURA MORNA EM LABORATÓRIO

Para análise das misturas serão produzidos corpos-de-prova no LAPAV/UFRGS para posterior realização de ensaios seguindo os passos descritos a seguir:

- a) A mistura dos agregados será preparada e pesada de acordo com o projeto desejado, logo em seguida colocado em uma bandeja metálica, pesada e levada à estufa para que atingisse a temperatura de produção idealizada para o projeto, que poderia ser 110°, 120° ou 130°.
- b) O CAP é colocado em estufa para atingir a temperatura de 155°C como mostra a figura 3.3.
- c) O teor de 0,3% de zeólita natural é pesado em uma balança de precisão e separado para a adição quando da fabricação dos corpos de prova.

O mesmo procedimento será feito quando da produção dos corpos-de-prova com 2% de cal hidratada.

- d) Com todos os materiais, é realizada a mistura em um vasilhame metálico, conforme se pode observar na Figura 3.20 e Figura 3.21, adicionando-se a zeólita (na temperatura ambiente) e o CAP (na temperatura de 155°C), simultaneamente, aos agregados, aquecidos às temperatura de 110°C, 120°C ou 130°C, dependendo do caso em estudo e, dessa forma, produzindo a mistura morna manualmente.



Figura 3.20 - Adição de CAP e zeólitas naturais aos agregados para a fabricação da mistura morna



Figura 3.21 - Produção da mistura morna manualmente

- e) As misturas produzidas são colocadas dentro de moldes Marshall pré-aquecidos de corpos de prova na temperatura de projeto da mistura e aguardavam que fosse atingida a temperatura de compactação através do controle por termômetro analógico ou digital (Figura 3.22).



Figura 3.22 - Mistura morna aguardando temperatura de compactação dentro de molde de corpos-de-prova

- f) Quando atingida a temperatura de compactação os moldes dos corpos-de-prova com as misturas mornas em seu interior serão levadas para compactação em um soquete Marshall mecânico.

3.5 TESTES ACELERADOS NO SIMULADOR DE TRÁFEGO DAER/UFRGS

O Simulador de Tráfego DAER/UFRGS, mostrado na Figura 3.23, foi construído entre os anos de 1992 e 1994 pelo DAER/RS, tendo sido projetado pelo Grupo de Projeto Mecânico e Automação Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS com inspiração em um equipamento de origem australiana chamado Accelerated Loading Facility.



Figura 3.23 - Simulador de Tráfego DAER/UFRGS

Conforme lembra Azambuja (2004), os ensaios acelerados são ferramentas que possuem eficácia na análise e previsão do desempenho de pavimentos, porém a velocidade do carregamento dinâmico da maioria dos simuladores, no qual está incluído o Simulador de Tráfego do DAER/UFRGS utilizado nesta pesquisa, é menor do que a velocidade real do tráfego sobre os pavimentos em geral.

O Simulador de Tráfego do DAER/UFRGS apresenta as seguintes características:

- Comprimento de aceleração e desaceleração de 3m
- Comprimento de atuação da carga no pavimento de 8m
- Carga sobre o pavimento regulável de 0 a 65kN
- Sistema de rodado simples ou duplo, regulável e articulável
- Velocidade de deslocamento de 6 km/h
- Aplicação de carga por princípio hidráulico, em um único sentido de forma linear e não tracionada
- Funcionamento por energia elétrica
- Painel de controle com contador digital do número de ciclos de carga
- Ciclos de carga entre 16 e 18 segundos (200 a 225 ciclos por hora de atividade)

Com a utilização do simulador de tráfego se pode acelerar os danos que iriam ocorrer em um anos de utilização de um pavimento em pouco tempo de operação, na Tabela 3.12 Núñez (1997) mostrou o tempo de operação do simulador para simular 10^6 ciclos por carga aplicada.

Na pesquisa, o simulador somente estará em operação caso a temperatura da pista esteja abaixo de 30°C para não ocorrerem problemas de deformações permanentes causadas ao pavimento pela ação repetitiva de carga com calor elevado.

Tabela 3.12 - Tempo de operação do simulador para simular 10^6 ciclos por carga
Fonte: Núñez (1997)

Tempo para aplicação de 10^6 ciclos	Carga de eixo aplicada pelo simulador (kN)		
	82	100	130
Em horas	4444	1259	253
Em dias	400	113	23

3.5.1 Resposta estrutural – Medida das deflexões

Para análise da resposta estrutural dos pavimentos foi utilizado o controle através de medidas com viga eletrônica e viga benkelman, ambas da marca Solotest, no topo das camadas.

Na pista 1 este controle foi feito somente no topo da camada de revestimento com a mistura morna e na pista 2 em todas as camadas de construção, primeiro na camada de subleito, depois na camada de base (Figura 3.24) e por último na camada de revestimento, onde o acompanhamento foi prolongado por todo período do teste.



Figura 3.24 - Pista 2 – Controle estrutural da base através da viga Benkelman na base

De acordo com Bernucci et al (2008) a viga Benkelman é um equipamento simples que precisa de um caminhão com eixo traseiro simples de roda dupla carregado com 8,2t, com finalidade de aplicar a carga sob a qual será medida a deformação elástica conforme método de ensaio (ME) do extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) e atual Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre pela norma (DNIT) DNER-ME 24/94.

Para obtenção das bacias de deflexão foi utilizado o procedimento de ensaio com utilização de viga eletrônica até 3m do ponto inicial de aplicação da carga, atingindo-se maior precisão do que se o trabalho fosse realizado com a viga Benkelman convencional.

Como explica Ferreira (2007), as deflexões que ocorrem em um pavimento asfáltico, no mesmo ponto, sofrem variações conforme a temperatura do pavimento no momento em que se realiza a leitura, uma vez que a elasticidade de um revestimento asfáltico é diretamente influenciada pela temperatura. Assim, se convertem as deflexões obtidas em diferentes temperaturas (D_t) para uma deflexão equivalente à temperatura padrão de 20°C ($D_{20°C}$), para eliminar a influência da temperatura, através da fórmula:

$$D_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{D_t}{[10^{-3} \cdot e \cdot (t - 20^{\circ}\text{C})] + 1}$$

Onde:

- D_t = Deflexão recuperável medida na temperatura "t" em centésimos de milímetro (mm.10⁻²);
- t = Temperatura em °C medida no interior da camada de pavimento asfáltica;
- $D_{20^{\circ}\text{C}}$ = Deflexão corrigida para a temperatura de 20°C;
- e = Espessura da camada asfáltica em centímetros;

Sobre Raio de curvatura, Ferreira (2007) complementa:

A linha elástica da deformação, especialmente abaixo do ponto inicial de aplicação da carga, apresenta o principal e mais importante grau de curvatura (curvatura máxima) que se pode avaliar na análise da deflexão.

Analisando os diversos procedimentos para determinar o grau de curvatura máximo da deformada, o que se apresenta mais simples e expedito para esse fim conforme comprovações experimentais, é a verificação de que a linha de deflexão se aproxima muito a forma de uma parábola até uma distância um pouco maior que 0,25 metros para ambos os lados do eixo de aplicação da carga, iniciando a partir daí as inflexões para assumir uma tendência assintótica com a horizontal.

A curvatura da parábola fica então definida por seu parâmetro que na zona de curvatura máxima se confunde praticamente com o raio do círculo osculador nesse setor.

Considerando uma deflexão auxiliar a 0,25 metros do ponto de aplicação da carga, se identifica a zona de maior curvatura da deformada cujo raio de curvatura, que se confunde com o raio do círculo osculador, pode ser calculado pela fórmula (FERREIRA, 2007, pg.14):

$$R = \frac{10 \cdot (25)^2}{2 \cdot (D_0 - D_{25})} = \frac{6250}{2 \cdot (D_0 - D_{25})}$$

Onde:

- R = Raio de Curvatura em metros;
- D_0 = Deflexão recuperável no eixo vertical de carga, em centésimos de milímetro (mm.10⁻²)
- D_{25} = Deflexão recuperável a 25 centímetros do eixo vertical de carga, em centésimos de milímetro (mm.10⁻²)
- 10 = Coeficiente por troca de unidade.

Na análise dos raios de curvatura, Ferreira (2007) relata que é importante se entender seu valor associado ao valor da deflexão correspondente, assim podendo se estabelecer conclusões sobre as camadas do pavimento que está sendo analisado, com critérios aproximados aos seguintes casos:

- Baixas deflexões e grandes raios de curvatura - Pavimento em bom estado, tanto as camadas superiores como as inferiores estarão correspondendo às expectativas de qualidade se a deflexão superficial está atendendo o valor máximo admissível.
- Baixas deflexões e pequenos raios de curvatura - Provavelmente a camada superior estará com qualidade deficiente - granulometria, grau de compactação, CBR, etc.). Em princípio o problema não se concentra nas camadas inferiores porque as deflexões são baixas mas o caso requer uma investigação mais cuidadosa.
- Altas deflexões e grandes raios de curvatura - Em princípio o caso significa grandes deflexões no subleito que é onde deve estar concentrado o problema de falta de qualidade de materiais ou umidade excessiva, independentemente da qualidade dos materiais das camadas superiores que podem ter qualidade satisfatória ou não.
- Altas deflexões e pequenos raios de curvatura - Pavimento totalmente condenável, não cumprirá com as condições de qualidade tanto nas capas superiores como inferiores, está construído com materiais inadequados e/ou as camadas foram deficientemente compactadas, e/ou as condições de drenagem são insatisfatórias. (FERREIRA, 2007, pg.15):

Ainda conforme Ferreira (2007), como valor de referência, podem-se considerar recomendáveis para revestimentos asfálticos raios de curvatura com valores superiores a 100m e deflexão máxima igual a 71×10^{-2} mm.

3.5.2 Defeitos de superfície - Afundamentos

Os pavimentos, sob a ação do tráfego e expostos à intempéries, se deterioram com o passar do tempo.

Dependendo das suas características técnicas, tipo e condições a que estão expostos o pavimento irá mostrar defeitos em um tempo que poderá ser maior ou menor, sendo que o mecanismo responsável pela deformação permanente conhecida como afundamento por trilho de rodas (ATR) está associado a um grande número de repetições de carga (DNIT, 2005).

Ou seja, as repetições de carga proporcionadas pelo simulador de tráfego da UFRGS causam um dano ao pavimento do tipo ATR que causam uma modificação e irregularidades no perfil longitudinal do pavimento.

A evolução e acompanhamento dos ATR durante os períodos de observação das pistas experimentais foi determinado através de medições feitas com um transverso-perfilógrafo (Figura 3.25) na seção transversal de controle (seção 5).

Este equipamento é de propriedade da UFRGS e está disponível no LAPAV, os resultados são apontado em uma folha de papel milimetrado que registra dados altimétricos (cotas) em verdadeira grandeza (escala 1:1) e distância percorrida em escala reduzida (1:10), neste sentido uma distância percorrida na seção transversal de 3m (300 cm) é registrada em 30cm no rolo de papel.



Figura 3.25–Aplicação do perfilógrafo na seção transversal
Fonte: Rohde (2007)

3.5.3 Defeitos de superfície - Trincamentos

Conforme relata Specht (2004), o fenômeno do trincamento vem sendo muito estudado, devido a importância que possui para o desempenho dos pavimentos. Em pavimentos novos, as trincas normalmente ocorrem em consequência da retração térmica ou da fadiga da camada do revestimento asfáltico.

A verificação das trincas nas pistas de testes acelerados desta pesquisa foi feita através de inspeções visuais de aparecimento e evolução.

Na pista de testes 1 e pista de testes 2 (no lado esquerdo), não foram observados o aparecimento de trincas durante o experimento.

Na pista de testes 2 (no lado direito), foram verificados o aparecimento de poucas trincas logo após a execução do pavimento, de pequenos tamanhos e próximas a borda. Estas trincas forma pintadas e acompanhadas mostrando que não evoluíram durante o teste. Não foi observado o aparecimento de outras trincas e a evolução das trincas registradas e sinalizadas ao longo do carregamento.

A Figura 3.26 apresenta algumas trincas que ocorreram logo após a execução da pista.



Figura 3.26 - Pista 2 (LD) – Controle visual de trincas no C.A.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ESTUDOS DE LABORATÓRIO DAS MISTURAS MORNAS COM ADIÇÃO DE ZEÓLITAS NATURAIS

Para estudos e tomada de decisão quanto ao projeto da massa asfáltica morna que seria produzida em usina de asfalto e utilizada nas pistas experimentais foram realizados ensaios tecnológicos com diferentes temperaturas de usinagem e compactação, com e sem cal em diferentes projetos de misturas.

A seguir serão apresentados e analisados os projetos de misturas estudados e o resultado de ensaios tecnológicos produzidos em laboratório e também de amostras retiradas das pistas experimentais.

4.1 PROJETOS DAS MISTURAS MORNAS

Nos estudos foram elaborados dois projetos de mistura asfáltica morna, com base na tecnologia Marshall, para determinação do teor de ligante e enquadrado dentro da composição granulométrica Faixa C DNIT 031/2006-ES.

O primeiro traço, utilizado na pista de testes 1, utilizado possuía uma granulometria mais graúda, uma massa asfáltica com maior percentual de agregados graúdos, porém resultados que indicaram uma baixa resistência à tração e que, aliado a resultados de danos por umidade induzida também não convincente, nos levaram a elaborar um novo traço e novas condições para a segunda pista de testes.

O principal objetivo foi o de se chegar a uma massa asfáltica morna que atendesse a parâmetros técnicos com padrões similares aos de concretos asfálticos convencionais.

Analisando os procedimentos e resultados que ocorreram durante o primeiro teste, se pensou que um novo projeto de mistura morna com uma composição granulométrica, com maiores teores de agregados miúdos e assim com uma composição granulométrica um pouco mais fina, mais ainda dentro da Faixa C – DNIT pudesse proporcionar um melhor entrosamento entre as partículas.

Junto a esta providência, se imaginou que um aumento nas temperaturas de produção e compactação, que já haviam se mostrado eficiente no primeiro teste, poderiam melhorar os resultados de resistência à tração, módulo de resiliência e dano por umidade induzida.

Também foi observado no primeiro teste, que a introdução da cal hidratada não trouxe vantagens significativas ao processo, apesar de que foi interessante o seu estudo e resultados obtidos no monitoramento da pista 1, porém se resolveu que a mesma não iria ser utilizada no segundo teste, que leva a um item a menos de controle gerando maior simplicidade na produção da mistura morna.

Assim, como já comentado, optou-se por um projeto também enquadrado na Faixa C - DNIT, porém com composição granulométrica mais fina e sem cal, como será mostrado a seguir, para utilização na pista de testes 2.

Na fabricação das misturas mornas foi adicionado um teor de 0,3% de zeólitas naturais em peso à massa asfáltica com base na revisão bibliográfica, onde os métodos que utilizam zeólitas sugerem a adoção deste percentual.

Também foi estudada a adição de 2% de cal hidratada junto com o percentual de 0,3% de zeólitas naturais, em algumas misturas.

Para a produção e compactação das misturas mornas foram estudadas as temperaturas apresentadas na Tabela 4.1, também com base na revisão bibliográfica, que sugere que esta é a faixa onde se concentram a produção das diversas tecnologias de misturas mornas existentes.

Tabela 4.1 - Temperaturas de estudo do asfalto morno

Produção	Compactação	Teste
110 °C	85°C	1°
120 °C	95°C	1°
130 °C	105°C	2°

Em todas as misturas mornas produzidas a temperatura do CAP foi mantida em 155°C, o que variava era a temperatura dos agregados.

4.1.1 Projeto da Mistura Morna 1

A composição granulométrica do projeto da mistura asfáltica morna utilizado para testes laboratoriais e execução da pista experimental 1 está mostrado na Tabela 4.2 a seguir:

Tabela 4.2 – Composição granulométrica do projeto de mistura 1

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA									PROJETO	CR18/2009		DATA:	12/09/2009		
									TRECHO	PISTA EXPERIMENTAL 1 - LAPAV/UFRGS					
									MATERIAL	AGREGADOS (UNIDADE DE BRITAGEM COESUL)					
									MISTURA	ESPECIFICAÇÃO (FAIXA "C" DNIT 031/2006-ES)					
PENEIRAS	PORCENTAGEM				PASSANDO				PROJETO	LIMITES		FAIXA DE TRAB.		TOLERÂNCIA	
	BRITA 3/4"	BRITA 3/8"	PÓ DE PEDRA	AREIA	BRITA 3/4"	BRITA 3/8"	PÓ DE PEDRA	AREIA							
	GRAN	20%	GRAN	20%	GRAN	60%	GRAN	0%							
3/4"	100,00	20,00	100,00	20,00	100,00	60,00	100,00	0,00	100,00	100	100	100,0	100,0		
1/2"	56,10	11,22	100,00	20,00	100,00	60,00	100,00	0,00	91,22	80	100	84,2	98,2	-7	7
3/8"	25,08	5,02	98,20	19,64	100,00	60,00	100,00	0,00	84,66	70	90	77,7	91,7	-7	7
4	1,20	0,24	4,10	0,82	87,40	52,44	100,00	0,00	53,50	44	72	48,5	58,5	-5	5
10	0,70	0,14	0,82	0,16	54,80	32,88	99,00	0,00	33,18	22	50	28,2	38,2	-5	5
40	0,20	0,04	0,27	0,05	26,21	15,73	71,61	0,00	15,82	8	26	10,8	20,8	-5	5
80	0,10	0,02	0,13	0,03	19,23	11,54	8,62	0,00	11,58	4	16	8,6	14,6	-3	3
200	0,00	0,00	0,00	0,00	11,24	6,74	2,14	0,00	6,74	2	10	4,7	8,7	-2	2

A curva granulométrica do projeto de mistura 1, enquadrado na Faixa C DNIT, está representado na Figura 4.1.

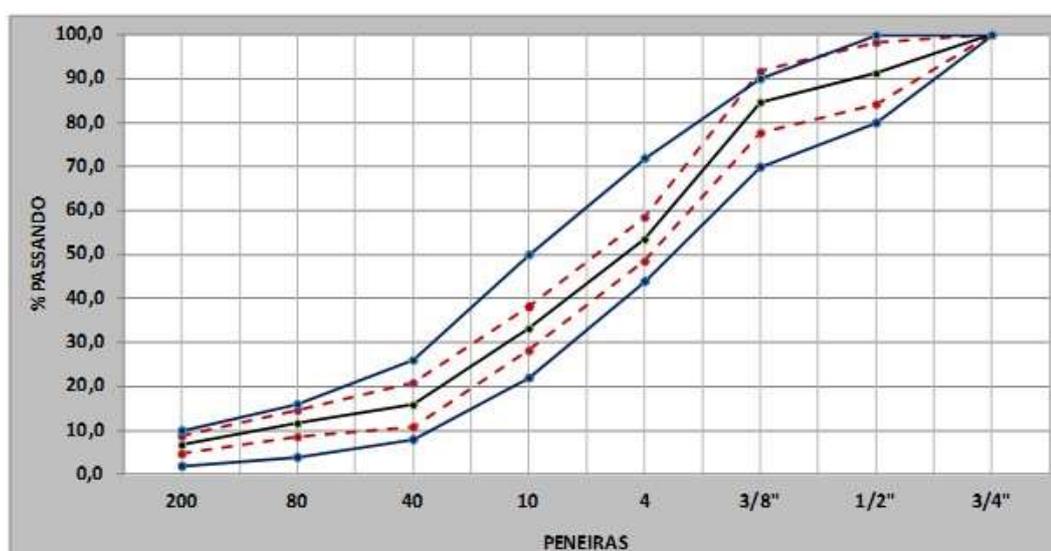


Figura 4.1 -Faixa granulométrica do projeto de mistura 1

O projeto foi desenvolvido seguindo o método "MARSHALL" para misturas betuminosas, visando estabelecer um traço ideal que atenda as especificações e normas técnicas do DNIT ES-031/2006 – FAIXA "C" para concreto betuminoso usinado a quente conforme detalhamento a seguir.

Na composição da mistura foram utilizados os materiais mostrados na Tabela 4.3 as massas específicas destes materiais estão apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.3 – Materiais usados no projeto de mistura 1

MATERIAL	PROCEDÊNCIA
BRITA (3/4")	BRITAGEM COESUL- BR 386 KM 392 -TRIUNFO / RS
BRITA (1/2")	BRITAGEM COESUL- BR 386 KM 392 -TRIUNFO / RS
PÓ DE PEDRA	BRITAGEM COESUL- BR 386 KM 392 -TRIUNFO / RS
ZEÓLITA WATERCEL ZE 325	MINA EM SAINT ANDREAS - CUBA
CAL HIDRÁULICA	BRITAGEM DAGOBERTO BARCELLOS - CAÇAPAVA DO SUL / RS
CAP 50-70	REFAP - CANOAS / RS
DOPE (20KG)	BETUDOP IPIRANGA

OBS.: ADIÇÃO DE UM BALDE DE DOPE 20 KG PARA CADA 25000 KG DE CAP

Tabela 4.4 – Massa específica dos materiais usados no projeto de mistura 1

MATERIAL	Massa específica aparente kg/dm ³	Massa específica real kg/dm ³
BRITA 3/4"	2,767	2,840
BRITA 1/2"	2,753	2,844
PÓ DE PEDRA		2,859
ZEÓLITA WATERCEL ZE 325		0,980
CAL HIDRÁULICA		0,582
CAP 50 - 70		1,007
OBSERVAÇÃO	ABSORÇÃO MÉDIA DOS AGREGADOS = 0,94 %	

A massa específica média da mistura 1 foi determinada através do ensaio da norma ABNT/NBR 15619:2012 - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas e AASHTO T 209-99 – Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures (Rice Test), que permite encontrar a massa específica da mistura de agregados e ligante utilizando vácuo com maior precisão, o resultado para a densidade da mistura está mostrado na Tabela 4.5

Tabela 4.5 – Massa específica - Projeto de mistura 1

MASSA ESPECÍFICA (kg/dm ³)	2,535
--	-------

A Figura 4.2 apresenta os gráficos obtidos a partir dos resultados do ensaio Marshall.

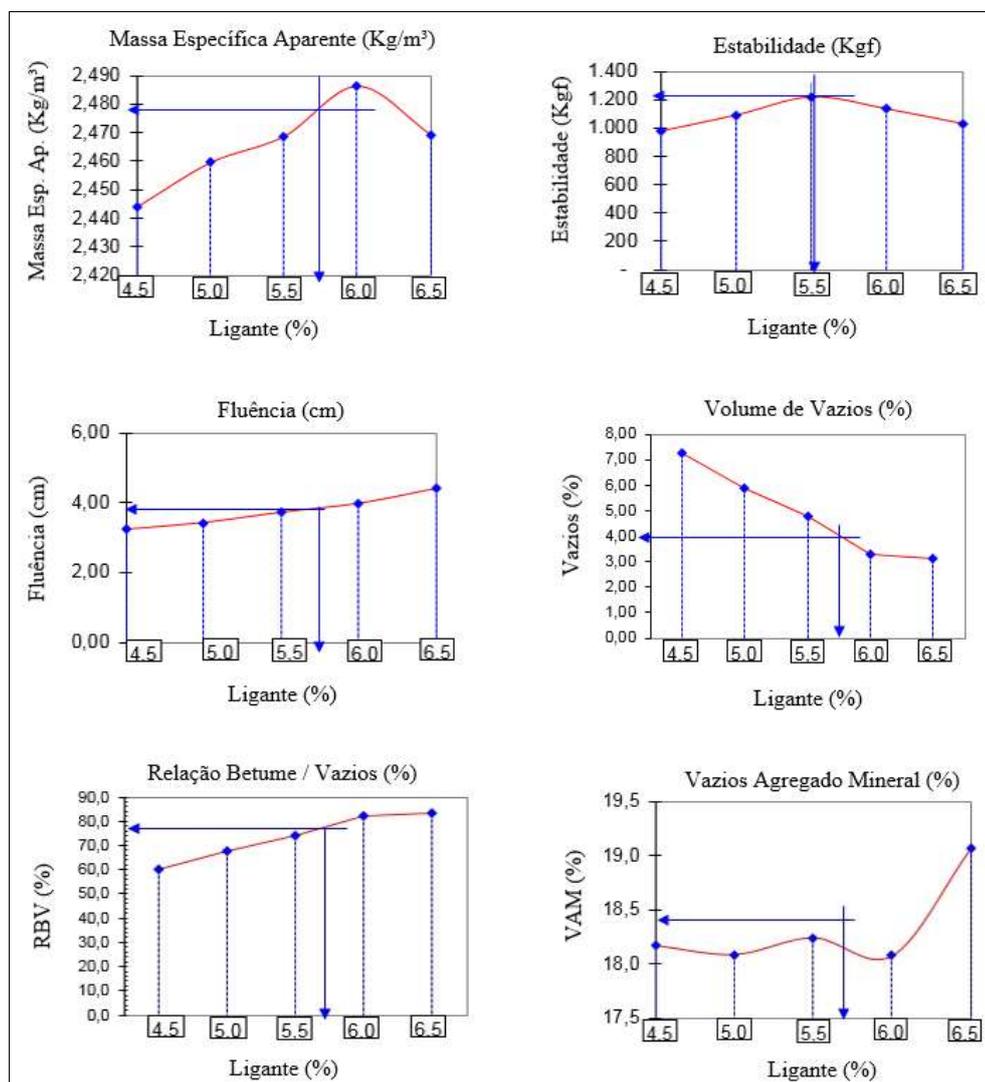


Figura 4.2 - Determinação gráfica do projeto de mistura 1

O traço de projeto da mistura morna 1, após determinação gráfica (Figura 4.2), está mostrado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Projeto de mistura 1

COM CAL	
MATERIAL	%
BRITA 3/4"	18,86%
BRTA 1/2"	18,86%
PÓ DE PEDRA	54,55%
CAL	2,00%
ZEÓLITA	0,3%
CAP 50- 70	5,70%
TOTAL	100,00%

SEM CAL	
MATERIAL	%
BRTA 3/4"	18,86%
BRTA 1/2"	18,86%
PÓ DE PEDRA	56,55%
ZEÓLITA	0,3%
CAP 50- 70	5,70%
TOTAL	100,00%

A utilização de cal na mistura foi pensada porque esta incorporação pode influenciar nas características volumétricas com a redução do volume de vazios, dos vazios do agregado mineral, da relação betume/vazios e podendo melhorar as propriedades mecânicas aumentando a rigidez da mistura e proporcionando a redução da ocorrência de deformação permanente.

A cal também poderia atuar como uma melhoradora da adesividade, fator muito importante nas misturas mornas com utilização de zeólitas. Estudos realizados por Granich (2010) mostraram que o melhor desempenho para misturas asfálticas com adição de cal dolomítica acontece no percentual de 2% e este foi o teor utilizado na mistura morna.

Nesta tese, foi objetivo verificar as misturas mornas com materiais disponíveis no Rio Grande do Sul, assim foi utilizada cal dolomítica proveniente do município da Caçapava do Sul, onde existe abundância deste material, embora existam estudos que indiquem que a cal calcítica produz melhores resultados para este fim, mas este material, para pode ser utilizado, deveria ser trazido de outro estado, gerando acréscimos de custos não desejáveis sendo descartado por este motivo.

Os resultados do ensaio Marshall realizado no projeto de mistura 1, estão mostrados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Parâmetros do Projeto de mistura 1

PARÂMETROS DA MISTURA MORNA 1	RESULTADOS PROJETO	MÉTODO DE ENSASIO	NORMA DNIT 031/2006 - ES
DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA (kg/dm ³)	2,535	RICE	
DENSIDADE APARENTE (kg/dm ³)	2,478		
ESTABILIDADE (kgf)	1220	DNER-ME 043	Mínimo 500 kgf
FLUÊNCIA (cm)	3,85		2,0 a 4,5 cm
PORCENTAGEM DE VAZIOS (%)	4	DNER-ME 043	3 a 5%
RELAÇÃO BETUME - VAZIOS (%)	77	DNER-ME 043	75 a 82%
VOLUME DO AGREGADO MINERAL (%)	18,1		Mínimo 15%
TEOR DE BETUME (%)	5,7		4,5 a 9%

Neste projeto de mistura, foram estudadas adições de teores de zeólita e cale temperaturas de fabricação e compactação de corpos de prova mostrados na Tabela 4.8, para a realização de ensaios de Módulo de Resiliência, Resistência a Tração e Dano por Umidade Induzida, que serão mostrados no capítulo de apresentação dos resultados dos ensaios laboratoriais.

Tabela 4.8 – Temperaturas e teores - Projeto de mistura 1

Fabricação	Compactação	Teor de Zeólita	Teor de Cal
110°C	85°C	0,3%	0%
110°C	85°C	0,3%	2%
120°C	95°C	0,3%	0%
120°C	95°C	0,3%	2%

4.1.2 Projeto da Mistura Morna 2

A composição granulométrica do projeto da mistura asfáltica morna utilizado para testes laboratoriais e execução da pista experimental 2 está mostrado na Tabela 4.9, a seguir.

Tabela 4.9 – Composição granulométrica do projeto de mistura 2

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA									PROJETO	CRM19/2009	DATA:	06/07/2011			
									TRECHO	PISTA EXPERIMENTAL 2 - LAPAV/UFRGS					
									MATERIAL	AGREGADOS (UNIDADE DE BRITAGEM COESUL)					
PENEIRAS	PORCENTAGEM			PASSANDO			ZEÓLITA		MISTURA	ESPECIFICAÇÃO (FAIXA "C" DNIT 031/2006-ES)					
	BRITA	3/4"	BRITA	3/8"	PÓ DE PEDRA	ZEÓLITA	PROJETO	LIMITES		Faixa de Trab.	Tolerância				
3/4"	100,00	20,00	100,00	10,00	100,00	69,70	100,00	0,30	100,00	100	100	100,0	100,0		
1/2"	56,10	11,22	100,00	10,00	100,00	69,70	100,00	0,30	91,22	80	100	84,2	98,2	-7	7
3/8"	25,08	5,02	98,20	9,82	100,00	69,70	100,00	0,30	84,84	70	90	77,8	91,8	-7	7
4	1,20	0,24	4,10	0,41	87,40	60,92	100,00	0,30	61,87	44	72	56,9	66,9	-5	5
10	0,70	0,14	0,82	0,08	54,80	38,20	100,00	0,30	38,72	22	50	33,7	43,7	-5	5
40	0,20	0,04	0,27	0,03	26,21	18,27	100,00	0,30	18,64	8	26	13,6	23,6	-5	5
80	0,10	0,02	0,13	0,01	19,23	13,40	100,00	0,30	13,74	4	16	10,7	16,7	-3	3
200	0,00	0,00	0,00	0,00	11,24	7,83	100,00	0,30	8,13	2	10	6,1	10,1	-2	2

A curva granulométrica do projeto de mistura 2, enquadrado na Faixa C DNIT, está representado na Figura 4.3 abaixo.

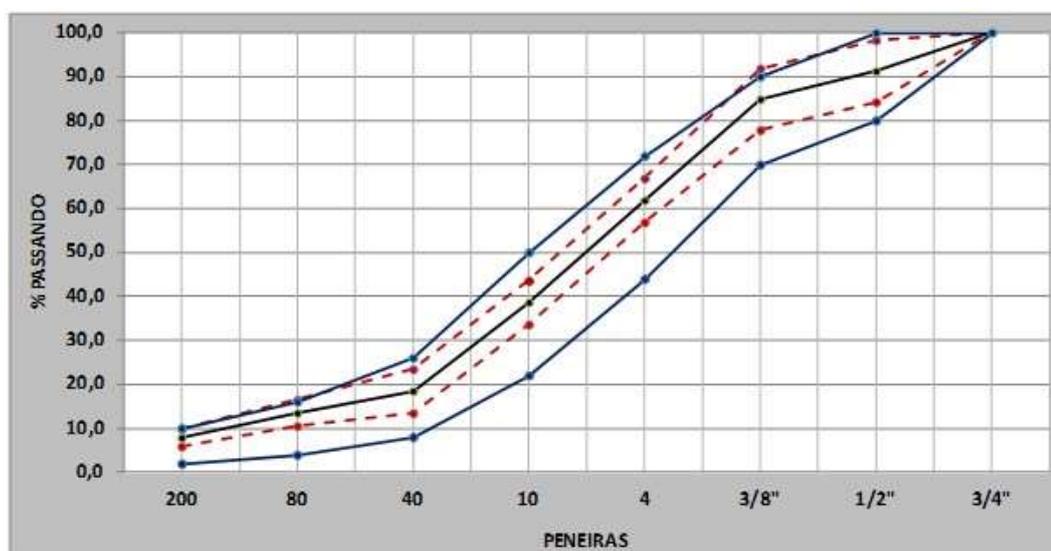


Figura 4.3 - Faixa granulométrica do projeto de mistura 2

O presente projeto foi desenvolvido seguindo o método "MARSHALL" para misturas betuminosas, visando estabelecer um traço ideal que atenda as especificações e normas técnicas do DNIT ES-031/2006 – FAIXA "C" para concreto betuminoso usinado a quente conforme discriminação a seguir.

Para a composição da mistura foram utilizados os materiais mostrados na Tabela 4.10 com suas massas específicas apresentadas na Tabela 4.11.

Tabela 4.10 – Materiais usados no projeto de mistura 2

MATERIAL	PROCEDÊNCIA
BRITA (3/4")	BRITAGEM COESUL- BR 386 KM 392 -TRIUNFO / RS
BRITA (1/2")	BRITAGEM COESUL- BR 386 KM 392 -TRIUNFO / RS
PÓ DE PEDRA	BRITAGEM COESUL- BR 386 KM 392 -TRIUNFO / RS
ZEÓLITA WATERCEL ZE 325	MINA EM SAINT ANDREAS - CUBA
CAP 50-70	REFAP - CANOAS / RS
DOPE (20KG)	BETUDOP IPIRANGA
OBS.: ADIÇÃO DE UM BALDE DE DOPE 20 KG PARA CADA 25000 KG DE CAP	

Tabela 4.11 – Massa específica dos materiais usados no projeto de mistura 2

MATERIAL	Massa específica aparente kg/dm ³	Massa específica real kg/dm ³
BRITA 3/4"	2,729	2,814
BRITA 1/2"	2,705	2,819
PÓ DE PEDRA		2,867
ZEÓLITA		0,980
CAP 50 - 70		1,007
OBSERVAÇÃO	ABSORÇÃO MÉDIA DOS AGREGADOS = 0,94 %	

A massa específica média da mistura 2 foi determinada conforme ensaio da norma ABNT/NBR 15619:2012 - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas, que permite encontrar a massa específica da mistura de agregados e ligante utilizando vácuo com maior precisão, o resultado para a densidade da mistura está mostrado na Tabela 4.12:

Tabela 4.12 – Massa específica - Projeto de mistura 2

DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA (kg/dm ³)	2,550
--	-------

A Figura 4.4 apresenta os gráficos obtidos a partir dos resultados do ensaio Marshall.

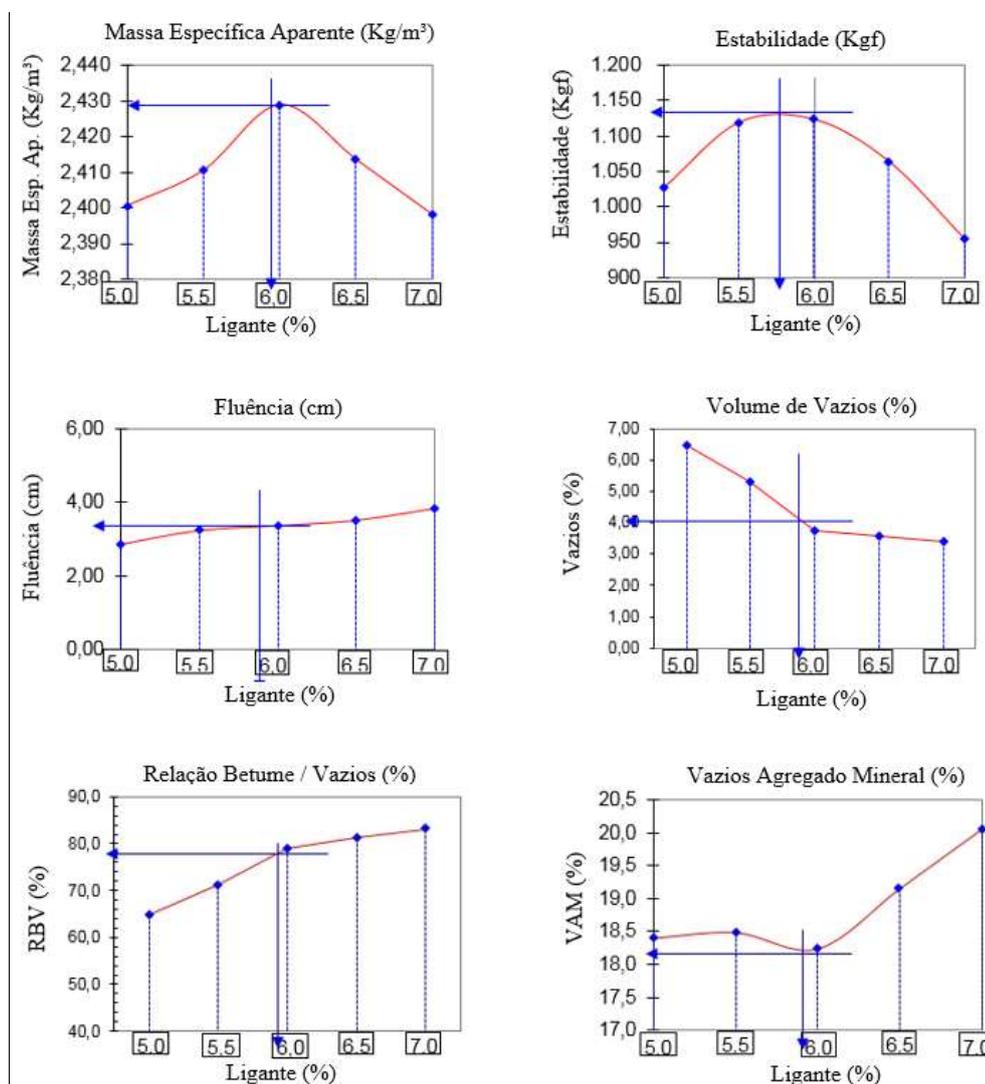


Figura 4.4 - Determinação gráfica do projeto de mistura 2

O traço de projeto da mistura morna 1, após determinação gráfica (Figura 4.4), está mostrado na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Projeto de mistura 2

MATERIAL	%
BRITA 3/4"	18,82%
BRITA 1/2"	9,41%
PÓ DE PEDRA	65,84%
ZEÓLITA	0,3%
CAP 50- 70	5,90%
TOTAL	100,00%

Os resultados do ensaio Marshall realizado no projeto de mistura 1, estão mostrados na Tabela 4.14:

Tabela 4.14 – Parâmetros Marshall - Projeto de mistura 2

PARÂMETROS DA MISTURA MORNA 2	RESULTADOS PROJETO	MÉTODO DE ENSASIO	NORMA DNIT 031/2006 - ES
DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA (kg/dm ³)	2,550	RICE	
DENSIDADE APARENTE (kg/dm ³)	2,429		
ESTABILIDADE (kgf)	1135	DNER-ME 043	Mínimo 500 kgf
FLUÊNCIA (cm)	3,4		2,0 a 4,5 cm
PORCENTAGEM DE VAZIOS (%)	4	DNER-ME 043	3 a 5%
RELAÇÃO BETUME - VAZIOS (%)	78	DNER-ME 043	75 a 82%
VOLUME DO AGREGADO MINERAL (%)	18,2		Mínimo 15%
TEOR DE BETUME (%)	5,9		4,5 a 9%

4.2 RESULTADOS DE ENSAIOS PRODUZIDOS EM LABORATÓRIO PARA AUXÍLIO NA PESQUISA

Nesta seção apresenta-se os resultados de ensaios laboratoriais realizados na misturas mornas produzidas, para comparação, quando aplicado ao caso, utilizou-se resultados de um concreto asfáltico convencional, identificado como CA, produzido com o mesmo projeto da mistura morna 2 (MM2), porém sem adição de zeólitas naturais e fabricado e compactado nas temperatura usuais de um concreto asfáltico convencional.

4.2.1 Resultados referentes ao projeto de mistura morna 1

Os resultados a seguir foram obtidos através de corpos-de-prova moldados no LAPAV, com material proveniente da mesma pedra de onde foram extraídos os agregados para o experimento prático, com as seguintes temperaturas de produção (temperatura dos agregados) e compactação, com e sem adição de cal hidratada.

- 110°C (produção) e 85°C (compactação) sem adição de cal hidratada
- 110°C (produção) e 85°C (compactação) com adição de cal hidratada
- 120°C (produção) e 95°C (compactação) sem adição de cal hidratada
- 120°C (produção) e 95°C (compactação) com adição de cal hidratada

Informações complementares na fabricação da mistura morna:

- Em todas as misturas foi adicionado um teor de 0,3% de zeólitas naturais.
- Na fabricação das misturas mornas, as temperaturas indicadas se referem às temperaturas de aquecimento dos agregados, temperaturas abaixo das usuais de um CA convencional.
- A zeólita natural não era aquecida, entrando na mistura com o CAP na temperatura ambiente da mesma forma que a cal hidratada.
- O CAP era aquecido e adicionado à mistura na temperatura de 155°C, considerada usual na fabricação de um CA convencional.

Nestes corpos-de-prova foram realizados ensaios de módulo de resiliência (DNER ME 133/94), resistência à tração por compressão diametral (DNER 138/94), dano por umidade induzida (ABNT NBR 15617/2008) e adesividade (DNER-ME 078/94).

4.2.1.1 Resultados de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração - MM1

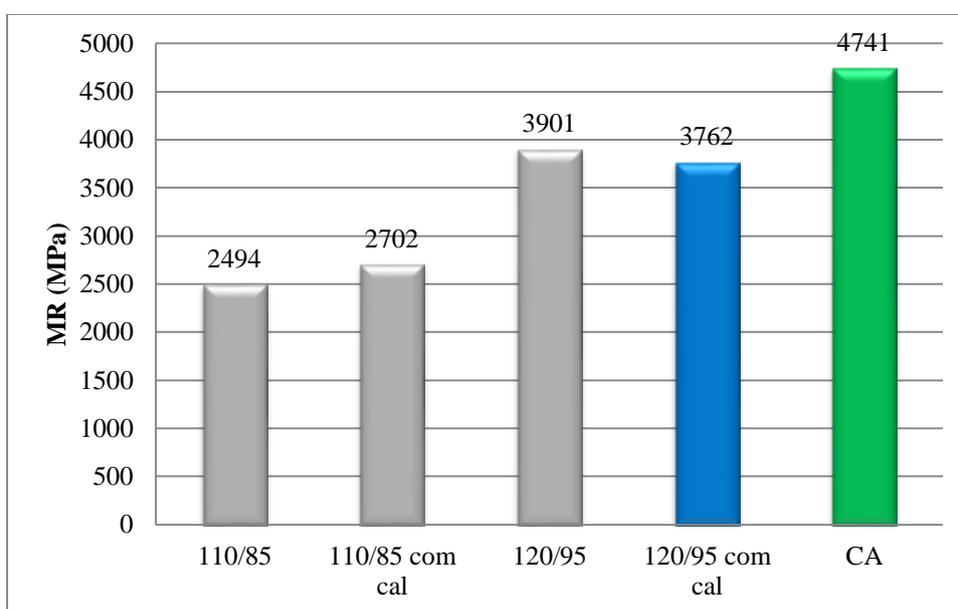


Figura 4.5 apresenta os resultados médios de MR e a Figura 4.6 de RT, ressaltando-se que os ensaios de RT foram executados nos mesmos corpos-de-prova ensaiados para a determinação dos MR.

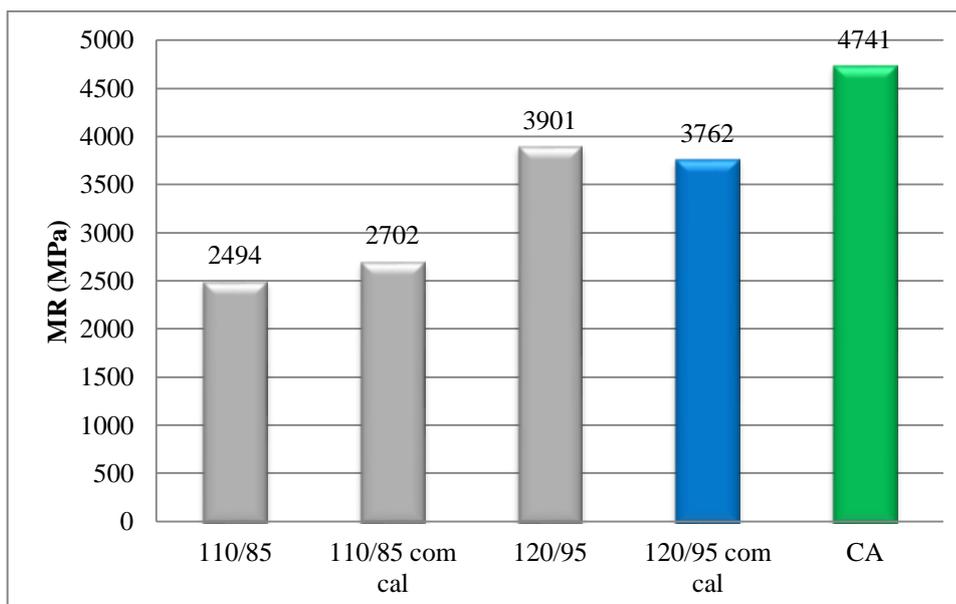


Figura 4.5 – Valores médios de MR das misturas mornas estudadas

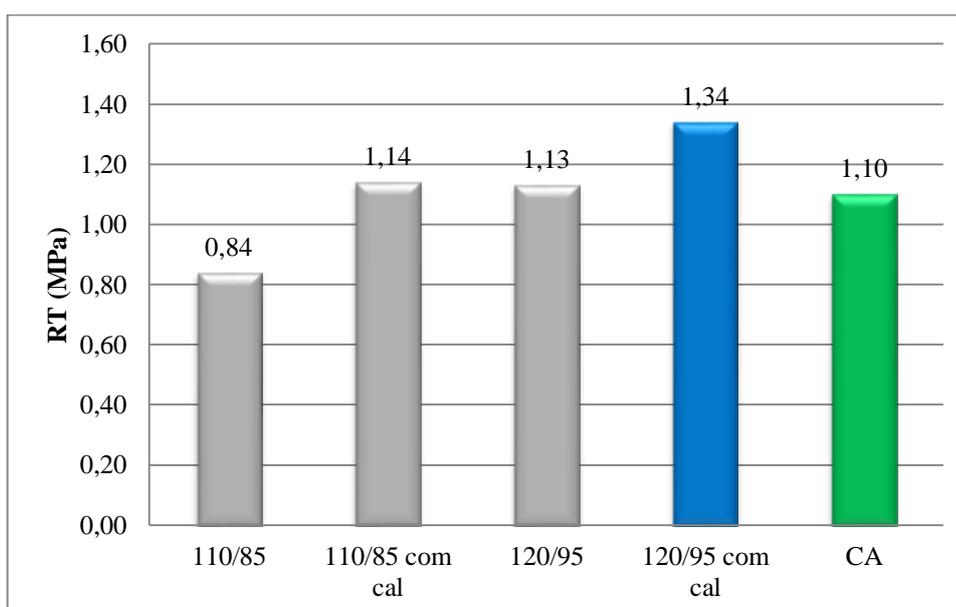


Figura 4.6 – Valores médios de RT das misturas mornas estudadas

Levando em consideração os valores típicos para concretos asfálticos, todas as misturas mornas apresentaram valores adequados de MR e RT. O lote com temperatura de produção de 120°C e moldagem de 95°C de compactação, com adição de cal apresentou os melhores resultados conjugados de MR e RT, inclusive como melhor resultado de resistência a tração que o concreto asfáltico de comparação.

4.2.1.2 Resultados de Danos por Umidade Induzida e Adesividade - MM1

Na Figura 4.7 estão mostrados os resultados dos ensaios de dano por umidade induzida, das misturas testadas. O único lote que se enquadrou na especificação da Norma ABNT NBR 15617:2008 – Dano por umidade induzida, complementada pela norma DNIT ES031 (2006) – Pavimentos flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificações de Serviço, que determina que a razão da resistência à tração por compressão diametral de CPs condicionados contra CPs não condicionados, ou seja, a resistência retida à tração (RRT) deva ser superior a 0,7, foi o executado nas temperaturas de 120°C e 95°C sem a adição de cal.

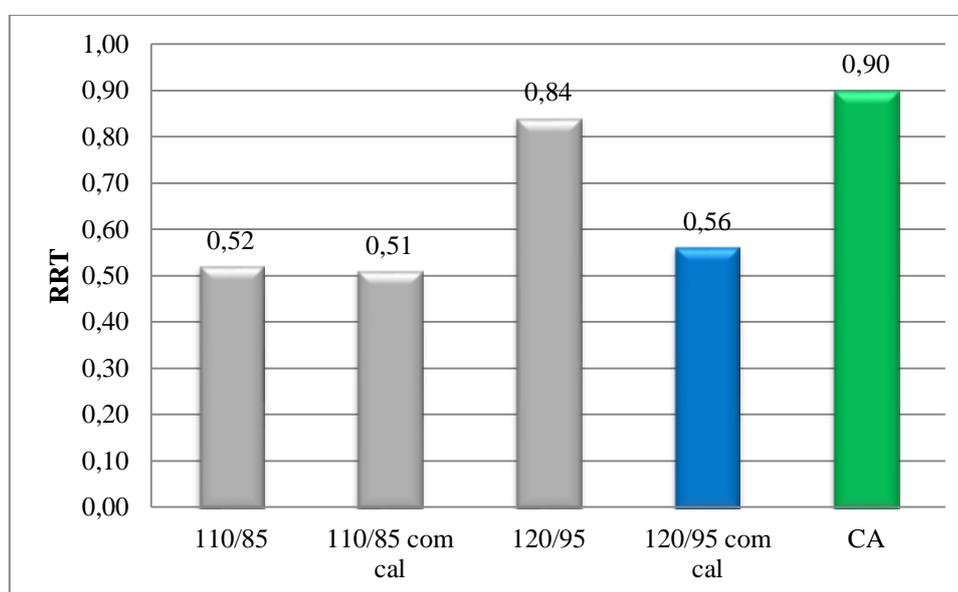


Figura 4.7 – Resultados de dano por umidade induzida

Considerando os resultados de Resistência Retida à Tração (RRT), onde é desejado um valor superior à 0,7, observa-se que apenas a mistura 120-95 sem cal atingiu este objetivo, ficando a mistura 120-95 com cal em segundo lugar neste quesito, sugerindo que a temperatura de fabricação e compactação, bem como a utilização da cal hidratada e da zeólita devam possuir influência significativa neste processo.

No de ensaio adesividade agregado-ligante, realizado como preconiza o método de ensaio DNER - Agregado graúdo: Adesividade a ligante betuminoso: ME 78 - Rio de Janeiro, 1994, todas as misturas foram consideradas satisfatórias.

4.2.2 Resultados referentes ao projeto de mistura morna 2 – MM2

Os resultados a seguir foram obtidos através de corpos-de-prova moldados no LAPAV, com material proveniente da mesma pedreira de onde foi executado o experimento prático, com as seguintes temperaturas de fabricação (temperatura dos agregados) e compactação, com e sem adição de cal hidratada.

- 120°C (fabricação) e 95°C (compactação) - **PROJETO**
- 130°C (fabricação) e 105°C (compactação) - **EXECUÇÃO**
- Na fabricação das mistura mornas, as temperaturas indicadas se referem às temperaturas de aquecimento dos agregados, temperaturas abaixo das usuais de um CA convencional.
- A zeólita natural não era aquecida, entrando na mistura com o CAP na temperatura ambiente.
- O CAP era aquecido e adicionado à mistura na temperatura de 155°C, considerada usual na fabricação de um CA convencional.

Nestes corpos-de-prova foram realizados ensaios de módulo de resiliência (DNER ME 133/94), resistência à tração por compressão diametral (DNER 138/94), dano por umidade induzida (ABNT NBR 15617/2008) e adesividade (DNER-ME 078/94).

4.2.2.1 Resultados de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração – MM2

A Figura 4.8 apresenta os resultados médios de MR e a Figura 4.9 de RT, conforme mencionado, junto com os resultados foram apresentados como referência os valores de uma mistura de concreto asfáltico (CA) executada sem a adição de zeólitas e cal.

É importante ressaltar que os ensaios de RT foram executados nos mesmos corpos-de-prova ensaiados para a determinação dos MR.

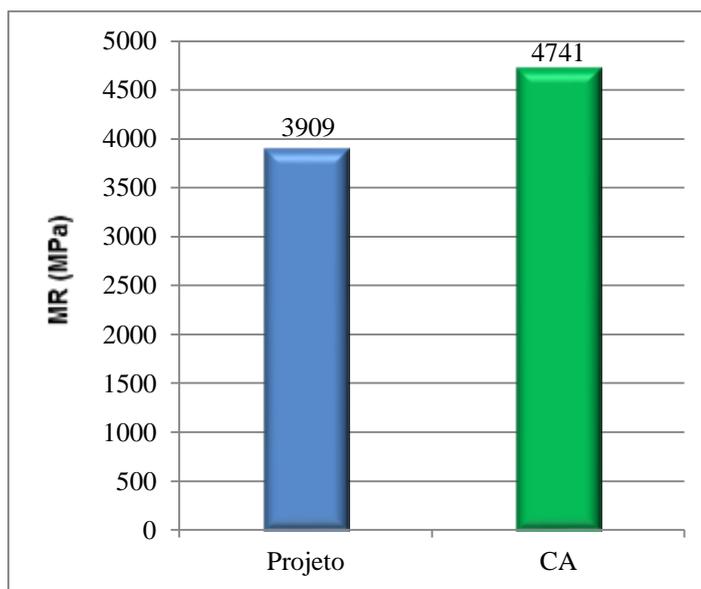


Figura 4.8 – Valores médios de MR

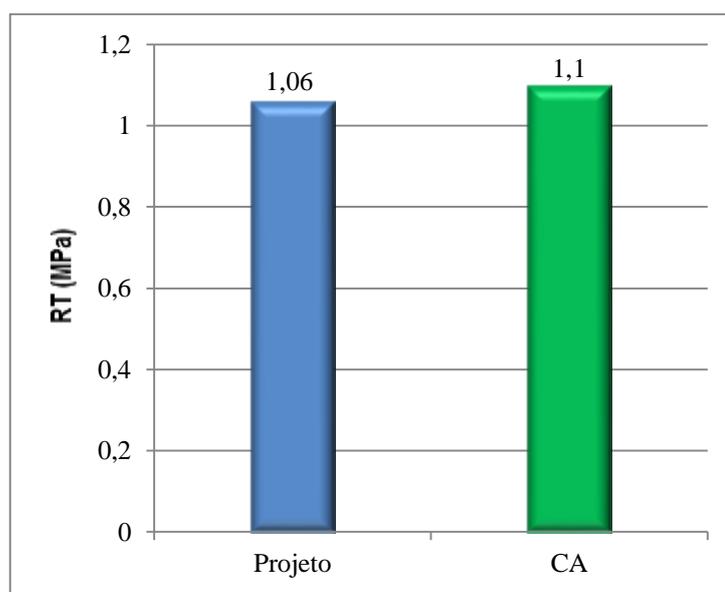


Figura 4.9 – Valores médios de RT

Levando em consideração os valores típicos para concretos asfálticos, a mistura morna apresentou valores adequados de MR e RT, se comparado com o CA, a mistura mostrou resultados semelhantes com rigidez adequada aliada com uma boa resistência a tração.

4.2.2.2 Resultados de Danos por Umidade Induzida e Adesividade – MM2

Na Figura 4.10 estão mostrados os resultados dos ensaios de dano por umidade induzida da mistura testada compara a um CA convencional.

Foi atingido o limite mínimo que a Norma ABNT NBR 15617:2008 – Dano por umidade induzida, complementada pela norma DNIT ES031 (2006) – Pavimentos flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificações de Serviço, determina que a razão da resistência à tração por compressão diametral de CPs condicionados contra CPs não condicionados, ou seja, a resistência retida à tração (RRT) deva ser igual ou superior a 0,7, as misturas foram produzida se compactadas nas temperaturas de 120°C e 95°C, respectivamente e considerando o valor previsto na norma a mesma, apesar de estar no limite, se mostrou satisfatória.

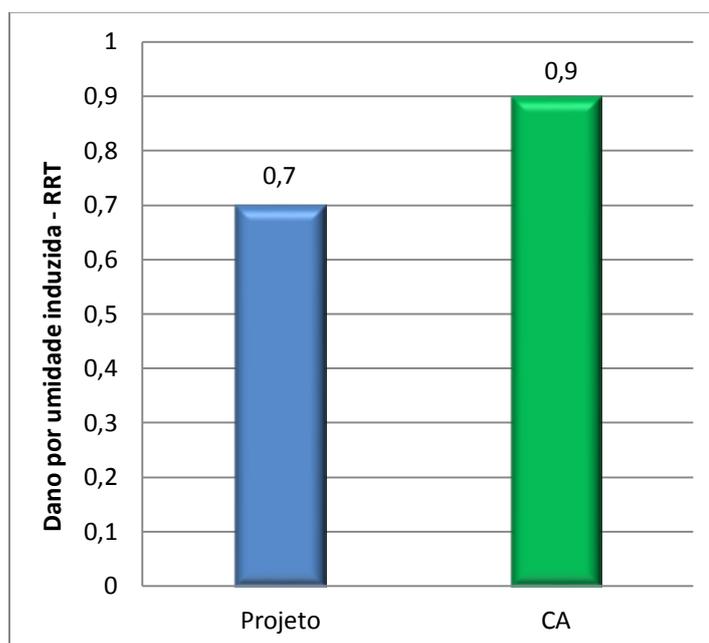


Figura 4.10 –Valores de dano por umidade induzida - MM2

No de ensaio adesividade agregado-ligante, realizado como preconiza o método de ensaio DNER - Agregado graúdo: Adesividade a ligante betuminoso: ME 78 - Rio de Janeiro, 1994, todas as misturas foram consideradas satisfatórias.

4.3 RESULTADOS DE ENSAIOS PRODUZIDOS EM LABORATÓRIO A PARTIR DE AMOSTRAS RETIRADAS DAS PISTAS EXPERIMENTAIS

Nesta seção serão apresentados resultados referentes a ensaios laboratoriais realizados em amostras de misturas mornas coletadas durante a execução das pistas de testes, com materiais provenientes da usina de asfalto e moldados para análise no laboratório.

4.3.1 Resultados referentes à execução da mistura morna 1 – MM1

Como já comentado, na execução da primeira pista de testes, foi utilizada mistura morna com adição de 2% de cal hidratada e 0,3% de zeólitas, que teve como objetivo ser produzida na temperatura de 120°C e compactada na temperatura de 95°C.

Desta forma, durante a execução da pista experimental 1, foi recolhida uma determinada quantidade de mistura asfáltica morna para análise e comparação com os dados obtidos anteriormente em laboratório e apresentados no item 4.2, estes resultados serão mostrados a seguir.

4.3.1.1 Extração e propriedades da mistura morna 1 - MM1

Os valores dos parâmetros Marshall para a mistura produzida serão apresentados neste item. Verificou-se que o teor de asfalto na mistura produzida apontou um teor de 5,45% contra o teor de 5,7% de projeto (Tabela 4.15).

Este valor é inferior ao teor de projeto e talvez isto explique a deficiência de cobrimento que pode ser observada em alguns agregados.

É possível que este fator também tenha interferido no resultado de outros ensaios, com MR, RT e Dano por umidade induzida devido à deficiência de ligante, contudo é preciso lembrar

da forma artesanal de produção da mistura morna e também que foi a primeira vez que a mesma foi produzida, servindo de aprendizado para a utilização desta tecnologia.

Tabela 4.15 – Teor de asfalto mistura produzida – MM1

Propriedade	Valor de Projeto	Mistura produzida
Teor de Asfalto (%)	5,70	5,45

A granulometria da mistura produzida, conforme se pode observar na tabela 4.16 e figura 4.14, foi muito próxima à de projeto, mostrando que neste quesito a usina estava bem calibrada.

Tabela 4.16 – Granulometria da mistura produzida – MM1

PENEIRA	mm	Limite	Mistura - projeto	Faixa de trabalho	Material Extraído
3/4"	19,1	100	100	100 - 100	100
1/2"	12,7	80 - 100	91,22	84,2 - 98,2	90,8
3/8"	9,5	70 - 90	84,66	77,7 - 91,7	84,0
n 4	4,76	44 - 72	53,50	48,5 - 58,5	57,7
n 10	2	22 - 50	33,18	28,2 - 38,2	32,9
n 40	0,42	8 - 26	15,82	10,8 - 20,8	16,5
n 80	0,18	4 - 16	11,58	8,6 - 14,6	12,7
n 200	0,074	2 - 10	6,74	4,7 - 8,7	8,7

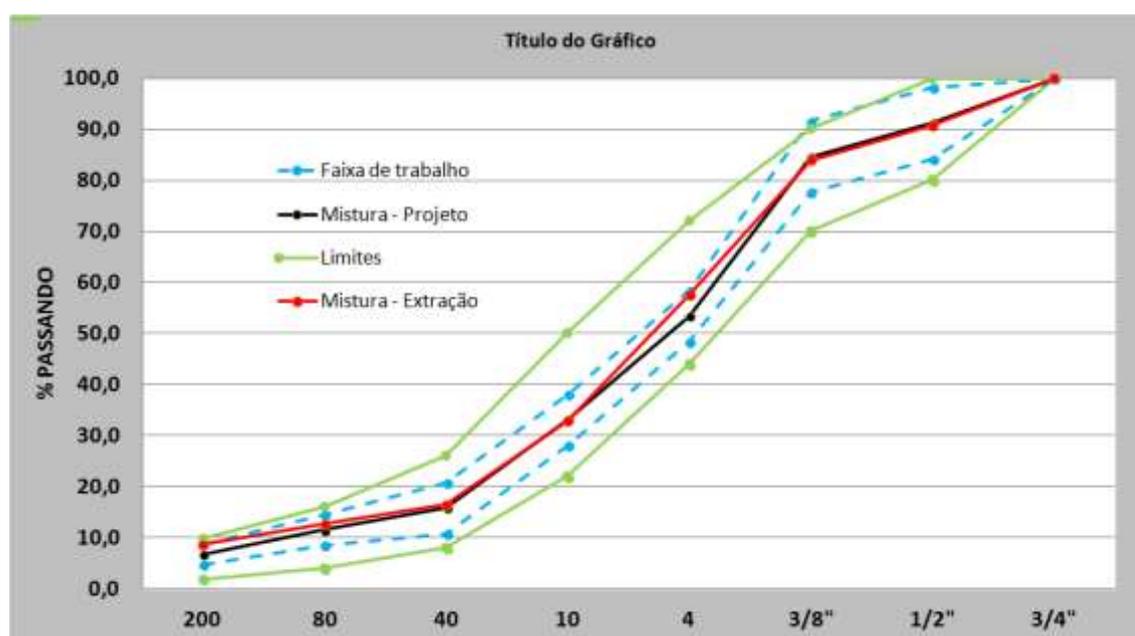


Figura 4.11 – Composição granulométrica da mistura produzida e comparação com o projeto – MM1

As propriedades finais da mistura, após análise de amostras recolhidas quando da execução da pista 1 e sua comparação com a mistura de projeto estão apresentados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Propriedade finais da mistura produzida – MM1

PARÂMETROS DA MISTURA MORNA 1	RESULTADOS PROJETO	RESULTADOS EXECUÇÃO	MÉTODO DE ENSASIO	NORMA DNIT 031/2006 - ES
ESTABILIDADE (kgf)	1220	733	DNER-ME 043	Mínimo 500 kgf
FLUÊNCIA (cm)	3,85	4,2		2,0 a 4,5 cm
PORCENTAGEM DE VAZIOS (%)	4	5,7	DNER-ME 043	3 a 5%
RELAÇÃO BETUME - VAZIOS (%)	77	70	DNER-ME 043	75 a 82%
VOLUME DO AGREGADO MINERAL (%)	18,1	18,9		Mínimo 15%
TEOR DE BETUME (%)	5,7	5,45		4,5 a 9%

4.3.1.2 Resultados de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração - MM1

Os resultados de Módulo de Resiliência (MR) e Resistência a Tração (RT) da mistura morna 1, após análise de amostras recolhidas quando da execução da pista 1 e sua comparação com a mistura de projeto e com o CA convencional estão apresentados na Figura 4.12 e Figura 4.13 respectivamente.

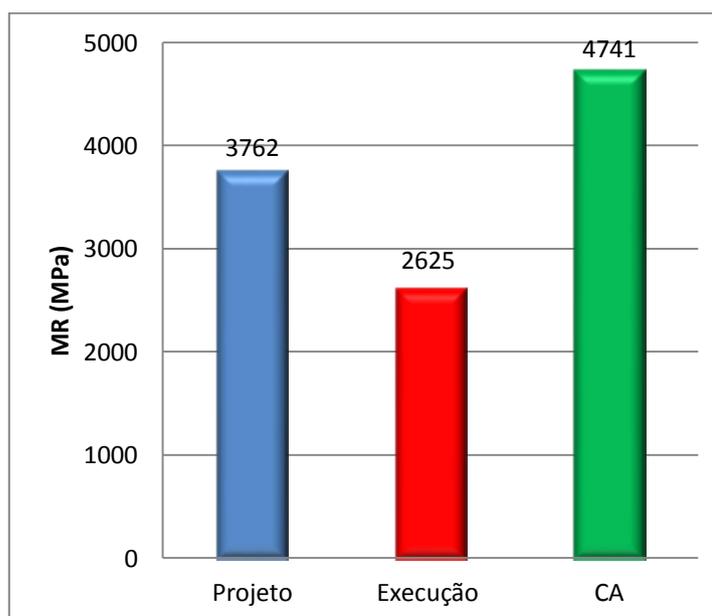


Figura 4.12 – Comparação dos Módulos e Resiliência– MM1

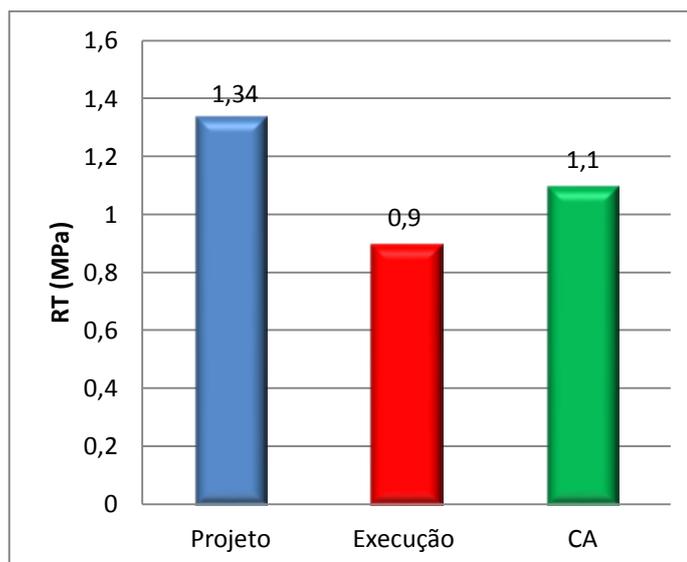


Figura 4.13 – Comparação da Resistência à Tração– MM1

4.3.1.3 Resultados de Danos por Umidade Induzida- MM1

Os resultados de Danos por umidade induzida da mistura morna 1, após análise de amostras recolhidas quando da execução da pista 1 e sua comparação com a mistura de projeto e com um CA convencional estão apresentados na Figura 4.14.

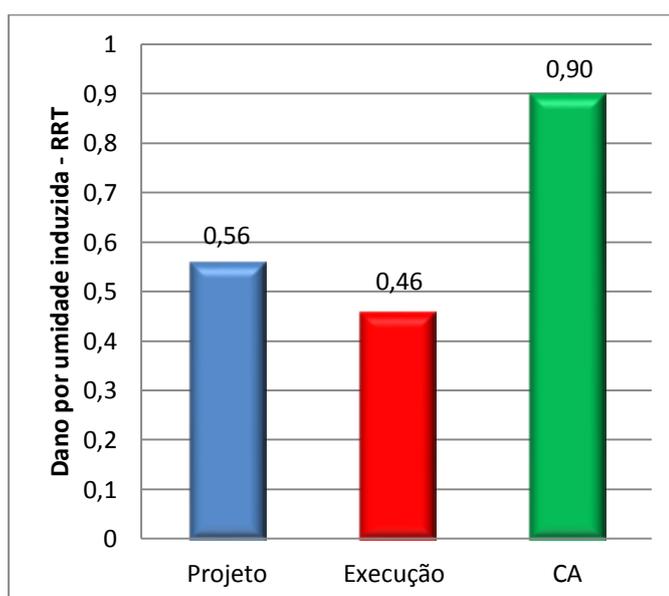


Figura 4.14 – Comparação do dano por umidade induzida de projeto e execução – MM1

4.3.2 Resultados referentes à execução da mistura morna 2

A execução da pista experimental 2 ocorreu no dia 03/11/2011 e nesta mistura não foi utilizada a cal hidratada.

Com o objetivo de obter-se sucesso na produção da mistura morna e, com base nos estudos e testes já feitos, decidiu-se elevar um pouco a temperatura de usinagem para 130°C, principalmente com o objetivo de manter e elevar os resultados no ensaio de dano por umidade induzida.

Apesar da mistura morna de projeto ser considerada satisfatória no estudo de dano por umidade induzida, pensando em melhorar este resultado de relevância importância no estudo das misturas mornas foi decidido que, durante a produção para a execução da nova pista de testes, a temperatura de usinagem seria de 130°C e a temperatura média de compactação de 105°C, valores dentro das temperaturas consideradas para as misturas mornas e, buscando com isso, melhorar o desempenho da mistura a ser produzida e estudada.

4.3.2.1 Extração e propriedades da mistura morna 2 – MM2

Os valores dos parâmetros Marshall da mistura produzida serão mostrados neste item. Verificou-se que o teor de asfalto na mistura apontou um teor de 6,27% contra o teor de 5,9% de projeto.

Este valor é superior ao teor de projeto e talvez isto explique um teor de vazios encontrado menor do que o de projeto.

É possível também que tenha interferido no resultado de outros ensaios, com MR, RT e Dano por umidade induzida devido ao teor um pouco elevado de ligante, contudo é preciso observar a maneira artesanal de produção da mistura morna.

Na Tabela 4.18, Tabela 4.19, Figura 4.15 e Tabela 4.20 podem ser observados os resultados de análises de amostras coletadas quando da execução da mistura morna 2, na pista experimental 2 e a sua comparação com a mistura projeto.

As tabelas e figura mencionadas apresentam resultados para teor de betume, granulometria, composição granulométrica e propriedades finais da mistura, respectivamente.

Tabela 4.18 – Teor de asfalto mistura produzida – MM2

Propriedade	Valor de Projeto	Mistura produzida
Teor de Asfalto (%)	5,90	6,27

Tabela 4.19 – Granulometria da mistura produzida – MM2

PENEIRA	mm	Limite	Mistura - projeto	Faixa de trabalho	Material Extraído
3/4"	19,1	100	100	100 - 100	100
1/2"	12,7	80 - 100	91,22	84,2 - 98,2	91,2
3/8"	9,5	70 - 90	84,84	77,8 - 91,8	85,8
n 4	4,76	44 - 72	61,87	56,9 - 66,9	64,4
n 10	2	22 - 50	38,72	33,7 - 43,7	40,1
n 40	0,42	8 - 26	18,64	13,6 - 23,6	19,2
n 80	0,18	4 - 16	13,74	10,7 - 16,7	13,0
n 200	0,074	2 - 10	8,13	6,1 - 10,1	8,5

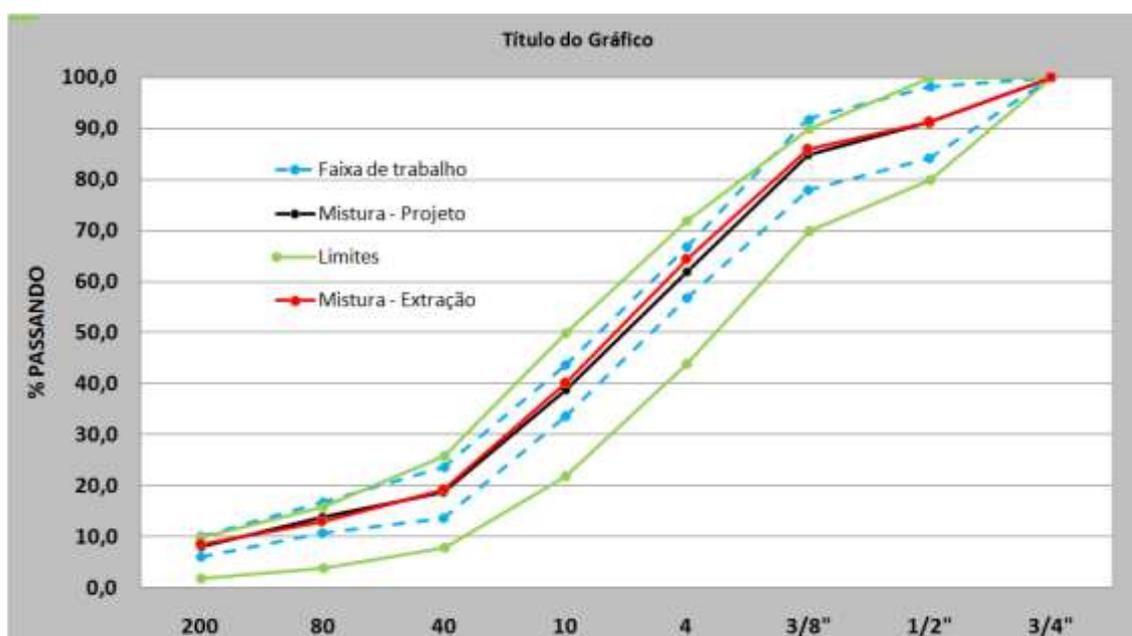


Figura 4.15 – Composição granulométrica da mistura produzida e comparação com o projeto – MM2

Tabela 4.20 – Propriedade finais da mistura produzida – MM2

PARÂMETROS DA MISTURA MORNA 2	RESULTADOS PROJETO	RESULTADOS EXECUÇÃO	MÉTODO DE ENSASIO	NORMA DNIT 031/2006 - ES
ESTABILIDADE (kgf)	1135	1350	DNER-ME 043	Mínimo 500 kgf
FLUÊNCIA (cm)	3,4	2,7		2,0 a 4,5 cm
PORCENTAGEM DE VAZIOS (%)	4	2,71	DNER-ME 043	3 a 5%
RELAÇÃO BETUME - VAZIOS (%)	78	72,29	DNER-ME 043	75 a 82%
VOLUME DO AGREGADO MINERAL (%)	18,2	13,55		Mínimo 15%
TEOR DE BETUME (%)	5,9	6,27		4,5 a 9%

4.3.2.2 Resultados de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração – MM2

Os resultados de Módulo de Resiliência (MR) e Resistência a Tração (RT) da mistura morna 2, após análise de amostras recolhidas quando da execução da pista 2 e sua comparação com a mistura de projeto e com o CA convencional estão apresentados na Figura 4.16 e Figura 4.17 respectivamente.

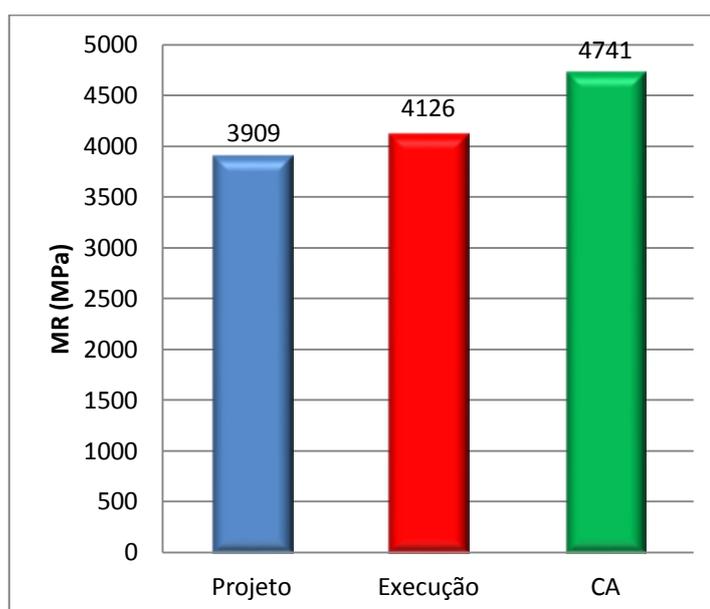


Figura 4.16 – Comparação dos Módulos e Resiliência– MM2

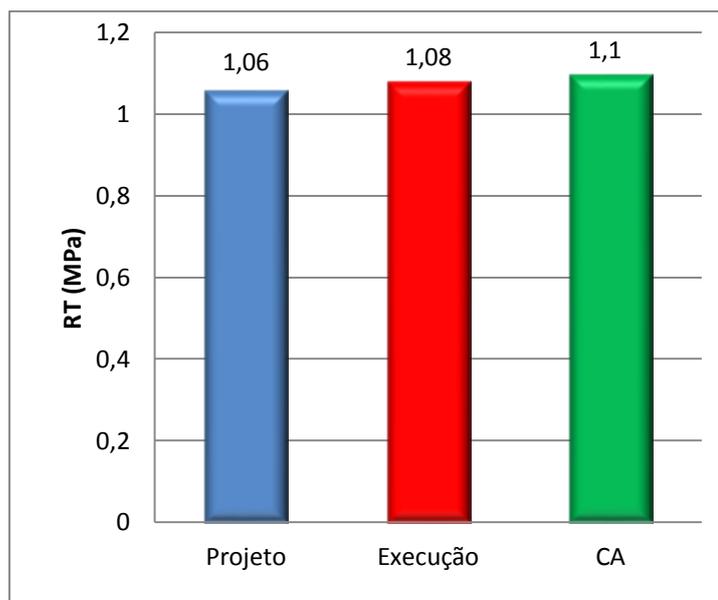


Figura 4.17 – Comparação da Resistência à Tração– MM2

4.3.2.3 Resultados de Danos por Umidade Induzida – MM2

Os resultados de Danos por umidade induzida de execução da MM2 e sua comparação com a mistura de projeto e com o CA convencional estão apresentados na Figura 4.18.

Neste gráfico se pode observar que a elevação das temperaturas de produção e compactação para 130°C e 105°C respectivamente, contribuíram para atingir o objetivo de elevar o resultado deste ensaio, proporcionando uma maior folga e confiabilidade na mistura.

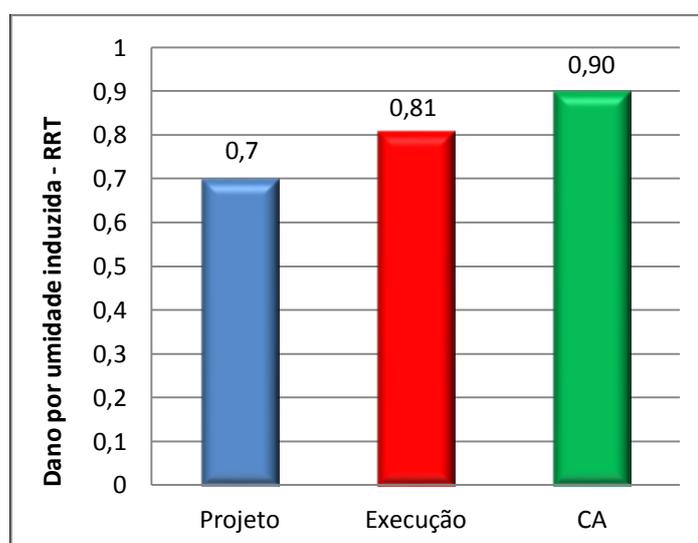


Figura 4.18 – Comparação do dano por umidade induzida– MM2

4.3.2.4 Resultado do ensaio de fadiga de 4 pontos – MM2

Para a realização do ensaio de fadiga de 4 pontos foi retirada uma placa da pista 2, através de uma serra de disco (Figura 4.19).



Figura 4.19 – Retirada de placa de asfalto da pista 2

Da placa de asfalto extraída da pista 2 foram produzidas doze vigotas (Figura 4.20), que foram identificadas e encaminhadas para o Laboratório de Asfalto da Universidade Federal de Santa Catarina, a qual auxiliou na pesquisa realizando os testes e produzindo os resultados que serão apresentados nesta seção.



Figura 4.20 – Vigotas produzidas para o ensaio de fadiga

Inicialmente foram medidas as dimensões o peso e realizada a determinação da densidade aparente dos 12 corpos de prova (Tabela 4.22 e Tabela 4.21), para em seguida serem levadas aos testes.

Tabela 4.21 – Medidas dos pesos e determinação da densidade aparente das vigotas

Identific. Vigota	Det. da Densidade			Densidade Aparente
	Peso AR	P. Imerso	Sup. Seca	
1	2791,30	1606,30	2803,20	2,332
2	2799,70	1610,50	2810,40	2,333
3	2739,80	1576,00	2759,20	2,316
4	2753,40	1570,40	2761,90	2,311
5	2790,30	1553,00	2801,80	2,234
6	2771,00	1591,10	2778,20	2,334
7	2756,30	1582,40	2764,80	2,331
8	2822,50	1632,50	2832,10	2,353
9	2765,30	1601,50	2773,80	2,359
10	2771,70	1590,50	2785,80	2,319
11	2797,50	1607,00	2812,90	2,320
12	2766,50	1589,10	2779,40	2,324

Tabela 4.22 – Medidas dos corpos-de-prova (vigotas) para o ensaio de fadiga

Id. Vigota	Dimensão (mm)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1	Comprimento	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0
	Largura	63,7	63,9	63,9	63,8	63,8	63,8
	Altura	49,3	49,0	49,0	50,2	50,3	50,2
2	Comprimento	380,0	380,0	380,0	380,0	379,0	379,0
	Largura	63,2	63,2	63,6	63,4	63,3	63,5
	Altura	50,1	50,4	50,5	50,0	49,9	50,0
3	Comprimento	381,0	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0
	Largura	63,3	63,6	63,7	63,3	63,5	63,6
	Altura	49,4	49,1	49,3	50,2	50,3	50,4
4	Comprimento	381,0	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0
	Largura	63,6	63,6	63,6	63,7	63,5	63,5
	Altura	49,3	49,1	49,0	50,1	50,2	50,2
5	Comprimento	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0
	Largura	62,6	63,6	63,6	62,8	63,7	63,9
	Altura	50,2	50,2	50,1	49,6	49,6	49,6
6	Comprimento	379,0	379,0	380,0	380,0	380,0	380,0
	Largura	63,4	63,1	63,0	63,0	63,0	63,3
	Altura	48,9	49,4	49,3	50,2	50,4	50,3
7	Comprimento	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0
	Largura	63,1	63,3	63,2	63,4	63,2	63,3
	Altura	49,9	50,2	50,3	49,1	49,4	49,4
8	Comprimento	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0
	Largura	63,5	63,5	63,6	63,4	63,5	63,4
	Altura	49,1	49,3	49,2	50,2	50,6	50,6
9	Comprimento	381,0	381,0	381,0	381,0	382,0	382,0
	Largura	63,3	61,7	60,9	63,2	61,5	60,8
	Altura	50,0	49,3	49,1	50,2	50,2	50,0
10	Comprimento	380,0	381,0	382,0	382,0	382,0	382,0
	Largura	62,8	62,2	62,0	62,8	62,2	61,8
	Altura	49,8	50,3	49,9	50,9	50,9	50,6
11	Comprimento	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0	380,0
	Largura	63,7	63,4	63,4	63,7	63,5	63,5
	Altura	49,7	50,3	50,4	50,2	50,6	50,3
12	Comprimento	380,0	380,0	380,0	379,0	379,0	380,0
	Largura	63,5	62,1	63,0	63,1	63,4	63,0
	Altura	50,0	50,1	50,2	49,7	49,7	49,4

a) Caracterização do Comportamento Reológico

Para a caracterização deste comportamento (módulo complexo e ângulo de fase) escolheu-se aleatoriamente um dos corpos de prova (CP4) para aplicar-se uma varredura de temperaturas de frequências de carregamentos. A Tabela 4.23 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.23 – Resultados do módulo complexo e ângulo de fase

Módulo Dinâmico G^* (MPa)					
Freq. (Hz)	T = 10°C	T = 15°C	T = 20°C	T = 25°C	T = 30°C
0,1	7139	4084	1900	770	414
0,2	8251	5044	2481	1157	582
0,5	9684	6412	3583	1701	877
1,0	10723	7506	4479	2381	1316
2	11790	8592	5470	3060	1726
5	13305	10191	6960	4210	2633
10	14522	11379	8150	5326	3407
20	16117	12579	9331	6300	4322
Ângulo de Fase δ (graus)					
Freq. (Hz)	T = 10°C	T = 15°C	T = 20°C	T = 25°C	T = 30°C
0,1	16,4	26,5	37,9	45	45,1
0,2	14,3	23,6	34,7	43,2	46,1
0,5	12	19,7	30,1	39,9	44,9
1,0	10,2	16,9	26,4	36,7	43,3
2	9,1	14,9	23,3	33,1	40,3
5	7,7	12,5	19,5	28,5	36,2
10	6,7	10,7	16,8	25,2	33,0
20	5,4	8,9	14,5	22,1	30,4

A Figura 4.21 mostra as curvas isotérmicas (variação do módulo com a frequência para uma mesma temperatura).

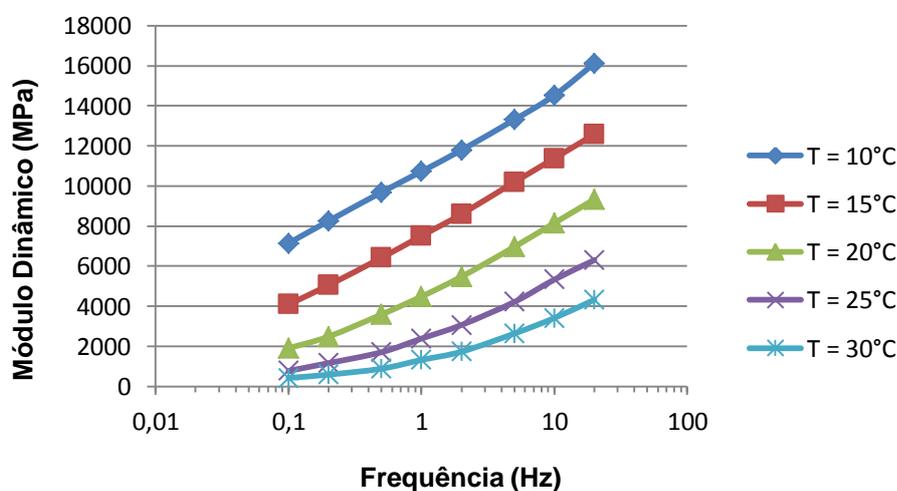


Figura 4.21 – Curvas Isotérmicas

A Figura 4.22 mostra a representação da parte imaginária do módulo complexo em função da parte real.

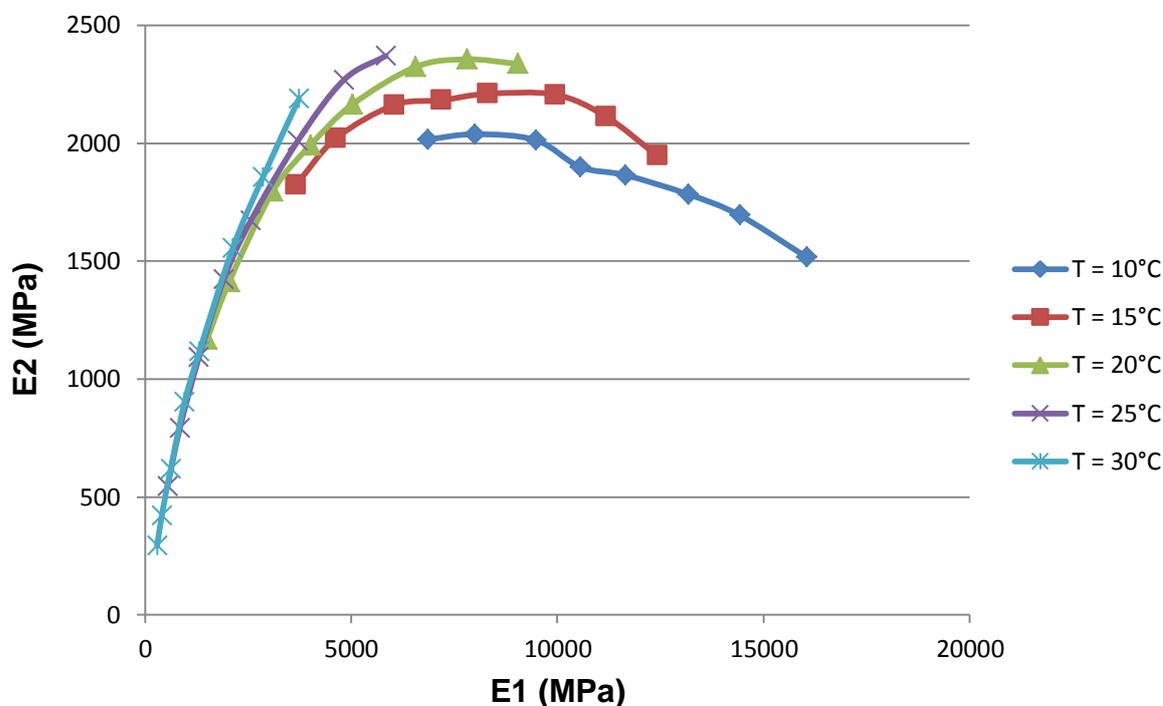


Figura 4.22 – Representação da parte real a imaginária do módulo complexo.

A partir dos dados da Figura 4.22 observa-se que a maior dissipação de energia por amortecimento viscoso se dá ao redor da temperatura de 20°C e frequência de 10Hz.

b) Caracterização do Comportamento à Fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados na temperatura de 20°C e frequência de 10Hz. A Tabela 4.24 apresenta os resultados obtidos.

O critério utilizado para término da ruptura foi de 50% da rigidez inicial do corpo de prova.

Tabela 4.24 – Resultados obtidos dos ensaios de fadiga

Corpo de prova	Deformação de tração inicial ($\times 10^{-6}$)	Módulo complexo (MPa)	Ângulo de fase (grau)	Número de solicitações
1	307	7124	24,0	7.142
3	154	7297	21,0	37.259
4	201	7393	23,1	39.098
5	103	8494	18,9	978.000*
6	153	8807	18,9	109.081
7	253	7976	21,4	16.466
8	254	8373	23,0	11.805
9	122	9037	19,3	366.609
10	182	8702	20,1	38.303
11	303	6731	24,3	5.698
12	103	8290	17,6	232.915

A Figura 4.23 apresenta a curva de fadiga obtida.

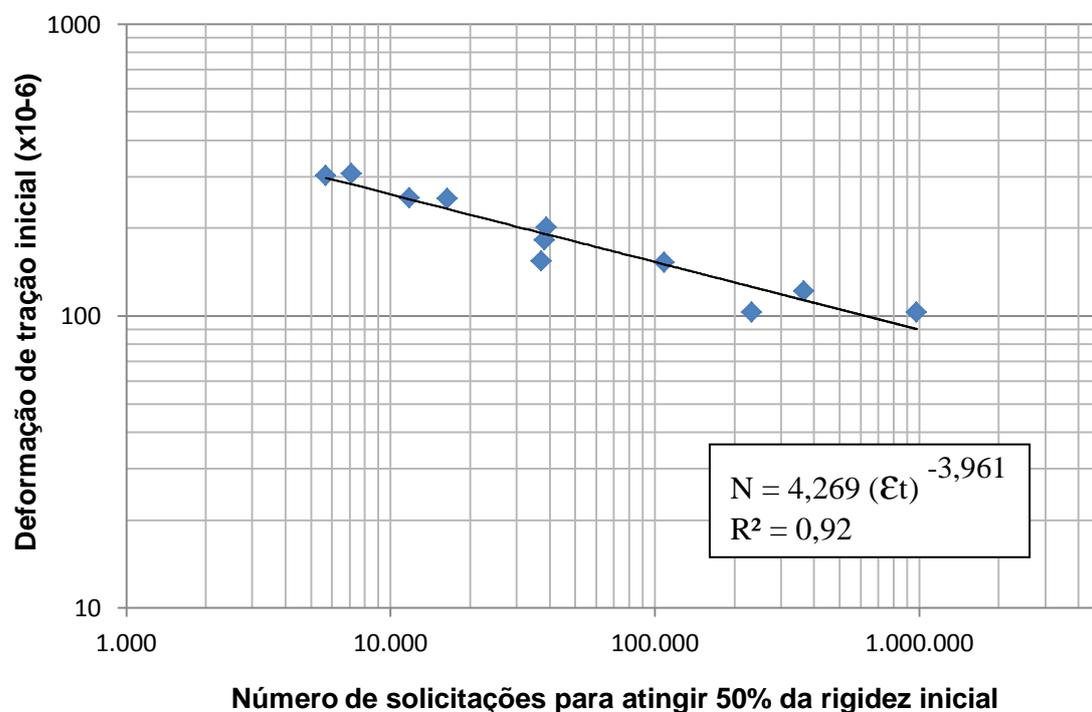


Figura 4.23 – Curva de fadiga obtida

5 PROCESSO DE PRODUÇÃO EM USINA DE ASFALTO E CONSTRUÇÃO E DAS PISTAS EXPERIMENTAIS COM MISTURA MORNA ATRAVÉS DA ADIÇÃO DE ZEÓLITAS NATURAIS

5.1 PRODUÇÃO DA MISTURA MORNA EM USINA DE ASFALTO

Os serviços de usinagem da mistura morna foram feitos pela empresa Coesul – Construtora Extremo-Sul Ltda. na usina localizada no km 392 da BR-386, no município de Trinfo/RS, a aproximadamente 82 km da pista experimental.

A seguir apresenta-se o procedimento para a produção das misturas mornas na usina de asfalto. Este serviço foi feito de maneira praticamente artesanal, uma vez que a técnica para a utilização deste material e deste tipo de mistura não é feita, pelo que se sabe e foi pesquisado, em nenhuma usina brasileira, bem como não foi encontrada referências em usinas do exterior.

A usina desta pesquisa é do tipo Drum-Mixer da marca Cyber onde foi feita uma pequena alteração: foi instalado um misturador na parte externa da usina (Figura 5.1) para o reaproveitamento dos finos.



Figura 5.1 - Detalhe misturador e janela por onde foram introduzidas as zeólitas

Assim a mistura dos agregados com o ligante e as zeólitas foi feita no misturador instalado ao lado da usina e não dentro do tambor, com a introdução das zeólitas naturais feitas através de uma janela na estrutura que dá acesso ao misturador exatamente no ponto onde é feito a adição do ligante, esta janela pode ser visualizada na Figura 5.1 e através do detalhe na vista superior da Figura 5.2, onde se observa as pás que realizam a mistura dentro do misturador.



Figura 5.2 - Detalhe das pás no interior misturador em vista superior na janela por onde foram introduzidas as zeólitas

Utilizando os conhecimentos do funcionamento da usina, e devido ao baixo volume a ser produzido, foi possível montar um roteiro para a produção da mistura de maneira satisfatória e são estes procedimentos que se pretende mostrar a seguir.

5.1.1 Produção da mistura morna (projeto 1) para a pista experimental 1

Os procedimentos para a produção da mistura asfáltica e execução da pista de testes referente ao projeto de mistura 1, para a pista experimental 1, ocorreram no dia 29/04/2010.

Com base nos ensaios realizados em laboratório, foi executada uma camada de reforço em uma pista experimental existente, construída sobre uma camada de argila de 600mm, com uma sub-base de rachão com 180mm de espessura, base de brita graduada com 120mm, uma camada de CA de elevado módulo de elasticidade (EME) com 80mm e revestimento na camada superior com 30mm de microasfalto.

A camada de reforço estrutural com mistura morna com adição de teores de 2% de cal hidratada e 0,3% de zeólita natural, sobre a pista existente, teve uma espessura planejada de 50mm e foi executada nas temperaturas de usinagem de 120°C, para posterior compactação na temperatura média de 95°C.

A temperatura média de 95°C foi considerada porque durante o serviço de espalhamento e compactação a temperatura diminui, então se a compactação inicia-se na temperatura de 95° iria terminar em uma temperatura muito inferior, e a temperatura de compactação média ficaria abaixo de 95°C.

A obtenção da mistura envolveu a associação dos agregados, da zeólita, da cal hidratada e do ligante asfáltico nas proporções determinadas no projeto de dosagem.

Devido à falta de um dosador mecânico automatizado, a introdução da zeólita e da cal hidratada foi manual diretamente no misturador, com o auxílio de uma pá (Figura 5.4), por uma janela de inspeção existente na ligação entre o tambor secador e o misturador, evitando assim que os finos fossem retirados nos filtros de manga.

A zeólita, ao ser introduzida no misturador, junto com o ligante, liberou água pelo seu aquecimento causando uma expansão do seu volume, criando um efeito de espuma com a consequente redução da sua viscosidade.

Partindo-se de uma massa específica máxima teórica de 2,535 kg/m³, a quantidade por metro cúbico de mistura morna, de zeólita e de cal hidratada a ser adicionada na mistura foi em torno de 7,5 kg e 51 kg, respectivamente.

A zeólita fornecida pela empresa Celta Brasil Ltda., veio do fornecedor acondicionado em sacos de 25 kg, e a cal hidratada em sacos de 20 kg.

Para cada saco de 20kg de cal hidratada foram dosados 3 kg de zeólita (Figura 5.3) e a mistura dos dois materiais foi executada manualmente em um carrinho de mão.

Três carrinhos foram usados no revezamento, ou seja, enquanto um alimentava o misturador, o segundo carrinho já aguardava pronto para servir o misturador e o terceiro era preparado para retornar ao processo de produção em sequência.



Figura 5.3 - Pesagem de zeólita para mistura com cal antes da adição no misturador

Este procedimento foi importante para manter a taxa de produção da usina em torno de 1 ton/min (Figura 5.4), desta forma, a mistura depositada em cada carrinho de mão contendo 20kg de cal hidratada e 3kg de zeólita, deveria ser introduzida no misturador dentro do período de tempo igual a um minuto.

O controle do tempo para a adição da mistura zeólita e cal hidratada foi feito por um relógio instalado próximo ao misturador (Figura 5.4). Este controle serviu para que a mistura ocorresse da forma mais homogênea possível, assim o operador teve que fazer o controle para descarregar um carrinho inteiro dentro do período de um minuto.

Na produção da mistura morna, o ligante foi aquecido até a uma temperatura em torno de 155°C, enquanto que os agregados foram secos e aquecidos à uma temperatura menor que a usual para produzir uma mistura final próximo a 120°C.



Figura 5.4 - Descarregamento da mistura zeólita + cal no misturador com controle do tempo

Para que fosse possível se produzir uma massa asfáltica na temperatura de 120°C foi realizado um controle no painel da usina junto ao controle da temperatura no filtro de manga. Na Figura 5.5 se pode observar a temperatura no filtro de manga com 114°C.

Na operação desta usina, para a fabricação de um CA convencional com temperatura em torno de 155°, a temperatura no filtro de manga deverá estar em torno de 150°C, por analogia pretendeu-se obter uma temperatura de 120°C da massa asfáltica com a temperatura no filtro de manga estando em torno de 115°C como mostra a Figura 5.5.



Figura 5.5 – Controle de temperatura da mistura através da temperatura do filtro de manga

A aferição da temperatura do asfalto morno produzido para a pista 1 foi feita através do controle com termômetro digital tipo espeto da marca Gultron do Brasil Ltda., modelo GULTerm 180, de propriedade do LAPAV/UFRGS, introduzido na massa dentro da caçamba do caminhão, assim que ali descarregado, com se pode observar na Figura 5.6.

Porém verificou-se que esta relação não é linear, como as regulagens de temperatura dependem de ajustes no sistema de aquecimento do secador e apesar do rigoroso controle, a temperatura final da mistura ficou em torno de $114,3^{\circ}\text{C}$, como mostra a Figura 5.6.

É importante ressaltar que esta foi a primeira vez que a mistura morna deste estudo foi produzida em uma usina de asfalto e as condições, quase artesanais, promoveram dificuldades que tiveram que ser superadas, pois tudo era novo.

Apesar das dificuldades todos os passos foram previamente planejados com o laboratorista, operador da usina e operários da empresa que contribuíram para que o processo acontecesse.



Figura 5.6 - Temperatura de produção da mistura morna na usina ($114,3^{\circ}\text{C}$)

Após a caçamba do caminhão foi coberta por lona (Figura 5.7) e foi realizado o transporte até o local da execução das pistas experimentais.



Figura 5.7 – Caçamba coberta com lona para transporte da mistura morna

5.1.2 Produção da mistura morna (projeto 2) para a pista experimental 2

Os procedimentos para a produção da mistura asfáltica e execução da pista de testes referente ao projeto de mistura 2, para a pista experimental 2, ocorreram no dia 03/11/2011 e seguiram os mesmos passos da mistura 1, porém com algumas diferenças que serão relacionadas a seguir.

Em primeiro lugar, as temperaturas de usinagem e compactação foram alteradas para 130°C e 105°C respectivamente e nesta mistura foi somente utilizada a adição do teor de 0,3% de zeólita natural, portanto sem adição de cal hidratada.

Desta forma a dosagem se mostrou mais fácil e eficiente, pois em uma pequena bandeja foram dosados os 3kg de zeólitas naturais necessários para a produção de 1ton/min, sendo dispensada a mistura com 20kg de cal e a utilização de 3 carrinhos de mão, sendo utilizadas apenas duas bandejas, que foram suficientes para a execução dos serviços como se pode observar na Figura 5.8.



Figura 5.8 – Pesagem de 3kg de zeólitas naturais para inserção no misturador

A inserção da zeólita no misturador também ficou muito facilitada, pois não foi preciso a utilização de uma pá, a zeólita foi introduzida pelo operador através da mesma bandeja em que foi pesada e o controle de tempo foi realizado da mesma maneira, ou seja, através de um relógio colocado ao lado do misturador, desta forma o operador pode controlar o tempo necessário para o despejo da zeólita que estava dentro da bandeja enquanto outro operador já esperava com outra bandeja pesada e pronta para o descarregamento (Figura 5.9).



Figura 5.9 – Inserção da zeólita no misturador

Já se tinha um conhecimento prévio de que para se produzir uma mistura quente a 155°C era necessário que a temperatura no filtro de manga estivesse em torno de 150°C e de que, quando da fabricação da mistura morna 1 para obter a massa na temperatura de 114,3°C a temperatura no filtro de manga estava em 114°C. Então, foi estimado que para se obter uma mistura morna na temperatura de 130°C, como se desejava, a temperatura no filtro de mangas deveria estar próxima aos 127°C.

Desta forma a usina foi aquecida até o filtro de manga atingir a temperatura próxima de 130°C, na Figura 5.10 a temperatura estava em 127°C, porém é preciso se observar que era necessário realizar ajustes durante o processo de produção, para mais ou para menos, de forma que a temperatura se estabilizasse nos 130°C desejados.

Assim, quando a massa asfáltica morna foi produzida, dois controles de temperaturas foram realizados, um através de um termômetro digital tipo espeto da marca SALVTERM, modelo 82 J/K (Figura 5.11), introduzido na massa asfáltica morna e outro através de um termômetro digital a tipo pistola a laser, da marca GENERAL, modelo IRT 207 (Figura 5.12), dentro da caçamba do caminhão.



Figura 5.10 – Controle da temperatura no filtro de manga (127°C)

Ao final, a massa asfáltica morna foi produzida com temperatura próxima aos 131°C como se pode observar na Figura 5.11 e Figura 5.12 em medições feitas dentro da caçamba tão logo a mistura morna era despejada.



Figura 5.11 – Controle da temperatura da massa morna com termômetro tipo espeto



Figura 5.12 – Controle da temperatura da massa morna com termômetro tipo pistola a laser

Fazendo-se um ajuste de curva com as temperaturas conhecidas pode-se montar um gráfico da temperatura no filtro de manga versus temperatura da massa asfáltica que mostra o comportamento da usina utilizada (Figura 5.13).

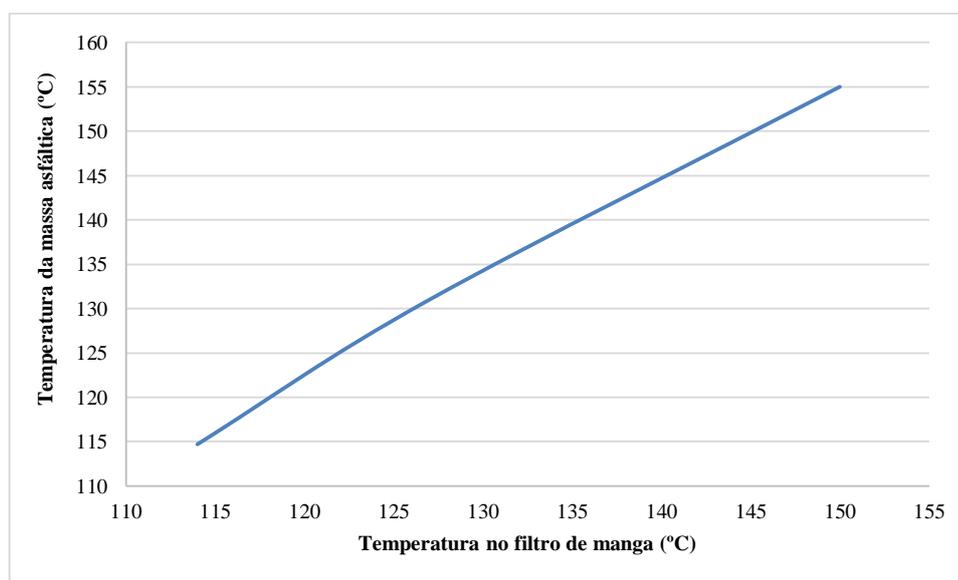


Figura 5.13 – Gráfico Temperatura no filtro de manga x Temperatura da massa asfáltica

Também foi observado que ao contrário do ocorrido quando da primeira produção, desta vez a mistura produzida não apresentou deficiência de recobrimento.

Após, o caminhão teve sua caçamba coberta por uma lona e a massa asfáltica foi transportada até o local de execução da pista experimental junto ao LAPAV/UFRGS.

5.2 CONSTRUÇÃO DAS PISTAS EXPERIMENTAIS

Para estudar o comportamento em pista das misturas mornas com adição de zeólitas naturais foram construídas 2 pistas experimentais na área de testes de pavimentos no LAPAV/UFRGS, que serão chamadas de pista 1 e pista 2 conforme podem ser observado na Figura 5.14.



Figura 5.14 – Localização da construção das pistas experimentais no LAPAV/UFRGS

Como a pista 1 foi testada apenas no lado direito no sentido do deslocamento do eixo simples de rodado duplo do simulador de tráfego do LAPAV/UFRGS, ou seja, no sentido da direita para a esquerda observado na Figura 5.14, ela será chamada apenas de “Pista 1”.

Já a pista 2 foi monitorada tanto no lado direito como no lado esquerdo, no mesmo sentido da direita para a esquerda observado na Figura 5.14, desta forma, para diferenciar os resultados, será chamada de “Pista 2 LE” os testes realizados no lado esquerdo e “Pista 2 LD” os testes realizados no lado direito.

A Área de Testes de Pavimentos fica localizada na cidade de Porto Alegre/RS, próximo à divisa com a cidade de Viamão/RS, dentro do complexo do Campus do Vale da UFRGS e a usina de asfalto da empresa COESUL, onde foram fabricadas as misturas mornas, está localizada no km 392 da BR-386, no município de Triunfo/RS, a distância percorrida pelos caminhões que transportaram as misturas mornas está representada na Figura 5.15 abaixo e tem aproximadamente 82,3km de extensão.

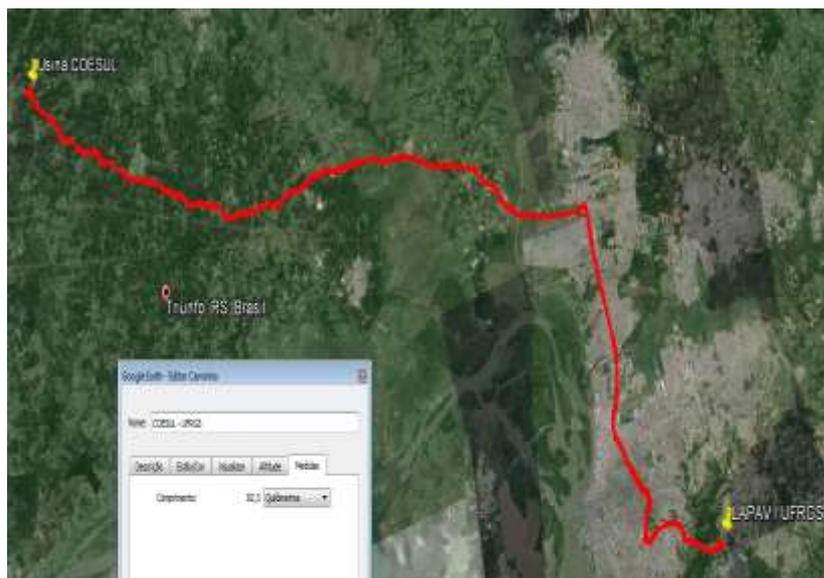


Figura 5.15 – Distância entre a usina de asfalto da COESUL e o LAPAV/UFRGS

5.2.1 Equipamentos utilizados na construção das pistas experimentais

Para a construção da pista 1, devido a se tratar de um recapeamento, foram utilizados um caminhão para transporte da massa morna, um caminhão com barra espargidora para de pintura de ligação com RR2C, uma vibro-acabadora de asfalto, um rolo compactador de pneus e um rolo compactador vibratório de chapa lisa.

Na construção da pista 2, que foi construída desde o subleito, foram utilizados, além dos equipamentos utilizados para a construção da pista 1, uma retroescavadeira, um rolo compactador tipo pé-de-carneiro, um rolo compactador com chapa vibratória lisa e pneus para compactação da base e um caminhão com barra espargidora para de imprimação da base de brita graduada com CM30.

5.2.2 Construção da pista experimental 1

O transporte da mistura morna ocorreu em caminhão com balsa traseira coberto com lona para reduzir a perda de temperatura durante o deslocamento, desde o local de produção até o local de aplicação demorou em torno de 1h30min e a temperatura média do ar no dia estava em torno de 15°C.

Durante o transporte a mistura perdeu 1,6°C de temperatura, saindo da origem com 114,3°C chegando ao local destino com 112,7°C (Figura 5.16).



Figura 5.16 – Temperatura da mistura morna ao chegar no LAPAV/UFRGS

Foi possível observar que o material que chegou à pista apresentava deficiência de recobrimento em alguns pontos (Figura 5.17 e Figura 5.18), ou seja, alguns agregados não estavam envolvidos totalmente pelo ligante asfáltico, porém, não houve razões possíveis para rejeição da mistura asfáltica morna.



Figura 5.17 – Mistura morna com deficiência de recobrimento

A escolha desta pista deveu-se as boas condições funcionais e estruturais que apresentava já que nesta primeira fase da pesquisa não se avaliou a influência do grau de deterioração da camada no desempenho da mistura morna.



Figura 5.18 – Alguns agregados não cobertos totalmente pelo ligante

A camada de revestimento existente foi preparada com uma pintura de ligação, Figura 5.19, já que esta pista experimental também foi objeto de estudo em outras pesquisas (Rohde, 2007).

Optou-se em manter a estrutura original na seção de 32 m de extensão e 3 m de largura sem a remoção de qualquer camada existente.



Figura 5.19 – Imprimação da pista existente

Antes do lançamento da mistura foram realizadas algumas preparações e inspeções na pista para garantir o sucesso do processo que estava sendo avaliado.

Nesta pista de teste foi executado um capeamento com 5cm de espessura de mistura asfáltica morna sobre uma pista existente, a pista original foi executada com uma mistura de módulo elevado (EME) recoberta por uma camada de rolamento em microrevestimento asfáltico a frio.

A Figura 5.20 apresenta um esboço da estrutura existente com a camada de mistura morna executada no topo, apesar de que a execução previa uma camada de 5cm de mistura morna, medições efetuadas na pista após a sua execução apontou que esta espessura variou entre 3cm e 6cm.

Os equipamentos utilizados na execução do novo revestimento encontravam-se calibrados e em boas condições. Foi elaborado previamente um plano de execução do serviço.

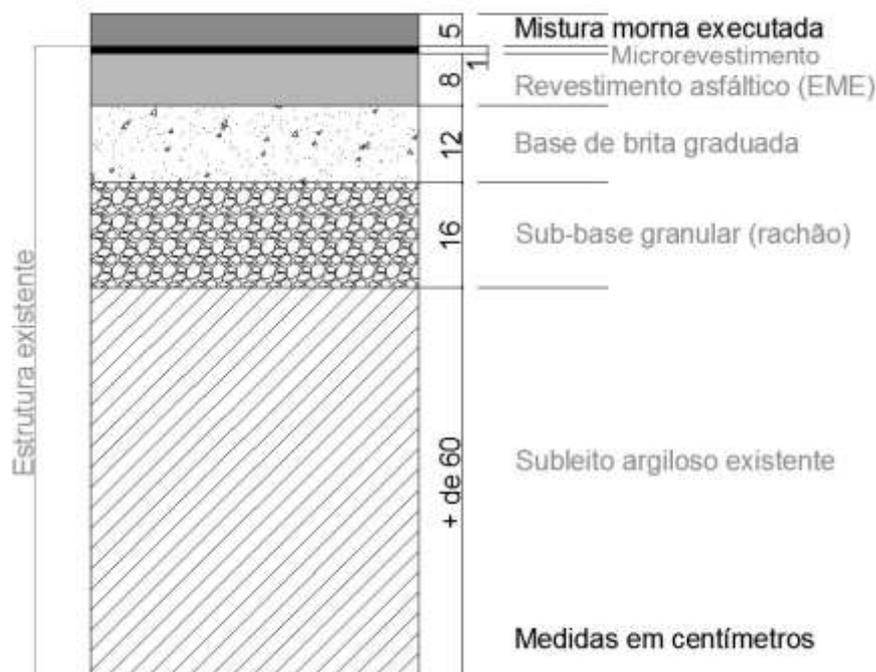


Figura 5.20 - Pista 1 - Estrutura do pavimento existente (Rohde, 2007) e capa executada com mistura morna através da adição de zeólitas naturais

Como o principal objetivo da mistura asfáltica morna é baixar a temperatura de produção e como a mistura resultante já havia sido produzida a uma temperatura inferior que a de projeto, optou-se por não esperar que a massa asfáltica chegasse a 95°C para a compactação.

O espalhamento com a vibroacabadora iniciou quando a temperatura mistura estava em torno de 109,9°C, em uma camada uniforme com espessura de 50mm na seção transversal conforme mostra a Figura 5.21, então se optou por não esperar que a massa asfáltica chegasse a 95°C para a compactação (temperatura de projeto).



Figura 5.21 - Início do espalhamento da mistura morna (109,9°C)

A compactação com rolo de pneus começou logo após o espalhamento, com a mistura morna a 107,3°C (Figura 5.22) e quando o procedimento foi concluído, o pavimento se encontrava a 86,8°C. Esta etapa foi importante para alcançar a densidade e impermeabilidade da camada.



Figura 5.22 - Início e final da compactação da mistura morna com rolo de pneus (107,3°C e 86,8°C)

No início da compactação de acabamento com rolo de chapa a temperatura da mistura era de 84,6°C e na finalização, era de 76,7°C (Figura 5.23).

Considerando-se a temperatura de 107,3°C para início da compactação e 76,7°C para o final, a temperatura média de compactação foi de 92°C, próxima à temperatura de 95°C prevista no projeto.



Figura 5.23 - Início e final da compactação da mistura morna com rolo de chapa (84,6°C e 76,7°C)

Logo, desde o lançamento da mistura na pista até a finalização da rolagem de acabamento houve uma perda de temperatura de aproximadamente 33%.

A conferência da compactação foi executada in situ e em corpos-de-prova extraídos da pista.

Verificou-se que o teor de betume era de 5,45% em vez dos 5,7% previstos no projeto e que o volume de vazios era de 5,7% em vez de 4% também de projeto, no entanto, visualmente a homogeneidade e regularidade resultantes não foram afetadas por estas observações.

A Tabela 5.1 apresenta as variações ocorridas nas temperaturas da mistura asfáltica morna desde a saída da usina até o acabamento final da pista experimental.

Tabela 5.1– Variação da temperatura da mistura asfáltica morna durante as etapas de produção e execução da pista experimental

Etapa	Temperatura
Mistura morna 1 - projeto	120,0°C
Mistura na usina	114,3°C
Mistura na chegada na pista	112,7°C
Espalhamento da mistura	109,9°C
1ª. Compactação com rolo de pneu	107,3°C
Finalização da 1ª. Compactação	86,8°C
2ª. Compactação com rolo de chapa	84,6°C
Finalização da 2ª. Compactação	76,7°C
Temperatura de compactação - projeto	95,0°C
Temperatura média de compactação	92,0°C

Nos ensaios de laboratório, os valores de módulo de resiliência das misturas asfálticas mornas foram inferiores ao da mistura asfáltica convencional, no entanto, todos ficaram entre os valores típicos para concretos asfálticos.

Quanto à produção na usina de asfalto, o manuseio dos materiais componentes das misturas (zeólitas e cal), as regulagens de temperatura e o sistema artesanal de produção exigiram cuidados especiais.

A usina do tipo Drum-mixer foi alterada de maneira que a mistura dos materiais fosse executada no misturador instalado ao lado da usina e não dentro do tambor.

Como em laboratório, os agregados que compõem as misturas foram os responsáveis pela diminuição da temperatura de produção das misturas, ou seja, houve um ajuste nas regulagens no sistema de aquecimento do secador de agregados para resultar em uma mistura morna próxima a de projeto (120°C).

Apesar de todo controle, a temperatura final ficou em torno de 114,3°C. Com isso verificou-se que é importante à formação de pessoal para a gestão de todo o processo.

A produção da mistura asfáltica morna não comprometeu a sincronia de produção da massa em usina, o lançamento em pista e a sequência de compactação.

A camada final apresentou-se homogênea e sem irregularidades aparentes.

Sob o ponto de vista executivo, a faixa de temperatura usada não comprometeu a aplicação e rolagem da mistura asfáltica morna.

Muito importante dizer, segundo os relatos dos operários do canteiro de obra, a utilização desta técnica melhora muito a segurança e as condições de trabalho em campo de quem têm que lidar, no mínimo, 8 horas diárias a céu aberto com temperatura elevada.

Porém talvez mais importante se a capacidade de transporte da massa asfáltica a mais longas distâncias, lembramos que o transporte demorou em torno de 1h30min e a temperatura média do ar no dia estava em torno de 15°C e que, durante o transporte a mistura perdeu 1,6°C de temperatura, saindo da origem com 114,3°C chegando ao local destino com 112,7°C.

Tonial (2011) apresenta uma sugestão de tempo máximo para a aplicação da massa asfáltica em função da temperatura de usinagem (Figura 5.24), condição pelo qual o autor entende que a viscosidade do CAP a 60°C na massa logo após sua aplicação se situará entre 7.000 e 12.000 Poise, considerada ideal para pavimentação.

Nesta tabela, observa-se que menores temperaturas de produção permitem um tempo maior para a aplicação, e este fator é de fundamental importância uma vez que permitem distâncias de transporte maiores, justificadas devido a construção de rodovias ou mesmo de vias urbanas em locais afastados das usinas de asfalto e, nestes casos, não seria necessário elevação de custos com a utilização de usinas móveis para fornecimento de misturas asfálticas.



Figura 5.24—Gráfico temperatura de usinagem x tempo máximo para aplicação da massa asfáltica
Fonte: Tonial (2011)

5.2.3 Construção da pista experimental 2

A pista 2 foi totalmente construída a partir do subleito (figura 5.24), com estrutura de pavimento similar à outras que tem sido utilizadas na construção de algumas grandes avenidas de Porto Alegre de acordo com informações da Secretaria Municipal de Obras e Viação (SMOV) da PMPA.

Desta forma, decidiu-se por uma estrutura de 10cm de WMA sobre uma camada de 30cm de brita graduada, porém da mesma forma ocorrida quando da execução da pista 1, ao serem feitas medições na pista após a sua execução verificou-se que esta espessura variou entre 8cm e 11cm.

Este conjunto estrutural, revestimento em WMA + Base de Brita Graduada, foi construído sobre um subleito argiloso de boa qualidade, com mais de 60cm de espessura, pré-existente na área de testes de pavimentos do LAPAV/UFRGS.

A Figura 5.25 mostra a estrutura construída para a realização dos testes acelerados junto ao simulador de tráfego.

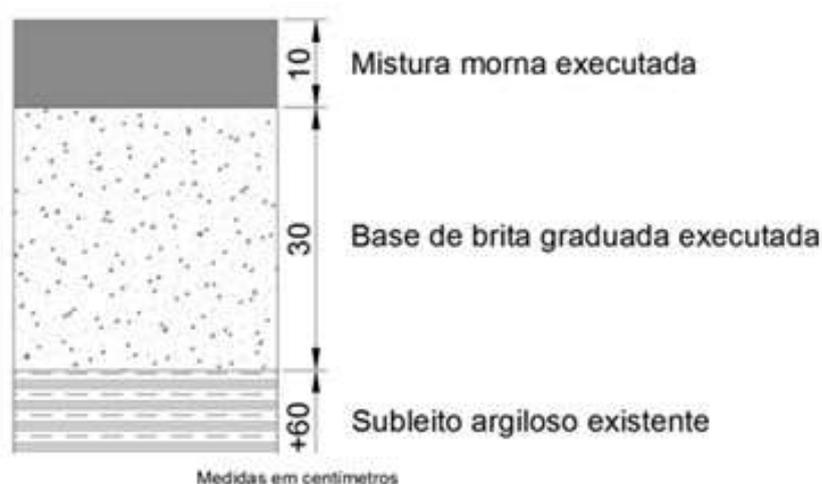


Figura 5.25 - Estrutura do subleito existente e pavimento executado.

Assim a pista foi escavada e o subleito argiloso compactado com rolo compressor tipo “pata curta” até que fosse atingida a compactação adequada para este tipo de material conforme se observa na Figura 5.26.



Figura 5.26 - Pista 2 – Compactação do subleito argiloso.

Para verificar se a compactação e se a camada do subleito estava de acordo foi realizada investigação com viga benkelman (Figura 5.27), foram realizadas leituras de deflexão em 6 pontos na trilha interna e externa para avaliar as condições de compactação e deformabilidade da camada argilosa.



Figura 5.27 - Pista 2 – Verificação do subleito argiloso com viga benkelman

A média dos valores encontrados foram de 78×10^{-2} mm para a trilha interna, no lado direito (lado LAPAV) e 80×10^{-2} mm para a externa, lado esquerdo (lado Av. Bento Gonçalves), que apontou que o subleito estava em condições de receber a camada de base do pavimento.

Após as etapas de escavação e regularização e compactação do subleito foi realizado o espalhamento da base de brita graduada (Figura 5.28), e a sua compactação em duas camadas de 15cm (Figura 5.29).

A seguir foi realizado o espalhamento e compactação da base de brita graduada em duas camadas de 15cm para a obtenção da camada de 30cm prevista para o experimento.



Figura 5.28 – Espalhamento da base de brita graduada



Figura 5.29 – Compactação da base de brita graduada

Após a compactação da segunda camada de brita graduada foi feita a conferência do pavimento através do controle de deflexões da via benkelman (Figura 5.30) e do ensaio de grau de compactação da base através do método do frasco de areia (Figura 5.31).

A média dos valores encontrados foram de 66×10^{-2} mm para a trilha interna e 72×10^{-2} mm para a externa, que apontou que o subleito estava em condições de receber a camadas de revestimento asfáltico com mistura morna.



Figura 5.30 – Verificação da base de brita graduada através da viga benkelman



Figura 5.31 – Controle do grau de compactação base de brita graduada através do método do frasco de areia

Concluída a etapa da base brita graduada a mesma foi imprimada com RR2C através de caminhão com régua espargidora (Figura 5.32), e a pista de testes ficou pronta para receber a camada de WMA.



Figura 5.32 – Imprimação da base de brita graduada

As camadas de pavimento neste experimento foram executadas em uma pista de 3m de largura por 30m de comprimento na continuidade da pista 1 anteriormente testada (Figura 5.33).



Figura 5.33 - Pista 2 – Pista 1 e preparação da pista 2

Após a conclusão da imprimação asfáltica, a base de brita graduada estava pronta para receber a camada de mistura morna, desta maneira após o processo de usinagem, como já mostrado, quando a mesma foi fabricada na temperatura de aproximadamente 130°C, o caminhão contendo a mistura morna devidamente coberta por lona se deslocou da usina de asfalto até a pista de testes no LAPAV/UFRGS.

A mistura asfáltica morna chegou ao local de aplicação com a temperatura de 128,6°C, como se pode observar na Figura 5.34.



Figura 5.34 – Medida de temperatura na caçamba na chegada ao LAPAV

Verifica-se novamente a pouca perda de temperatura durante o trajeto, que neste teste foi de 2,4°C, pois foi usinada a 131°C, porém o tempo de transporte foi maior, em torno de 2h30min, uma vez que a massa foi usinada no final da manhã e que entre o carregamento e a chegada no LAPAV/UFRGS o caminhoneiro fez uma pausa para almoço, neste dia a temperatura do ar estava em torno de 21°C.

O espalhamento com a vibroacabadora iniciou quando a temperatura mistura estava em torno de 122,2°C, em uma primeira camada uniforme com espessura de 50mm na seção transversal conforme mostra a Figura 5.35, então se optou por não esperar que a massa asfáltica chegasse a 105°C para a compactação (temperatura de projeto).



Figura 5.35 - Início do espalhamento da mistura morna na primeira camada (122,2°C)



Figura 5.36 - Compactação da mistura morna na primeira camada (111,7°C)

A compactação com rolo de pneus, na primeira camada, começou logo após o espalhamento, com a mistura morna a 111,7°C (Figura 5.36) e foi concluída a 97,5°C(Figura 5.37).



Figura 5.37 - Final da compactação da mistura morna na primeira camada (97,5°C)

O espalhamento da segunda camada, com outros 50mm de espessura ocorreu com temperatura próxima dos 106,4°C (Figura 5.38)



Figura 5.38 - Espalhamento da segunda camada (106°C)

E na conclusão, após compactação de acabamento com rolo de chapa, a temperatura da mistura era de 95°C (Figura 5.39).

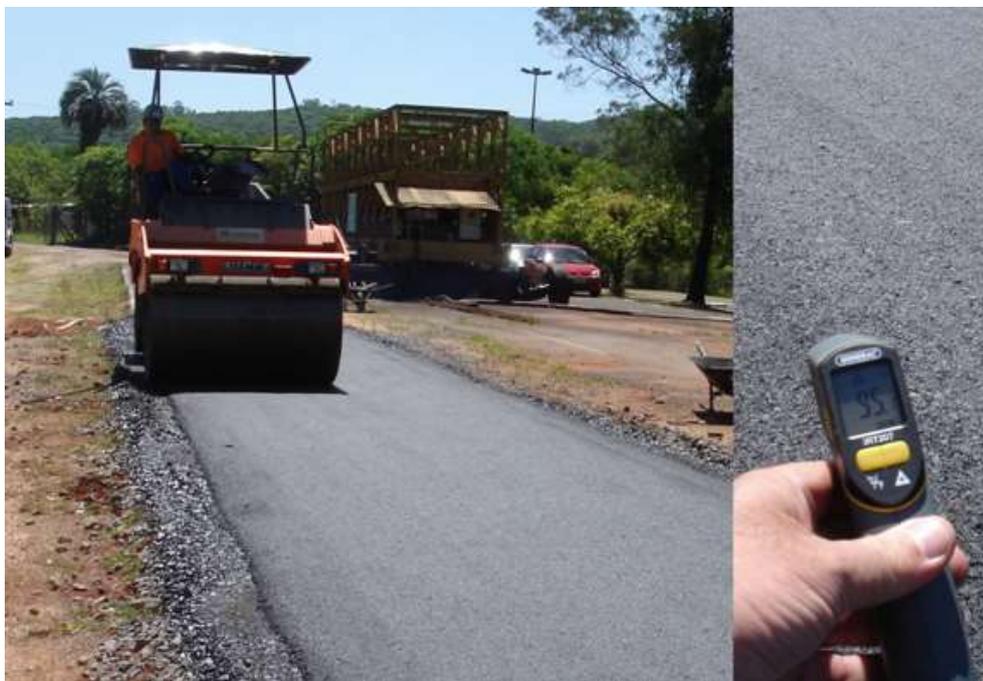


Figura 5.39 - Final da compactação da mistura morna com rolo de chapa (95°C)

Considerando-se a temperatura de 111,7°C para início da compactação e 95°C para o final, a temperatura média de compactação foi de, 103,4°C, próxima à temperatura de 105°C prevista no projeto.

Logo, desde o lançamento da mistura na pista até a finalização da rolagem de acabamento houve uma perda de temperatura de aproximadamente 22,3%.

Verificou-se posteriormente em análises laboratoriais que o teor de betume da extração da mistura de execução estava um pouco acima do previsto no projeto e que o volume de vazios estava um pouco abaixo do teor o projeto, no entanto, visualmente a homogeneidade e regularidade resultantes não foram afetadas por estas observações.

A Tabela 5.2 apresenta as variações ocorridas nas temperaturas da mistura asfáltica morna desde a saída da usina até o acabamento final da pista experimental.

Tabela 5.2– Variação da temperatura da mistura asfáltica morna durante as etapas de produção e execução da pista experimental

Etapa	Temperatura
Mistura morna 2 - projeto	130,0°C
Mistura na usina	131,0°C
Mistura na chegada na pista	128,6°C
Espalhamento da mistura	122,2°C
Compactação com rolo de pneu (1ª camada)	111,7°C
Compactação com rolo de pneu (2ª camada)	106,0°C
Finalização da compactação com rolo chapa	95,0°C
Temperatura de compactação - projeto	105,0°C
Temperatura média de compactação	103,4°C

Nos ensaios de laboratório, os valores de módulo de resiliência das misturas asfálticas mornas foram inferiores ao da mistura asfáltica convencional, no entanto, todos ficaram entre os valores típicos para concretos asfálticos.

Quanto à produção na usina de asfalto, o manuseio do material componente da mistura (zeólitas), as regulagens de temperatura e o sistema artesanal de produção exigiram cuidados especiais.

A usina do tipo Drum-mixer foi alterada de maneira que a mistura dos materiais fosse executada no misturador instalado ao lado da usina e não dentro do tambor.

Como em laboratório, os agregados que compõem as misturas foram os responsáveis pela diminuição da temperatura de produção das misturas, ou seja, houve um ajuste nas regulagens no sistema de aquecimento do secador de agregados para resultar em uma mistura morna próxima a de projeto (130°C).

Através do controle, a temperatura final ficou em torno de 131,0°C, verificando-se com isso a importância da formação de pessoal para a gestão de todo o processo.

A produção da mistura asfáltica morna não comprometeu a sincronia de produção da massa em usina, o lançamento em pista e a sequência de compactação.

A camada final apresentou-se homogênea e sem irregularidades aparentes.

Sob o ponto de vista executivo, a faixa de temperatura usada não comprometeu a aplicação e rolagem da mistura asfáltica morna.

6 MONITORAMENTO DAS PISTAS EXPERIMENTAIS EXECUTADAS COM MISTURA MORNA ATRAVÉS DA ADIÇÃO DE ZEÓLITAS NATURAIS

Completa-se a pesquisa com a avaliação da degradação do pavimento através da atuação do trem de cargas do Simulador de Tráfego DAER/UFRGS, monitorada através do histórico de carregamento, parâmetros ambientais, resposta estrutural e parâmetros de comportamento que serão descritos nos subitens a seguir.

6.1 MONITORAMENTO DA PISTA 1

A seção central do simulador de tráfego, de número 5 (Figura 6.1), por estar localizada em um ponto em que a velocidade, apesar de baixa, é constante e fluente, foi a escolhida como seção de monitoramento (seção de controle), evitando-se assim o trecho de aceleração e o de frenagem.

Na análise dos afundamentos por trilha da rodas (ATR) também foram consideradas uma seção antes (seção 4) e uma seção depois (seção 6) da seção central de controle.

Esta pista foi testada somente no lado direito, como mostra a Figura 6.1, em função disto será chamada apenas de “Pista 1”, um esquema das dimensões da pista 1, suas seções e funcionamento do trem de carga está mostrado na mesma figura.

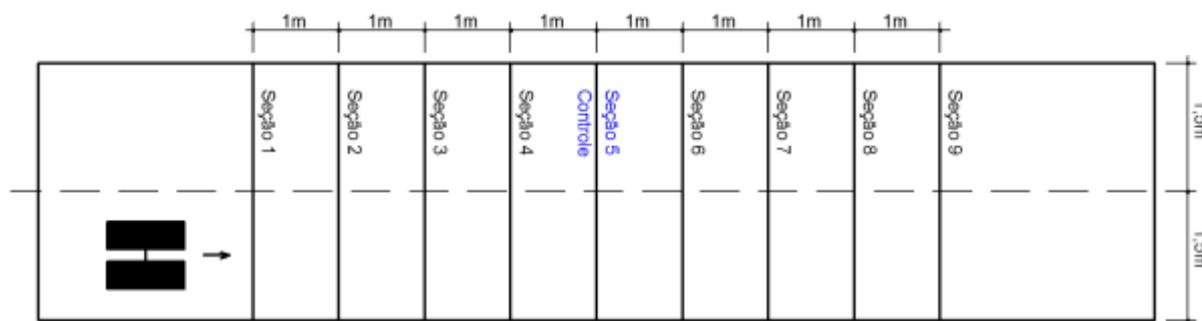


Figura 6.1 – Esquema da pista de testes 1

6.1.1 Histórico do carregamento – Pista 1

A pista 1 foi construída no dia 09/04/2010 e os testes acelerados foram realizados entre os dias 23/08/2010 e 30/11/2010, totalizando 100 dias onde foram aplicados 103.471 ciclos de uma carga de 82kN do eixo simples de rodado duplo, com pressão de inflação dos pneus de 0,56MPa (80psi), do simulador de tráfego do LAPAV/UFRGS.

A figura 6.2 mostra a evolução do carregamento ao qual a pista 1 foi submetida durante o período de testes.

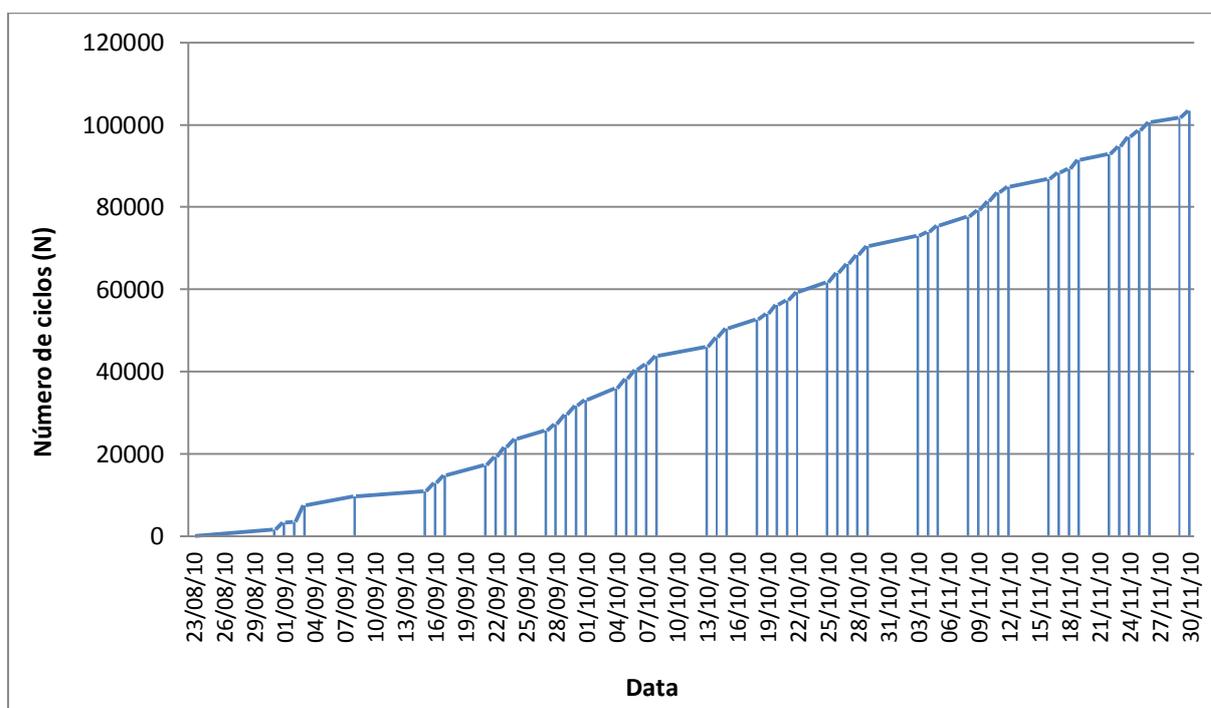


Figura 6.2 – Pista 1 – Evolução do carregamento

6.1.2 Parâmetros ambientais – Pista 1

As características das solicitações do tráfego e as condições climáticas influenciam diretamente o desempenho de um pavimento. Precipitações pluviométricas significativas podem causar queda da capacidade de suporte, acelerando a deterioração do pavimento, provocando maiores deslocamentos, danos estruturais e de superfície. Da mesma forma a viscosidade de ligantes asfálticos e a resistência de misturas à deformações permanentes podem ser reduzidas quando o mesmo for submetido a altas temperaturas. Trincamentos por retração e menor resistência ao trincamento por fadiga devido ao endurecimento do material podem ser consequências de temperaturas reduzidas (BERNUCCI ET AL, 2008).

O controle pluviométrico durante o período de testes foi realizado através de informações oficiais adquiridas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), no 8º Distrito de Meteorologia, em Porto Alegre, localizado na Av. Prof. Cristiano Fischer, 1297, distante 5,8km do local das pistas de testes acelerados do LAPAV/UFRGS, distância considerada reduzida e satisfatória para aceitação dos dados.

A Tabela 6.1 apresenta as chuvas que ocorreram durante os testes acelerados na pista 1, podemos observar que durante os 100 dias de testes ocorreram chuvas em 21 dias, sendo que somente no mês de setembro/2010 a média de precipitação mensal superou a média histórica.

Durante aproximadamente 21% do período de testes houve dias de chuva em maior ou menor intensidade.

Também se observa na Tabela 6.1 que em todas as datas em que foram feitas medidas de deflexões com a viga eletrônica não houve chuvas nem no dia da medição nem em pelo menos dois dias anteriores, preservando a qualidade do resultado.

Durante aproximadamente 21% do período de testes houve dias de chuva em maior ou menor intensidade.

Também se observa na Tabela 6.1 que em todas as datas em que foram feitas medidas de deflexões com a viga eletrônica não houve chuvas nem no dia da medição nem em pelo menos dois dias anteriores, preservando a qualidade do resultado.

Tabela 6.1 – Controle de chuvas durante acelerados na Pista 1
 Fonte: INMET - 8º Distrito de Meteorologia - Porto Alegre

Pluviômetro - Medição Diária (mm) 2010								
DIA	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov
01	0,00	0,00	2,00	1,00	22,50	0,00	0,00	0,00
02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,00	0,00	0,00
03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	51,00	0,00	0,00
04	0,00	14,50	0,00	0,00	0,00	22,50	0,00	0,00
05	2,50	2,50	15,00	0,00	7,50	0,00	0,00	0,00
06	2,50	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,00
07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,50	0,00
08	2,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,00	0,00
09	0,00	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,00
11	0,00	23,50	2,00	0,00	0,00	8,00	0,00	0,00
12	0,00	11,00	0,00	30,00	10,00	14,00	0,00	0,00
13	0,00	7,50	0,00	14,50	0,00	33,00	0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,00	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,00
16	0,00	0,00	45,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,00	2,50	32,50	2,50	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,00	25,00	18,00	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	8,00	0,00	0,00	45,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	0,00	7,50	0,00	25,00	0,00	7,50	0,00	0,00
22	7,50	0,00	0,00	2,50	0,00	8,00	0,00	0,00
23	24,50	0,00	0,00	35,00	0,00	0,00	10,00	25,00
24	0,00	5,00	1,00	0,00	0,00	15,00	0,00	22,50
25	0,00	15,00	85,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,50
26	22,50	2,00	0,00	8,00	7,50	0,00	0,00	0,00
27	5,50	2,50	0,00	8,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28	0,00	2,00	1,00	0,00	45,00	0,00	0,00	2,50
29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,00	0,00	0,00	0,00	2,50	0,00	0,00	0,00
31		2,50		0,00	0,00		0,00	
Mensal	75,50	133,00	203,50	184,50	99,00	188,00	42,50	74,50
Média Histórica	86,10	94,60	132,70	121,70	140,00	139,50	114,30	104,20
Diferença Média	-10,60	38,40	70,80	62,80	-41,00	48,50	-71,80	-29,70

	Valores Inferiores a média histórica
	Valores Superiores a média histórica
	Período de testes - pista 1
	Datas de medições de deflexões com viga eletrônica

Na Figura 6.3e Figura 6.4 podemos observar as temperaturas médias compensadas, as temperaturas mínimas e temperaturas máximas durante o período do experimento.

Nas mesmas figuras é possível verificar os dias em que foram feitas as medidas de deflexões com a viga eletrônica dentro do contexto das temperaturas da época de cada medição.

Já na Figura 6.5 é possível observar que as maiores precipitações ocorreram no início do carregamento, até aproximadamente 20.000 ciclos.

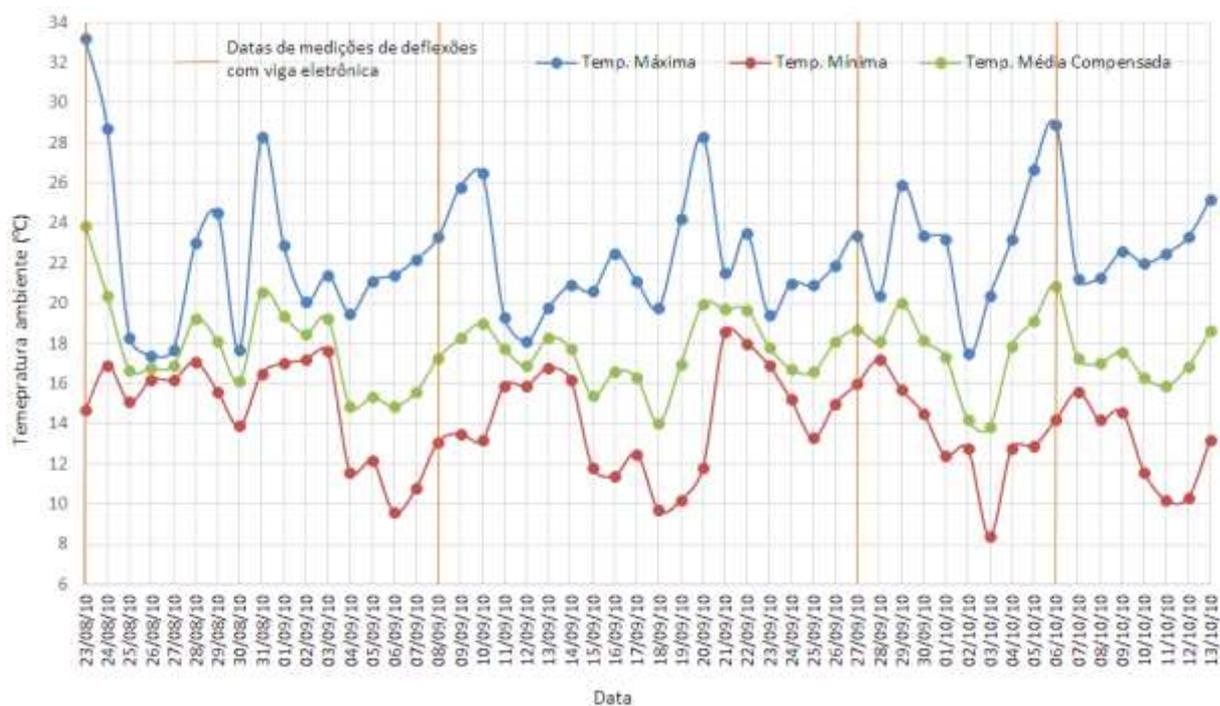


Figura 6.3 – Pista 1 – Temperaturas ambiente diárias
Fonte: INMET – 8° Distrito de Meteorologia

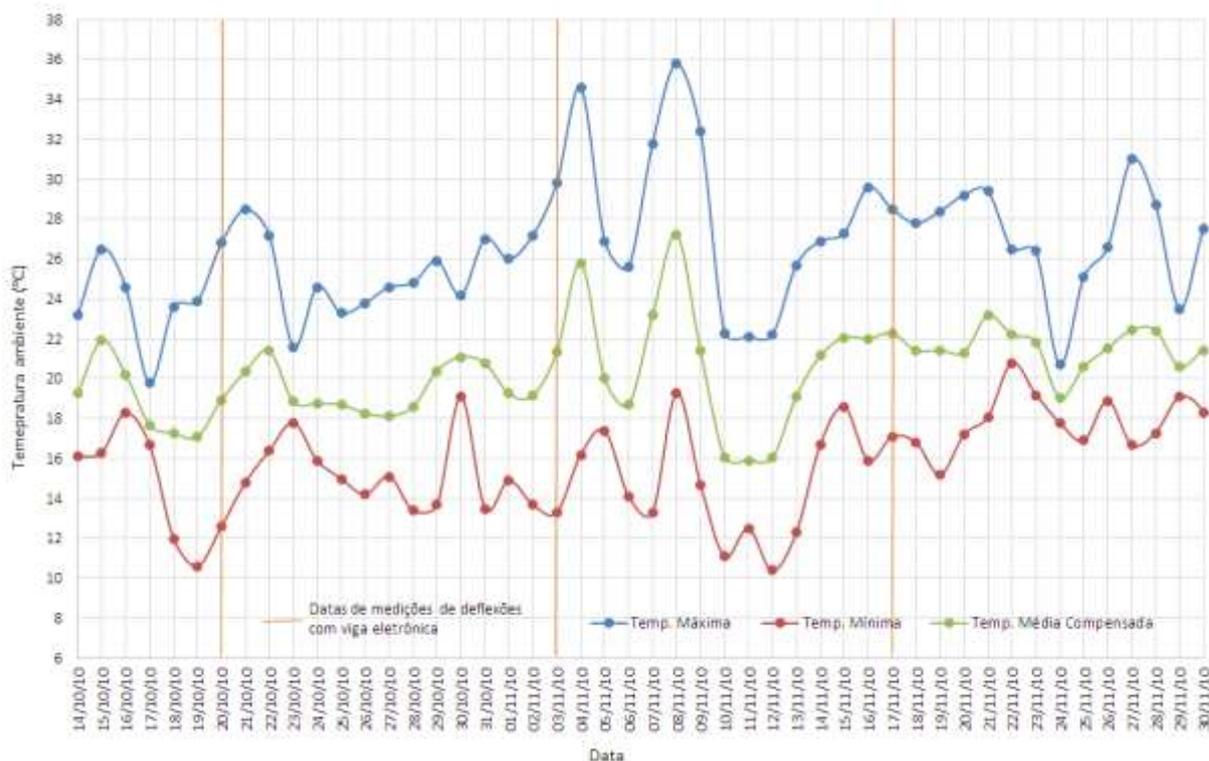


Figura 6.4 – Pista 1 – Temperaturas ambiente diárias
Fonte: INMET – 8° Distrito de Meteorologia

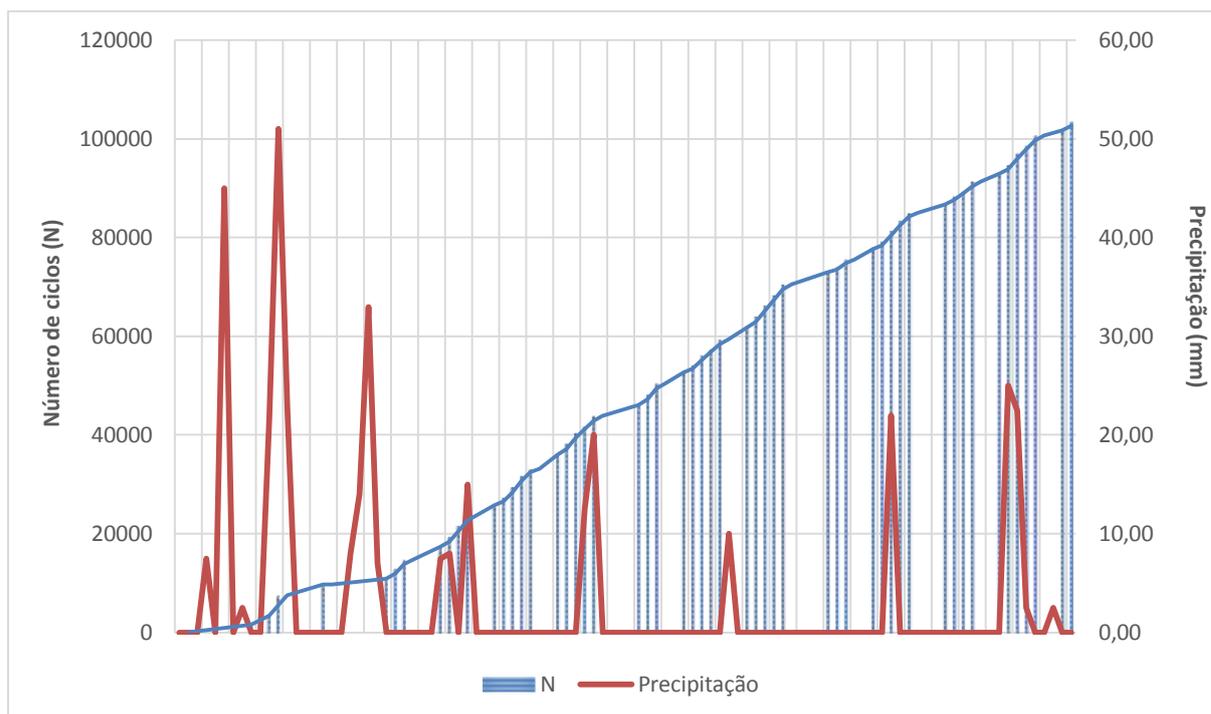


Figura 6.5 – Pista 1 – Precipitações pluviométricas durante o carregamento

6.1.3 Resposta Estrutural – Pista 1

As medidas de deflexão são utilizadas, entre outras coisas, para a determinação da vida útil remanescente de um pavimento, controle de qualidade estrutural de camadas em execução e determinação das condições de um pavimento rodoviário.

No caso desta pesquisa foi utilizado o controle através de viga benkelman eletrônica, marca Solotest, de propriedade do LAPAV/UFRGS, e os resultados estão mostrados a seguir. Os gráficos foram obtidos em medições feitas de 5cm em 5cm até uma distância aproximada de 3m do ponto de deflexão máxima (D_{25}).

Da Figura 6.6 à Figura 6.12 são mostrados os gráficos que mostram as deflexões do pavimento para os números N de repetições do eixo padrão de 82kN iguais a 0, 9.980, 25.750, 40.491, 56.206, 72.971 e 88.453 e o raio de curvatura de cada medida.

A Figura 6.6 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para $N=0$, em medições na seção 5 da pista 1 em 23/08/2010, no momento a temperatura da pista era de 19°C , porém as deflexões foram corrigidas para 20°C .

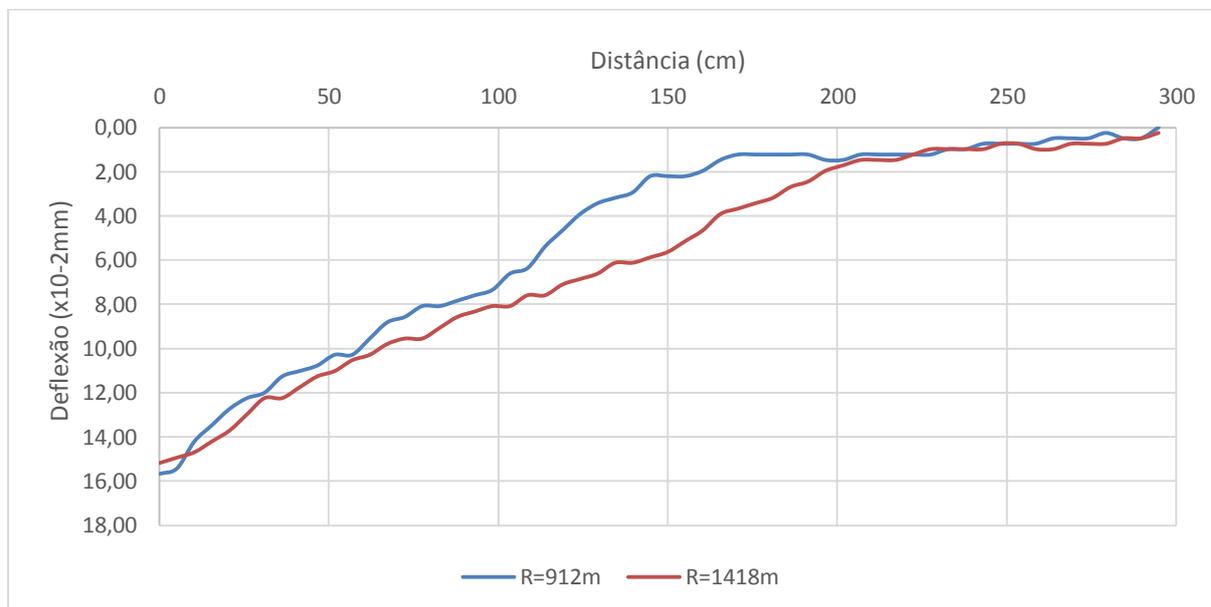


Figura 6.6 – Pista 1: Deflexão e raio de curvatura para $N=0$ (Seção 5)

A Figura 6.7 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para $N=9680$, em medições na seção 5 da pista 1 em 08/09/2010, no momento a temperatura da pista era de 21°C , porém as deflexões foram corrigidas para 20°C .

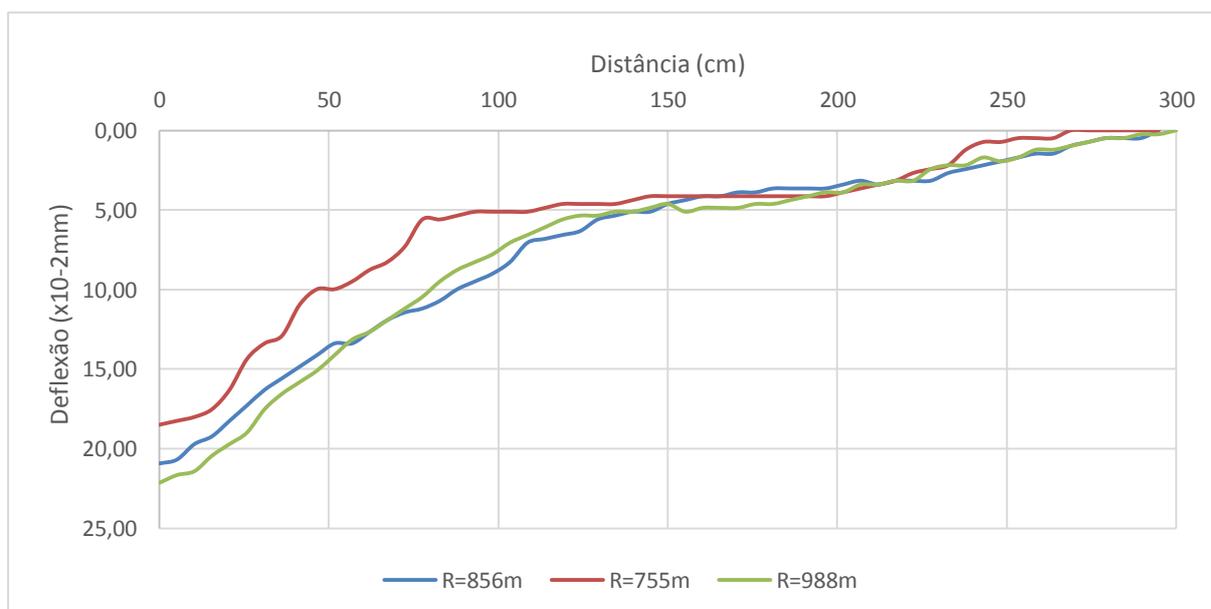


Figura 6.7 – Pista 1: Deflexão e raio de curvatura para $N=9680$ (Seção 5)

A Figura 6.8 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para $N=25750$, em medições na seção 5 da pista 1 em 27/09/2010, no momento a temperatura da pista era de 20°C , porém as deflexões foram corrigidas para 20°C .

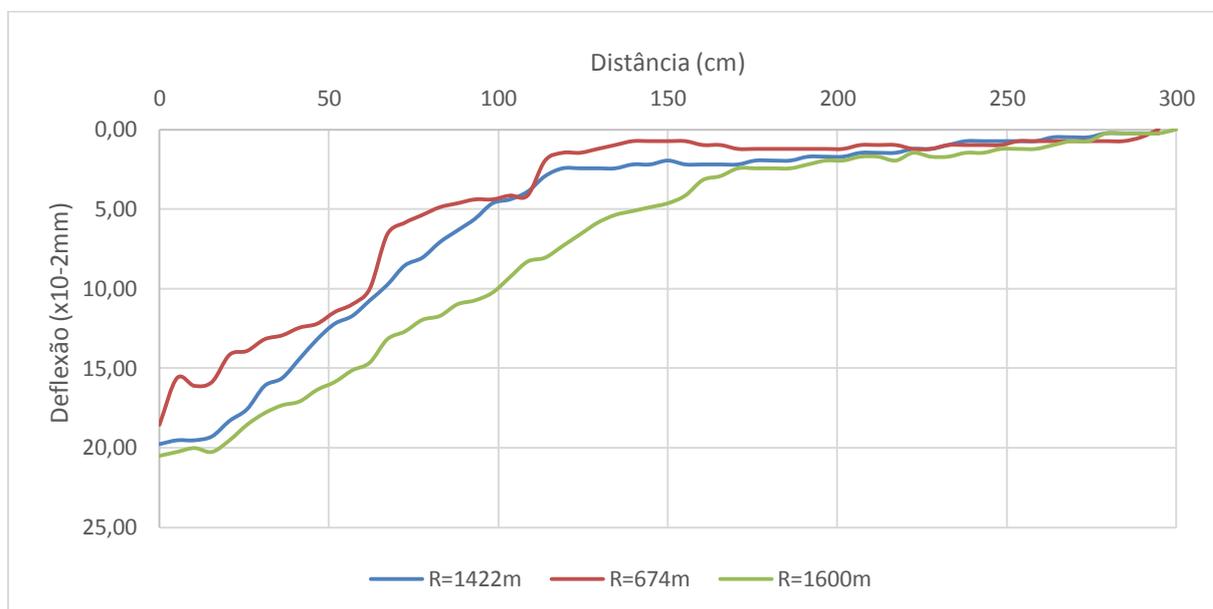


Figura 6.8 – Pista 1: Deflexão e raio de curvatura para $N=25750$ (Seção 5)

A Figura 6.9 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para $N=40491$, em medições na seção 5 da pista 1 em 06/10/2010, no momento a temperatura da pista era de 20°C , porém as deflexões foram corrigidas para 20°C .

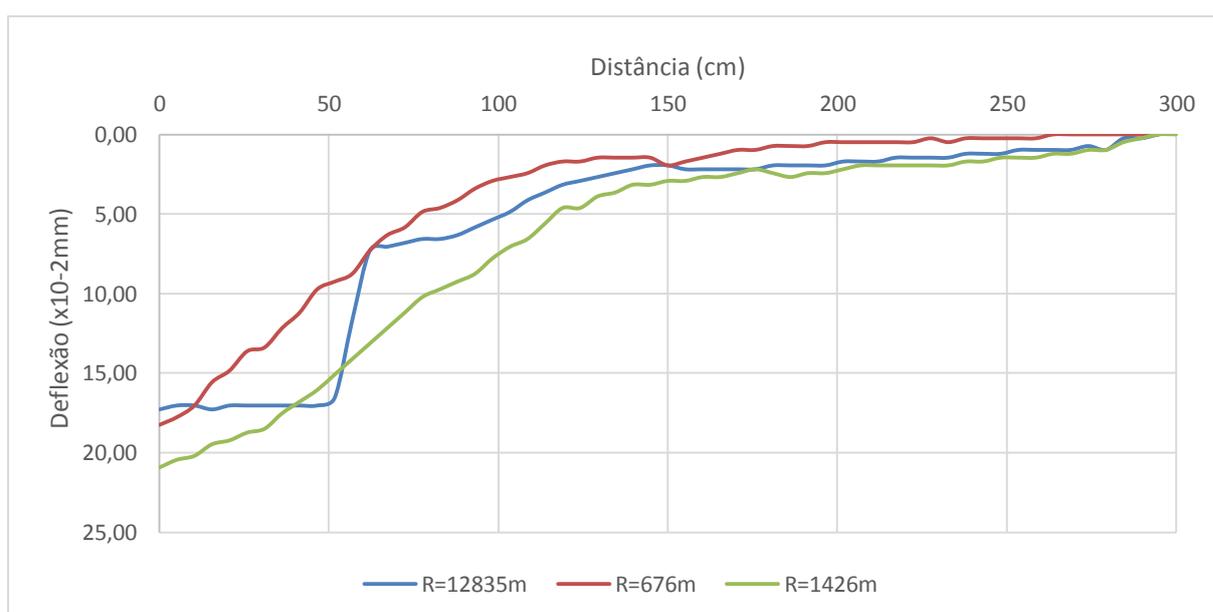


Figura 6.9 – Pista 1: Deflexão e raio de curvatura para $N=40491$ (Seção 5)

A Figura 6.10 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para N=56206, em medições na seção 5 da pista em 20/10/2010, no momento a temperatura da pista era de 24,6°C, porém as deflexões foram corrigidas para 20°C.

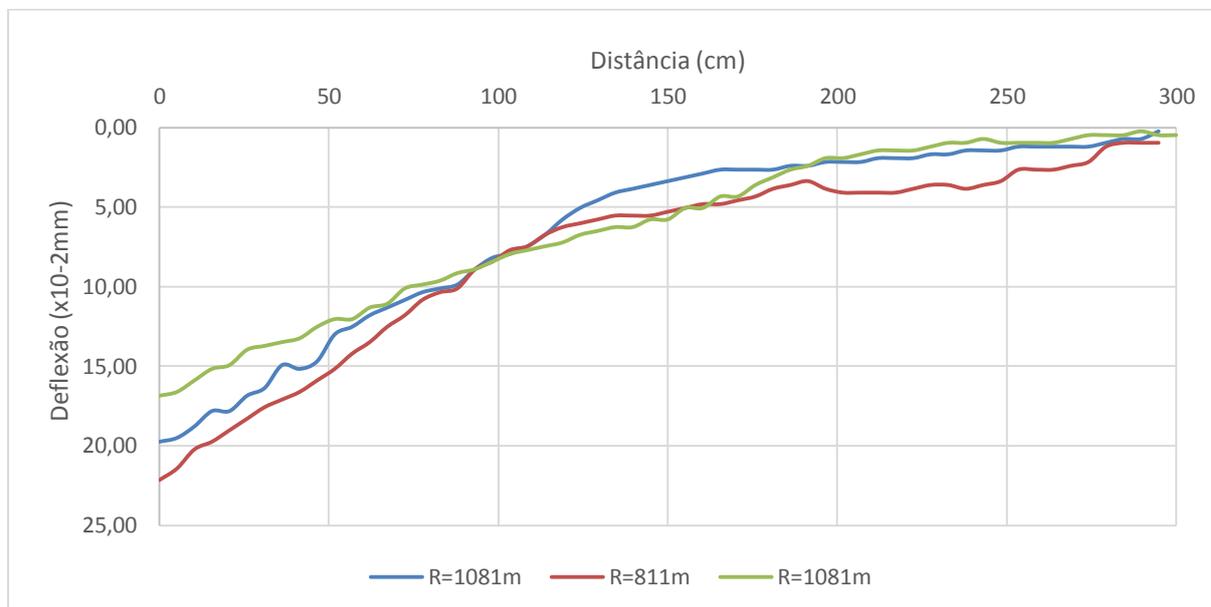


Figura 6.10 – Pista 1: Deflexão e raio de curvatura para N=56206 (Seção 5)

A Figura 6.11 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para N=72971, em medições na seção 5 da pista 1 em 03/11/2010, no momento a temperatura da pista era de 22,3°C, porém as deflexões foram corrigidas para 20°C.

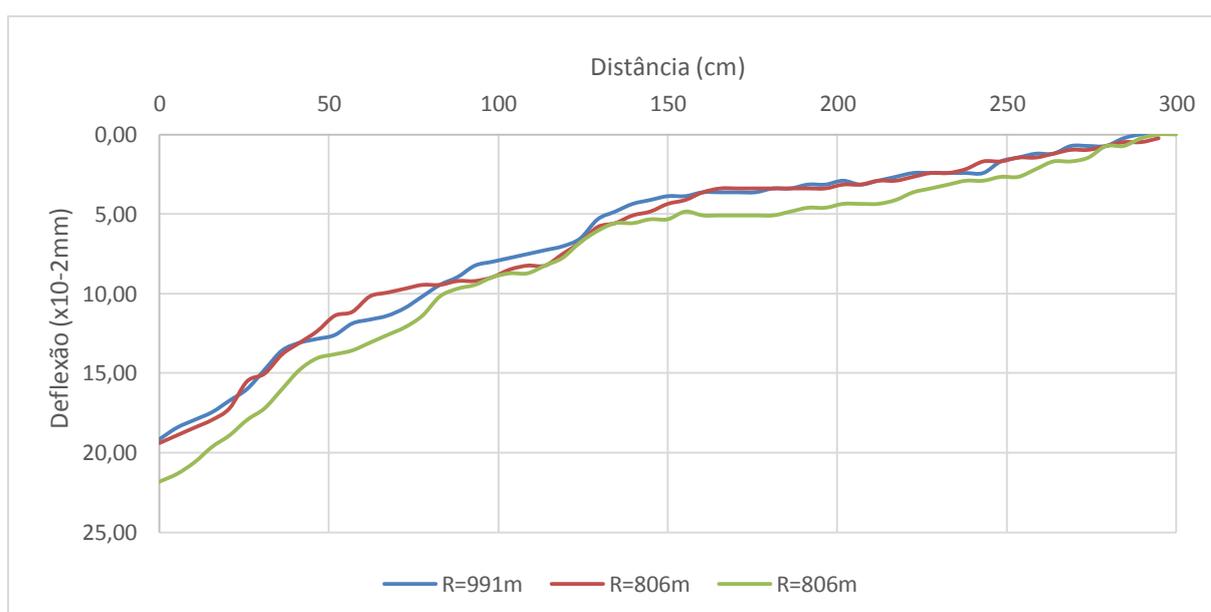


Figura 6.11 – Pista 1: Deflexão e raio de curvatura para N=72971 (Seção 5)

A Figura 6.12 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para N=88453, em medições na seção 5 da pista 1 em 17/11/2010, no momento a temperatura da pista era de 26°C, porém as deflexões foram corrigidas para 20°C.



Figura 6.12 – Pista 1: Deflexão e raio de curvatura para N=88453 (Seção 5)

A seguir, na Tabela 6.2, se apresenta um quadro resumo com as deflexões mais significativas para cada N estudado junto à seção de controle (seção 5), na Figura 6.13 é possível observar o histórico e evolução das deflexões máximas ao longo do carregamento na mesma seção.

Tabela 6.2– Valores de deflexão e raio de curvatura para diferentes N – Pista 1

N	Deflexão (mm.10 ⁻²)	Raio de Curvatura (m)
0	15,67	912
9680	20,93	856
25750	18,55	674
40491	18,26	676
56206	22,16	811
72971	21,82	806
88453	17,99	1629

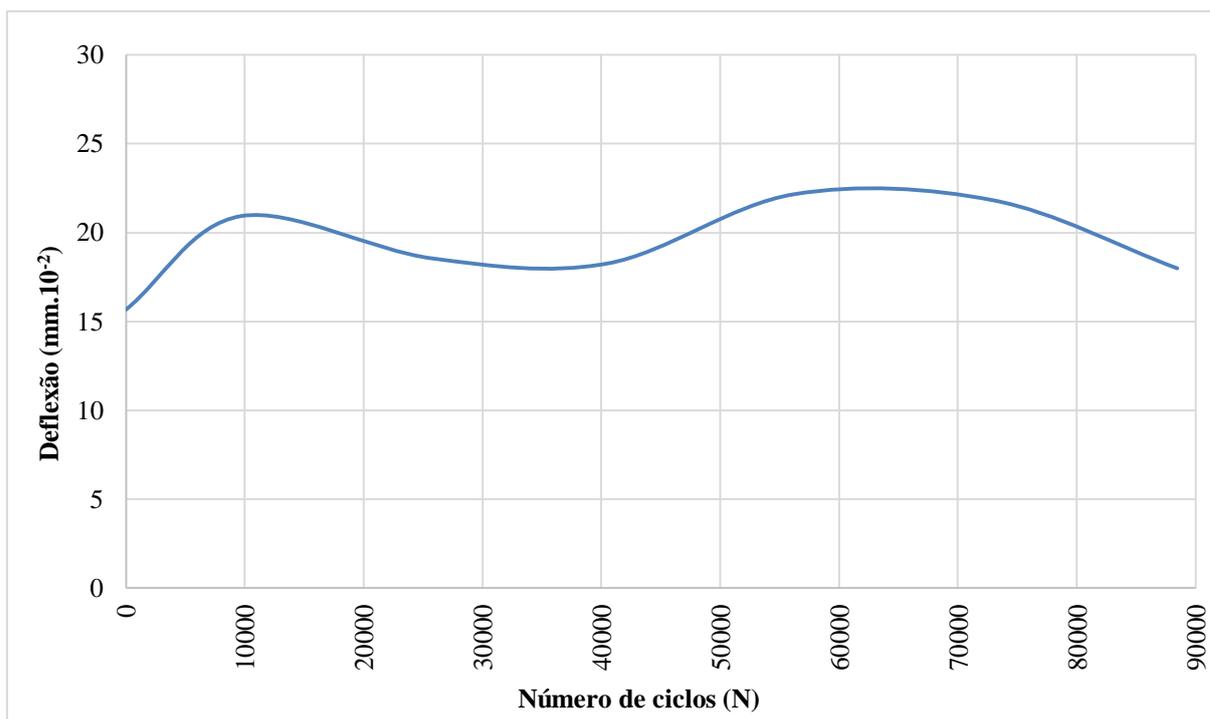


Figura 6.13 – Pista 1: Histórico de deflexões máximas (Seção 5)

6.1.4 Parâmetros de Comportamento – Pista 1

Observando os resultados do perfilógrafo do LAPAV/UFRGS, que produz um gráfico com escala horizontal reduzida, na ordem de 1:10 e escala vertical em verdadeira grandeza, ou seja, 1:1 na seção de controle (seção 5), verifica-se que o afundamento causado pelo trilho de rodas é pouco ou quase nada notado.

Sobretudo aparecem algumas alterações para o N final, em torno de 88.000 ciclos e que oscilam entre 1mm e 2mm porém muito pouco perceptíveis.

Este comportamento era esperado por a pista experimental ter sido construída sobre outra pista experimental pré-existente e executada em sua camada final em CA de elevado módulo de elasticidade.

Some-se a este fator que a camada construída possuía baixa espessura e um projeto de mistura de granulometria mais grossa, com maior quantidade de brita 3/4", o que auxilia na resistência ao afundamento por trilho de rodas.

Por outro lado também foi possível observar que em alguns pontos na superfície houve o descolamento de alguns agregados, que entendemos explicado pela deficiência de CAP na mistura executada, uma vez que era possível se observar quando da produção que a mistura morna se mostrava com deficiência de recobrimento, ou seja, que alguns agregados não estavam totalmente recobertos pelo ligante.

Também foi possível, observando-se detalhadamente o pavimento, observar pequenos trincamentos de execução que não foram suficientes para que algum dano maior como abertura de buracos/panelas ou descolamentos acontecessem. Em uma visão superior a média distância não é possível a observação de defeitos na superfície do pavimento.

Todavia o capeamento executado mostrou bom desempenho para o N de ensaiado, na Figura 6.14e Figura 6.15a seguir observa-se a aparência final do pavimento, na seção central de controle, após um N de 103471 ciclos.



Figura 6.14 – Pista 1, aparência final da pavimento após N de 103471 ciclos.



Figura 6.15 – Pista 1, aparência final da pavimento após N de 103471 ciclos.

6.2 MONITORAMENTO DA PISTA 2 – LADO ESQUERDO (LE)

6.2.1 Histórico do carregamento – Pista 2 (LE)

A pista de testes acelerados 2, no lado esquerdo (LE), foi analisada até um número N de repetições do eixo padrão de 82kN igual a 103.973.

A seção central do simulador de tráfego, de número 5 (Figura 6.16), por estar localizada em um ponto em que a velocidade, apesar de baixa, é constante e fluente, foi a escolhida como seção de monitoramento (seção de controle), evitando-se assim o trecho de aceleração e o de frenagem, porém para controle de ATR também foram considerados resultados em um seção anterior (seção 4) e uma seção posterior (seção 6).

A pista foi construída no dia 03/11/2011 e os testes ocorreram entre os dias 10/01/2012 e 31/08/2012, totalizando 234 dias onde foram aplicados 103.973 ciclos de carga de 82kN do eixo simples de rodado duplo, com pressão de inflação dos pneus de 0,56MPa (80psi), do simulador de tráfego do LAPAV/UFRGS.

A Figura 6.16 apresenta um esquema da pista de testes 2 (LE) e na Figura 6.17 observamos o histórico do carregamento durante o experimento.

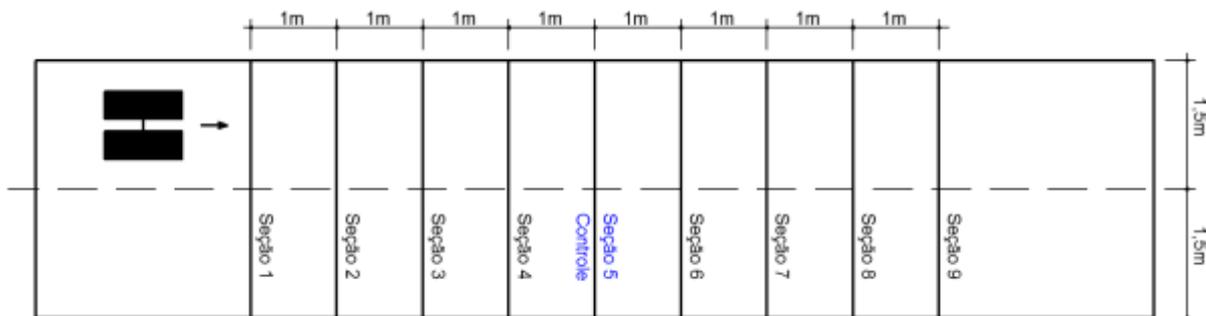


Figura 6.16 – Esquema da pista de testes 2 LE

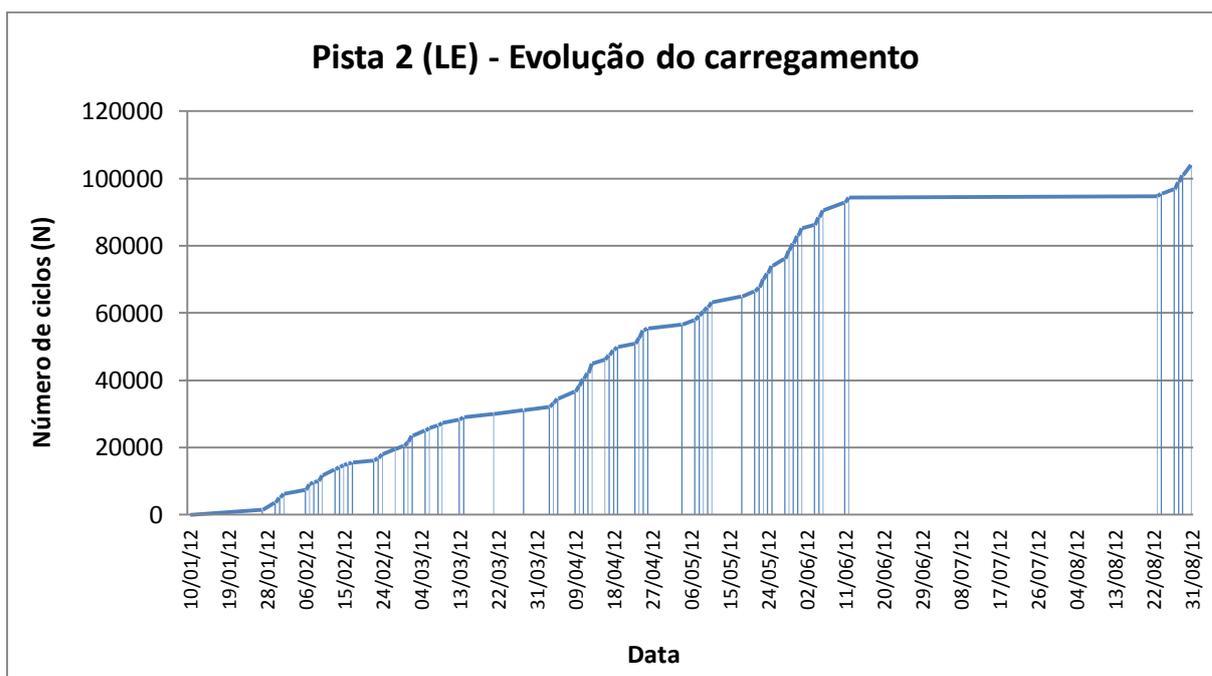


Figura 6.17 – Pista 2 LE – Evolução do carregamento

6.2.2 Parâmetros ambientais – Pista 2 (LE)

A Tabela 6.3 apresenta as chuvas que ocorreram durante os testes acelerados na pista 2 LE, podemos observar que durante os 234 dias de testes ocorreram chuvas em 76 dias, sendo que somente nos meses de janeiro, fevereiro, março e julho/1012 a média de precipitação mensal

superou a média histórica mensal e nos meses de abril, maio, junho e agosto/2012 a média foi menor, durante aproximadamente 33% do período de testes houveram dias de chuva em maior ou menor intensidade.

Também se pode observar na Tabela 6.3 que em todas as datas em que foram feitas medidas de deflexões com a viga eletrônica não houve chuvas, e que em duas datas (08/02/2012 e 01/06/2012), houve precipitações de chuva no dia anterior.

Tabela 6.3 – Controle de chuvas durante acelerados na Pista 2 LE
Fonte: INMET - 8º Distrito de Meteorologia - Porto Alegre

Pluviômetro Medição Diária (mm) 2012								
DIA	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
01	14,40	0,00	34,90	0,00	0,00	0,00	0,00	31,90
02	7,40	0,00	2,10	0,00	0,30	0,00	0,00	0,10
03	0,00	1,60	0,00	0,00	0,00	9,30	0,00	0,00
04	0,00	0,10	0,00	0,00	0,10	1,50	0,00	0,00
05	0,00	4,90	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00	1,00
06	0,00	10,70	0,00	10,80	0,00	0,00	62,80	0,10
07	0,00	0,50	0,20	0,00	0,00	0,00	39,30	0,00
08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,10	0,00
09	0,00	9,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00
11	0,00	0,30	0,00	0,10	0,00	0,40	12,70	0,00
12	0,20	0,00	0,00	0,00	20,40	0,00	0,00	0,00
13	29,80	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	6,70
14	39,30	0,00	21,30	26,60	0,00	0,00	0,00	1,10
15	40,90	0,00	59,40	14,70	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00
17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	10,70	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,90	0,00	0,00
20	0,00	17,30	0,00	0,00	0,00	0,10	0,10	0,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30
22	0,00	79,00	0,70	0,40	0,00	0,10	0,00	0,00
23	0,00	6,50	0,30	0,00	0,00	1,30	0,00	0,00
24	0,00	0,00	2,20	0,00	0,00	0,10	1,40	0,00
25	33,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,70	0,60
26	0,80	9,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	16,00
27	0,20	0,00	1,60	4,40	0,10	0,00	0,00	23,80
28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,60
29	0,00	0,00	0,00	18,10	0,00	0,00	23,50	5,30
30	0,00		0,00	1,80	14,40	4,70	0,00	0,00
31	0,00		0,00		0,20		0,00	0,00
Mensal	166,00	139,50	122,70	77,10	35,70	31,90	144,90	93,50
Média Histórica	100,10	108,60	104,40	86,60	94,60	132,70	121,70	140,00
Diferença Média	65,90	30,90	18,30	-9,50	-58,90	-100,80	23,20	-46,50

	Valores Inferiores a média histórica
	Valores Superiores a média histórica
	Período de testes - pista 2 (LE)
	Datas de medições de deflexões com viga eletrônica

Da Figura 6.18 a Figura 6.21 pode-se observar as temperaturas médias compensadas, as temperaturas mínimas e temperaturas máximas durante o período do experimento. Nas mesmas figuras é possível verificar os dias em que foram feitas as medidas de deflexões com a viga eletrônica dentro do contexto das temperaturas da época de cada medição.

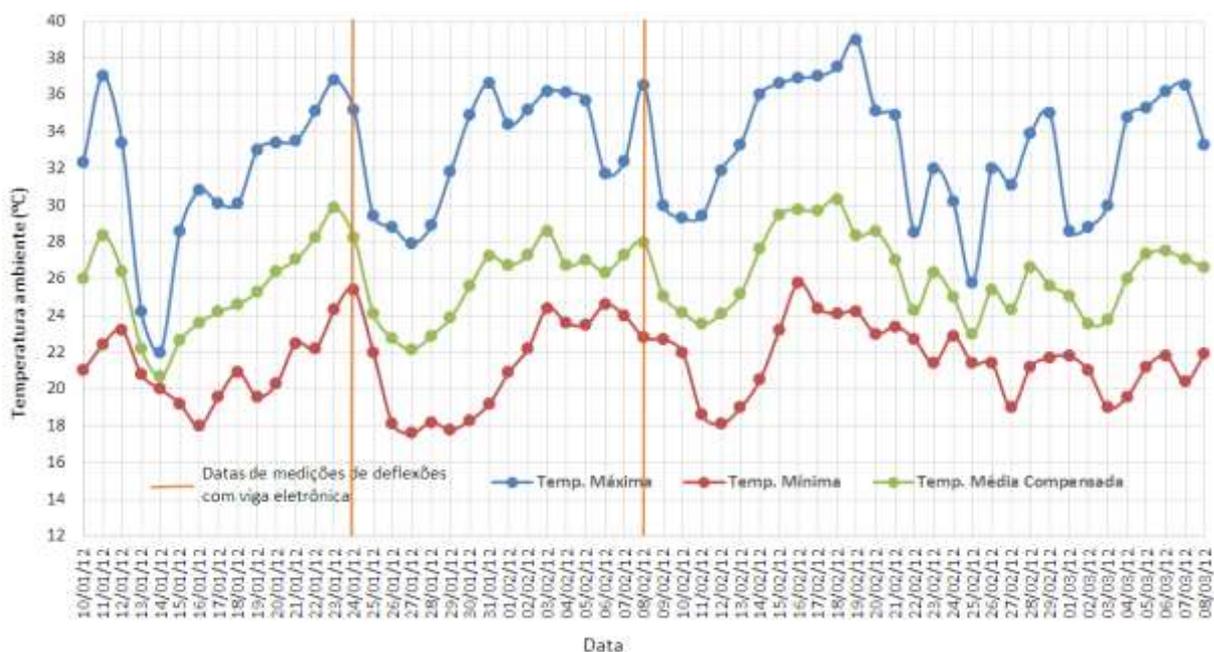


Figura 6.18 – Pista 2LE – Temperaturas ambiente diárias
Fonte: INMET – 8º Distrito de Meteorologia



Figura 6.19 – Pista 2LE – Temperaturas ambiente diárias
Fonte: INMET – 8º Distrito de Meteorologia

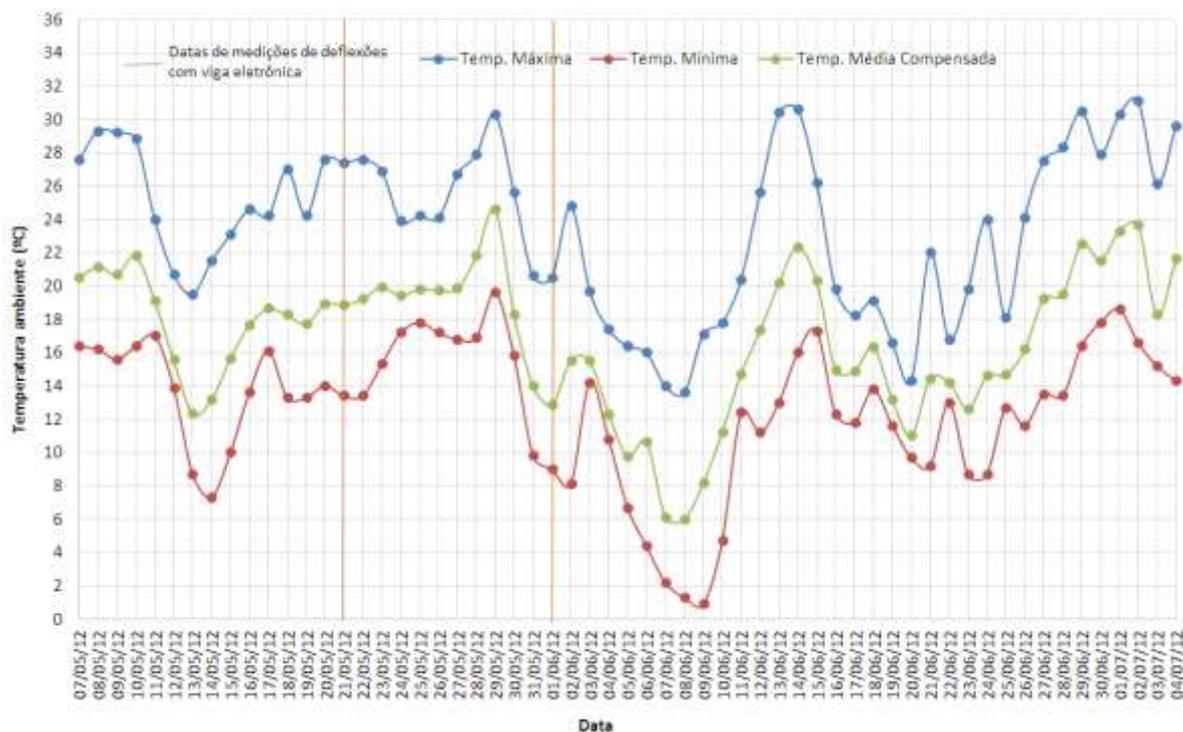


Figura 6.20 – Pista 2LE – Temperaturas ambiente diárias
Fonte: INMET – 8º Distrito de Meteorologia

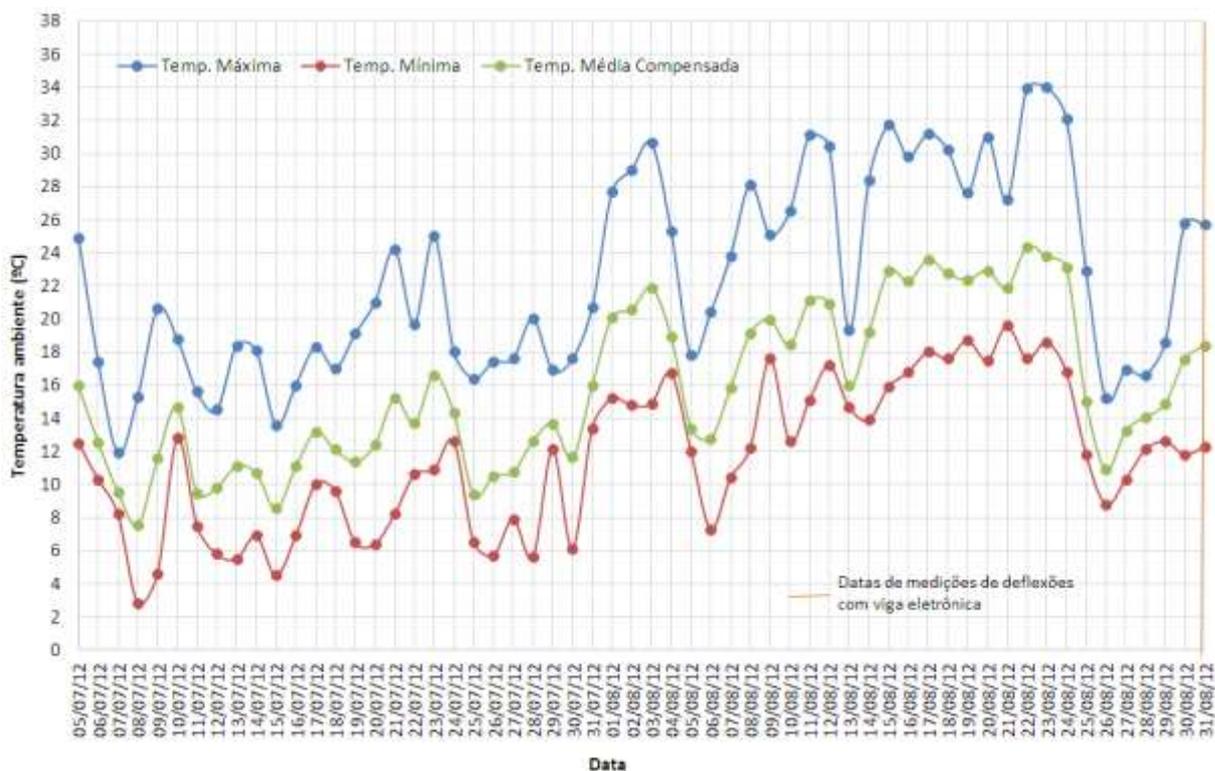


Figura 6.21 – Pista 2LE – Temperaturas ambiente diárias
Fonte: INMET – 8º Distrito de Meteorologia

Já na Figura 6.22 é possível observar que o período inteiro do teste foi bastante chuvoso, porém as maiores precipitações ocorreram no início do carregamento, até aproximadamente 20.000 ciclos.

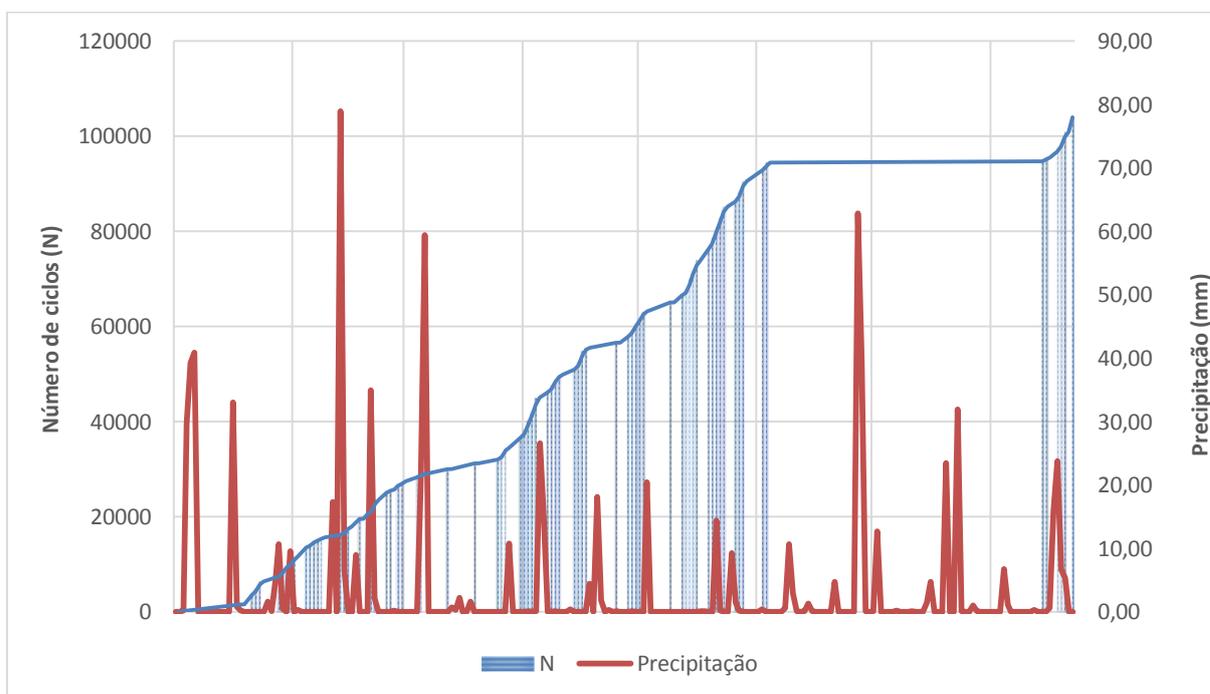


Figura 6.22 – Pista 2LE – Precipitações pluviométricas durante o carregamento

6.2.3 Resposta Estrutural – Pista 2 (LE)

Das Figura 6.23 a Figura 6.29 estão os gráficos que mostram as deflexões do pavimento para os números N de repetições do eixo padrão de 82kN iguais a 7.300, 10.000, 30.000, 49.738, 66.000, 91.200 e 103.357 e o raio de curvatura de cada medida.

A Figura 6.23 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para $N=7300$, em medições na seção 5 da pista 2 (LE) em 24/01/2012, no momento a temperatura da pista era de 30°C , porém as deflexões foram corrigidas para 20°C .

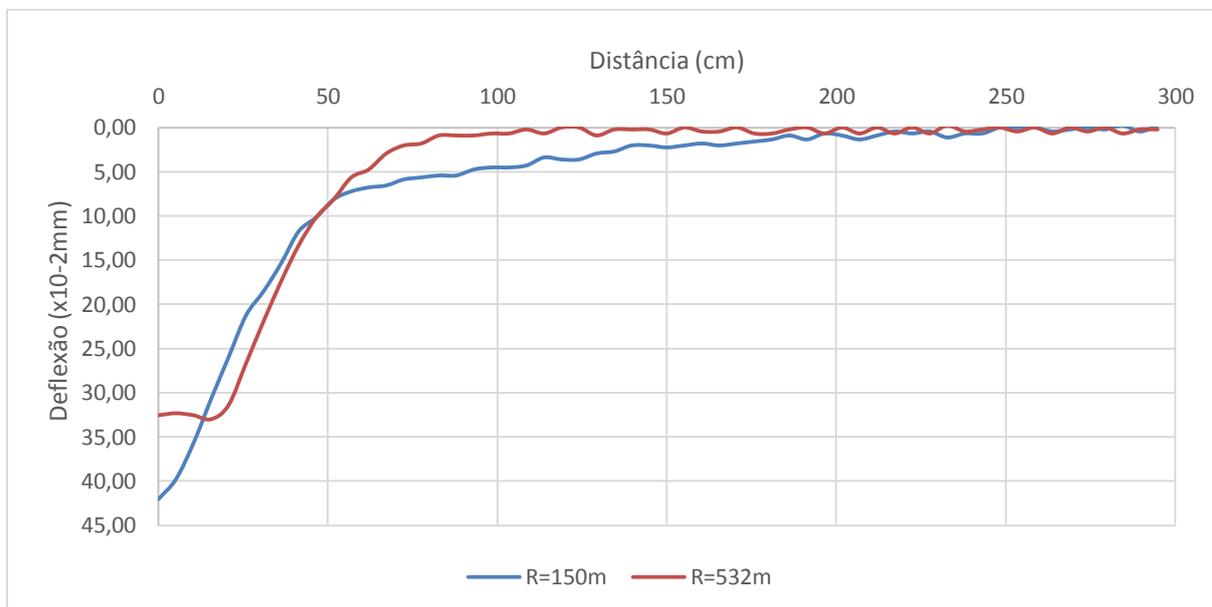


Figura 6.23 – Pista 2 LE: Deflexão e raio de curvatura para $N=7300$ (Seção 5)

A Figura 6.24 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para $N=10000$, em medições na seção 5 da pista 2 (LE) em 08/02/2012, no momento a temperatura da pista era de $32,2^{\circ}\text{C}$, porém as deflexões foram corrigidas para 20°C .

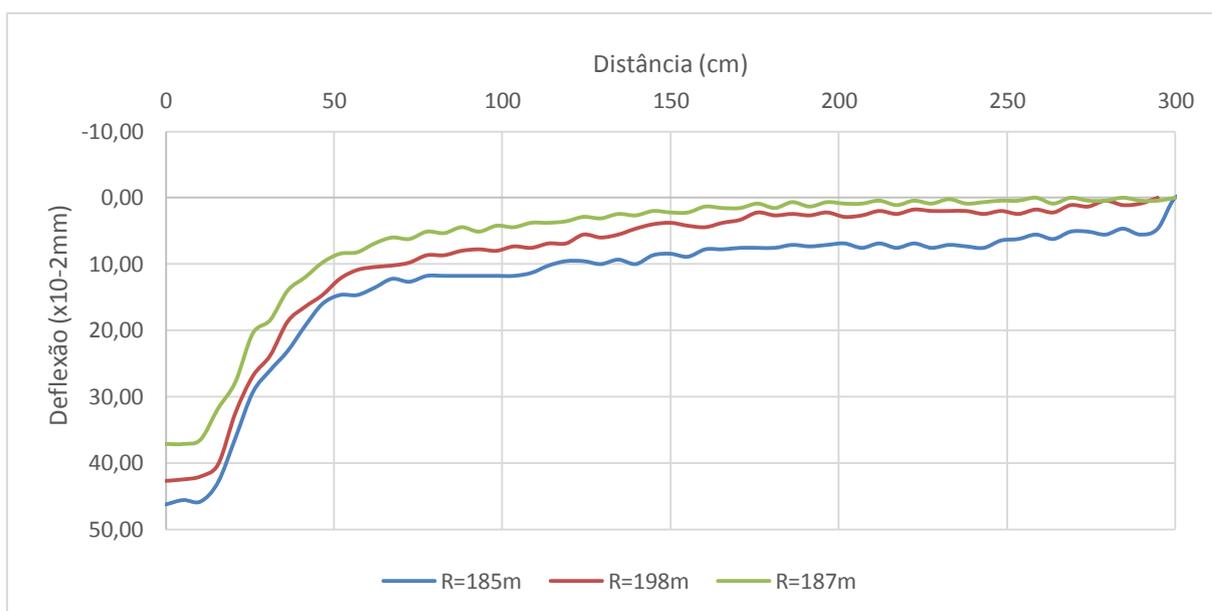


Figura 6.24 – Pista 2 LE: Deflexão e raio de curvatura para $N=10000$ (Seção 5)

A Figura 6.25 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para $N=30000$, em medições na seção 5 da pista 2 (LE) em 26/03/2012, no momento a temperatura da pista era de $32,1^{\circ}\text{C}$, porém as deflexões foram corrigidas para 20°C .

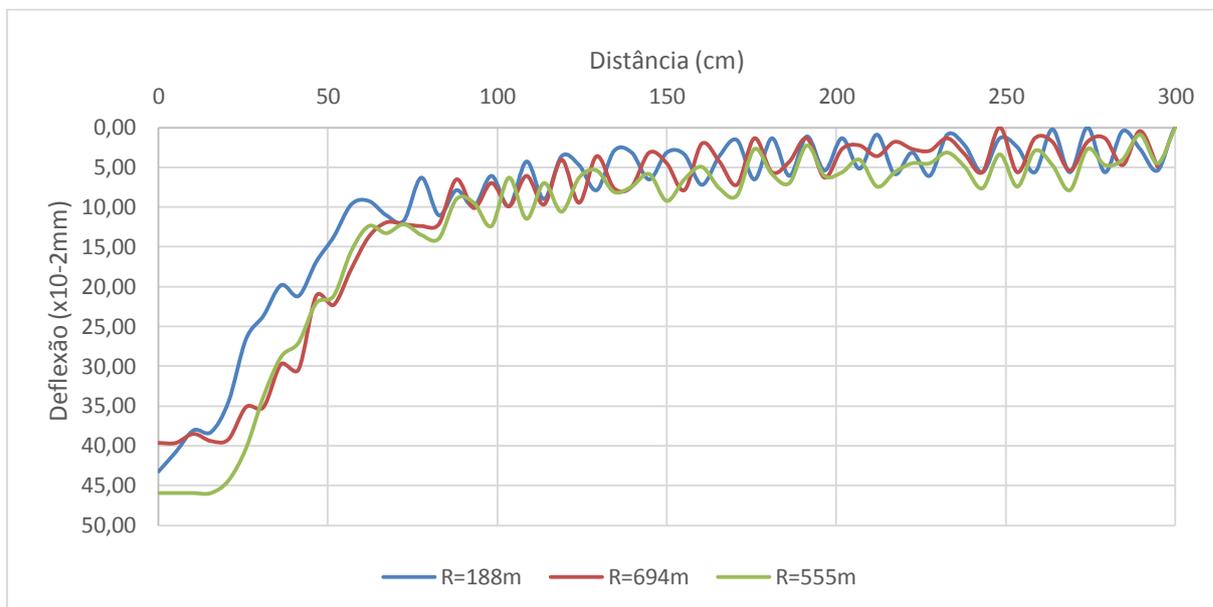


Figura 6.25 – Pista 2 LE: Deflexão e raio de curvatura para $N=30000$ (Seção 5)

A Figura 6.26 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para $N=49738$, em medições na seção 5 da pista 2 (LE) em 17/04/2012, no momento a temperatura da pista era de $31,2^{\circ}\text{C}$, porém as deflexões foram corrigidas para 20°C .

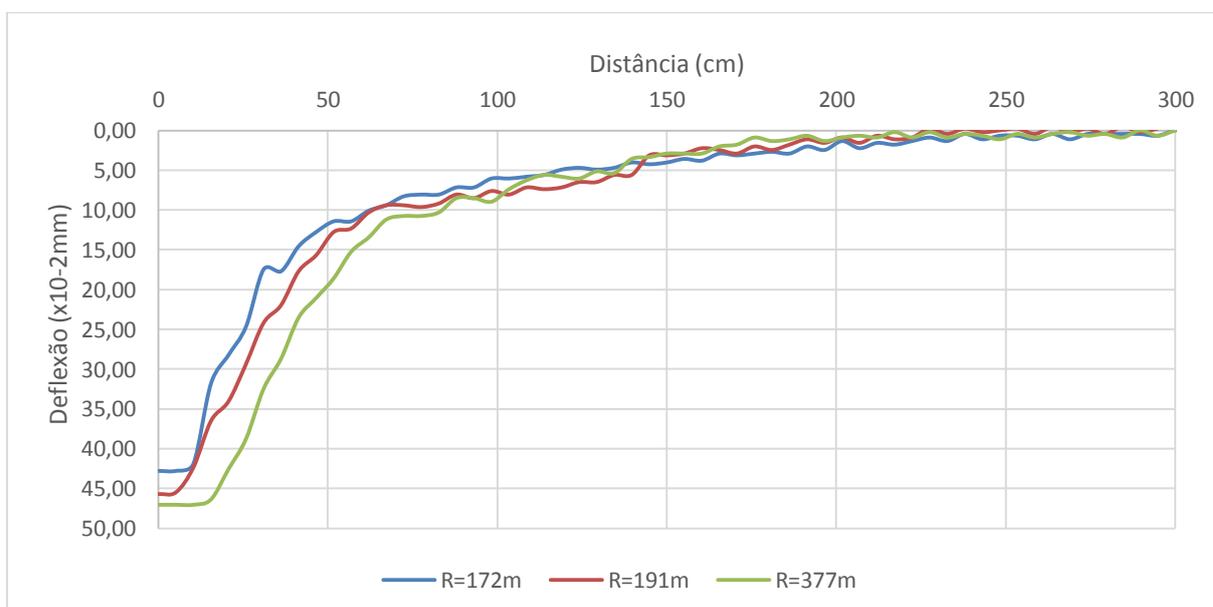


Figura 6.26 – Pista 2 LE: Deflexão e raio de curvatura para $N=49738$ (Seção 5)

A Figura 6.27 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para $N=66000$, em medições na seção 5 da pista 2 (LE) em 21/05/2012, no momento a temperatura da pista era de $30,6^{\circ}\text{C}$, porém as deflexões foram corrigidas para 20°C .

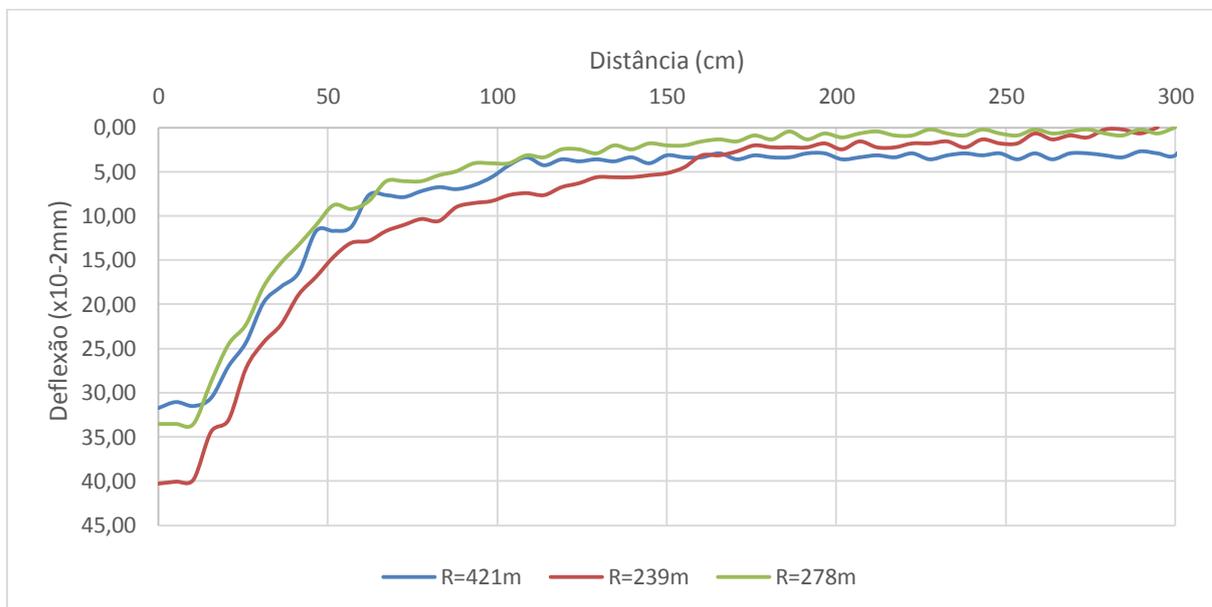


Figura 6.27 – Pista 2 LE: Deflexão e raio de curvatura para $N=66000$ (Seção 5)

A Figura 6.28 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para $N=91200$, em medições na seção 5 da pista 2 (LE) em 01/06/2012, no momento a temperatura da pista era de $19,6^{\circ}\text{C}$, porém as deflexões foram corrigidas para 20°C .

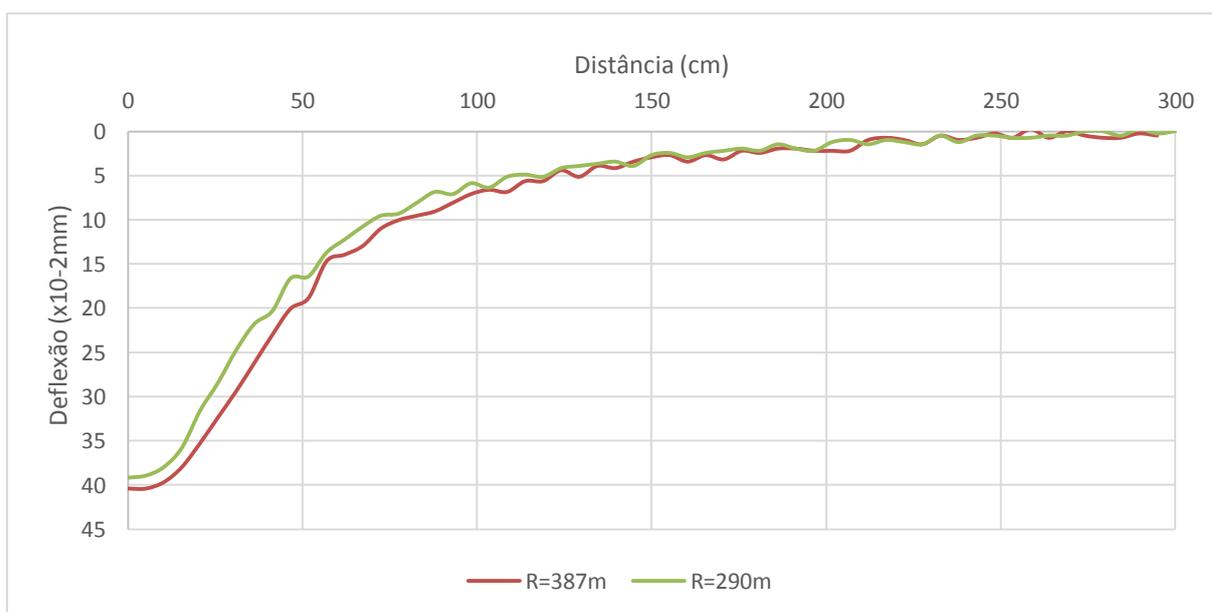


Figura 6.28 – Pista 2 LE: Deflexão e raio de curvatura para $N=91200$ (Seção 5)

A Figura 6.29 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para N=103357, em medições na seção 5 da pista 2 (LE) em 31/08/2012, no momento a temperatura da pista era de 29°C, porém as deflexões foram corrigidas para 20°C.

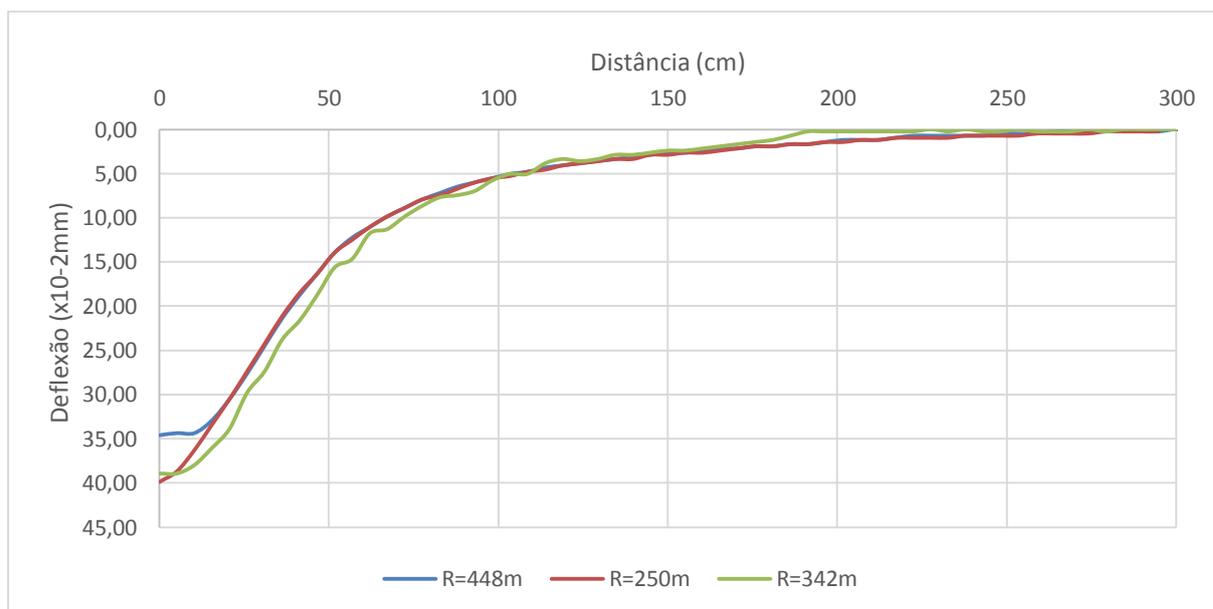


Figura 6.29 – Pista 2 LE: Deflexão e raio de curvatura para N=103357 (Seção 5)

A seguir, na Tabela 6.4, se apresenta um quadro resumo com as deflexões mais significativas para cada N estudado junto à seção de controle (seção 5) e na Figura 6.30 se pode verificar o histórico das deflexões máximas durante o carregamento.

Tabela 6.4 – Valores de deflexão e raio de curvatura para diferentes N – Pista 2 LE

N	Deflexão (mm.10 ⁻²)	Raio de Curvatura (m)
7300	42,05	150
10000	42,71	198
30000	43,24	188
49738	45,71	191
66000	33,53	278
91200	39,19	290
103357	38,93	342

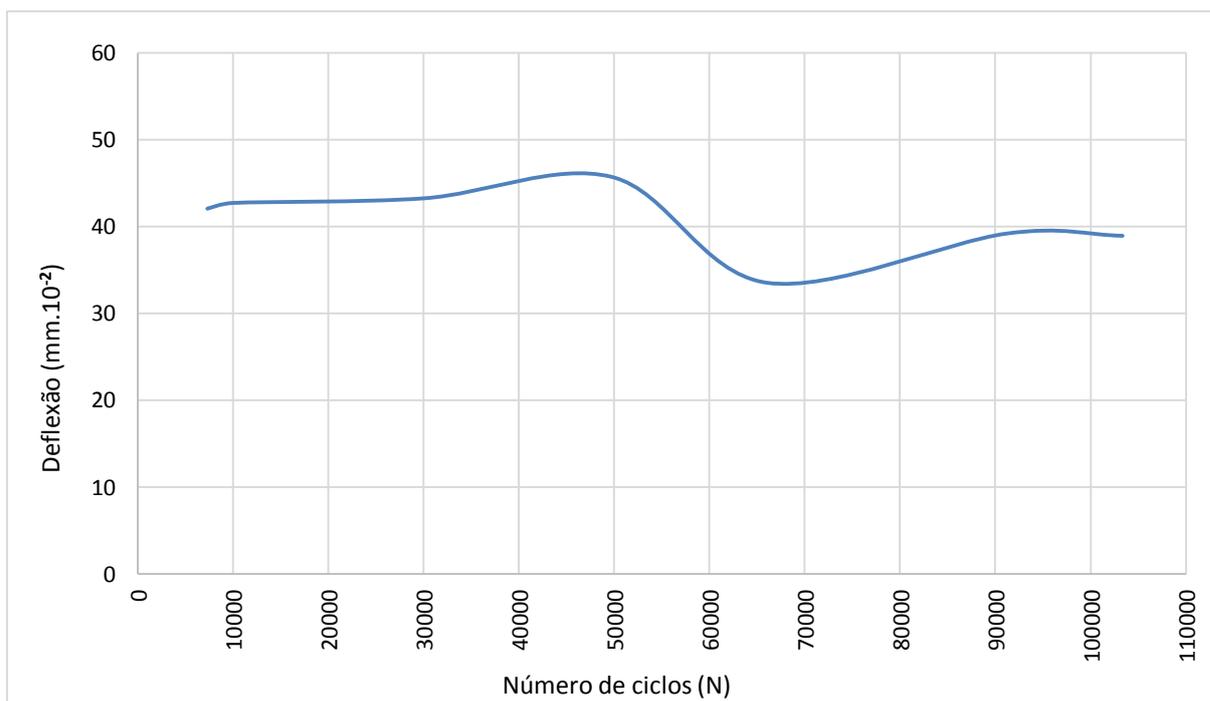


Figura 6.30 – Pista 2LE: Histórico de deflexões máximas (Seção 5)

6.2.4 Parâmetros de Comportamento – Pista 2 (LE)

Podem-se observar algumas pequenas trincas que ocorreram quando da execução do pavimento e que não se alastraram durante o teste.

Também não ocorreram panelas nem qualquer tipo de patologia que pudesse tornar o pavimento não adequado para rolamento.

O equipamento utilizado para medir afundamentos de trilho de rodas foi o perfilógrafo sobre a seção transversal de controle (seção 5) e também em uma seção anterior e uma posterior, os resultados estão apresentados nos gráficos a seguir.

Da Figura 6.31 a Figura 6.33 pode ser observada a evolução dos afundamentos de trilho de rodas nas seções transversais números 4, 5 e 6 na pista de testes 2 LE.

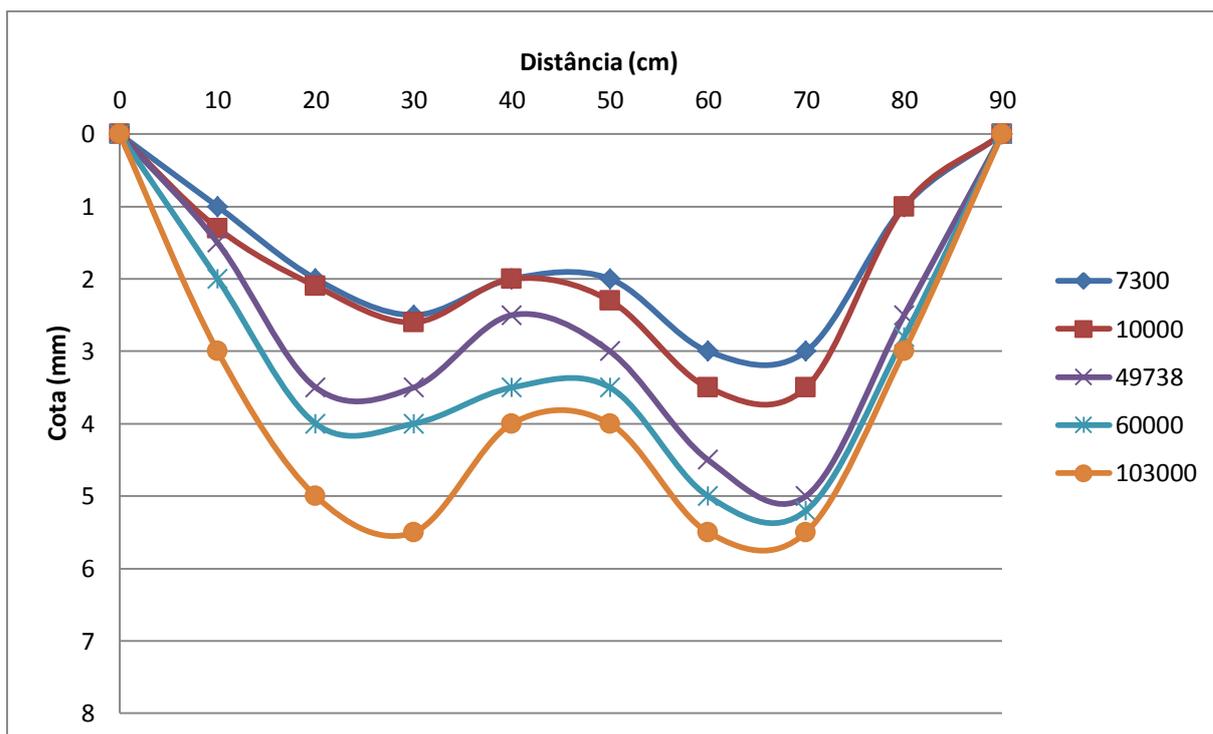


Figura 6.31 – Pista 2 LE: Afundamentos de trilho de rodas – Seção 4

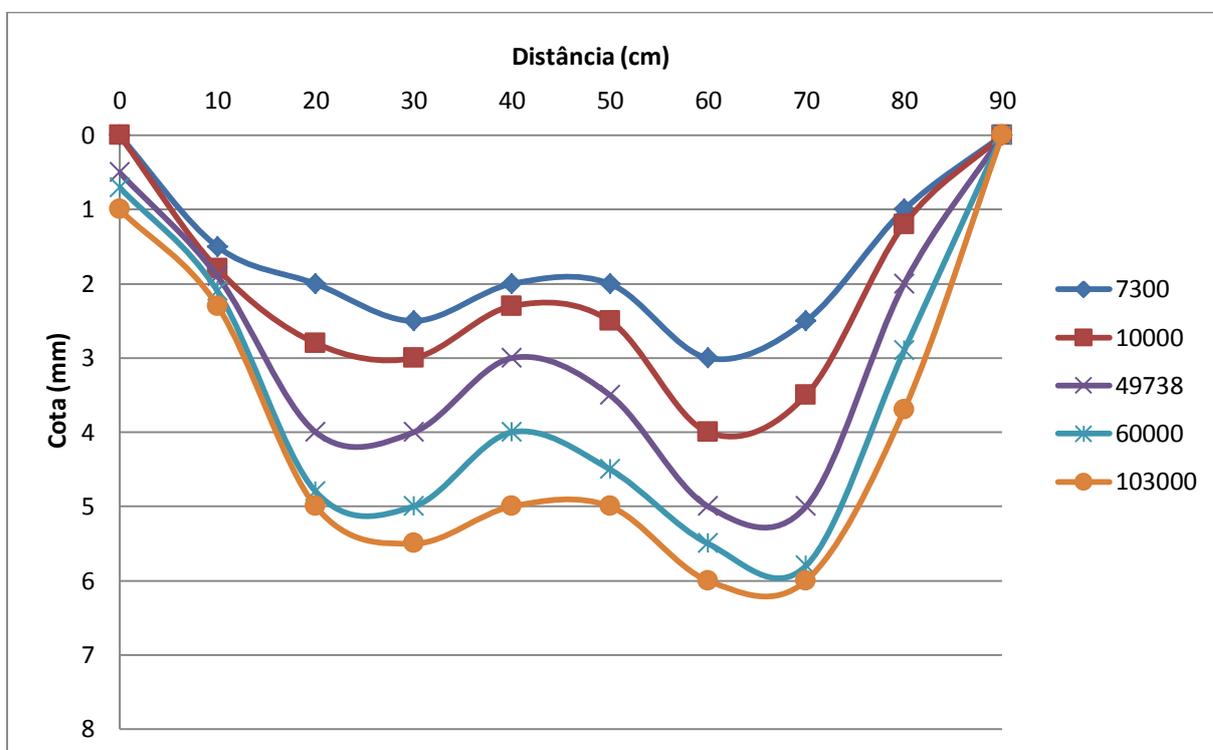


Figura 6.32 – Pista 2 LE: Afundamentos de trilho de rodas – Seção 5

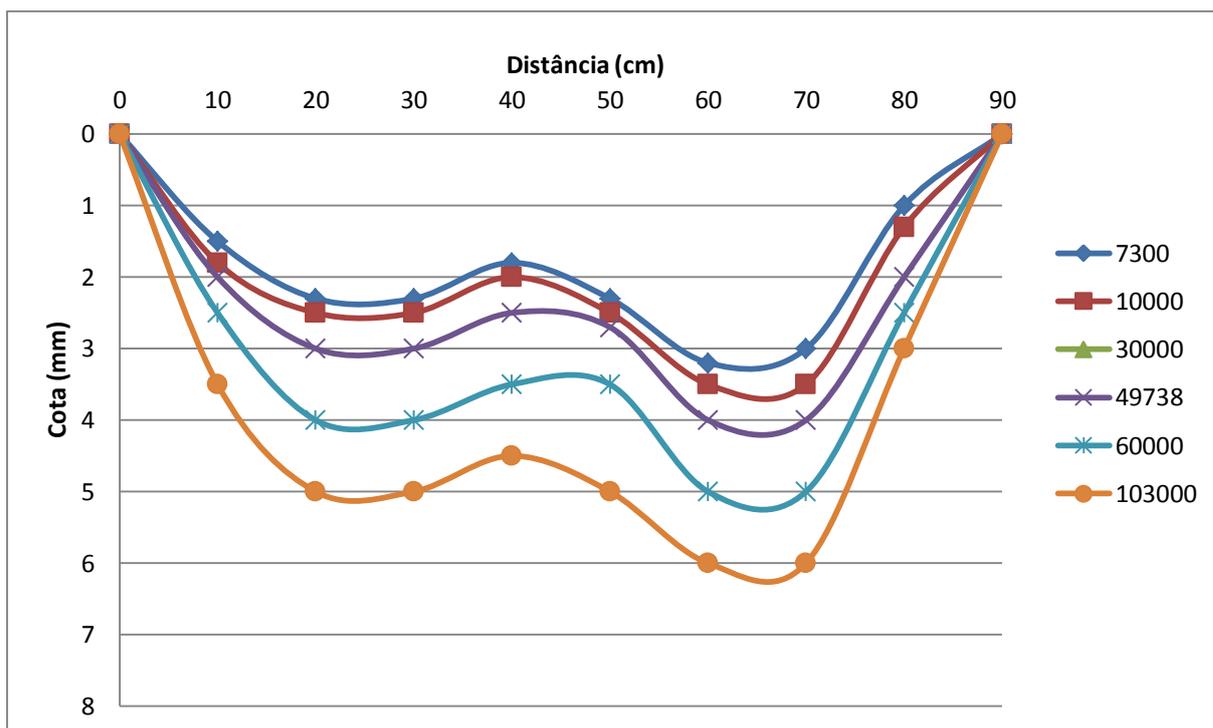


Figura 6.33 – Pista 2 LE: Afundamentos de trilho de rodas – Seção 6

A Figura 6.34 mostra a evolução dos afundamentos por trilho de rodas que ocorreram durante o carregamento.

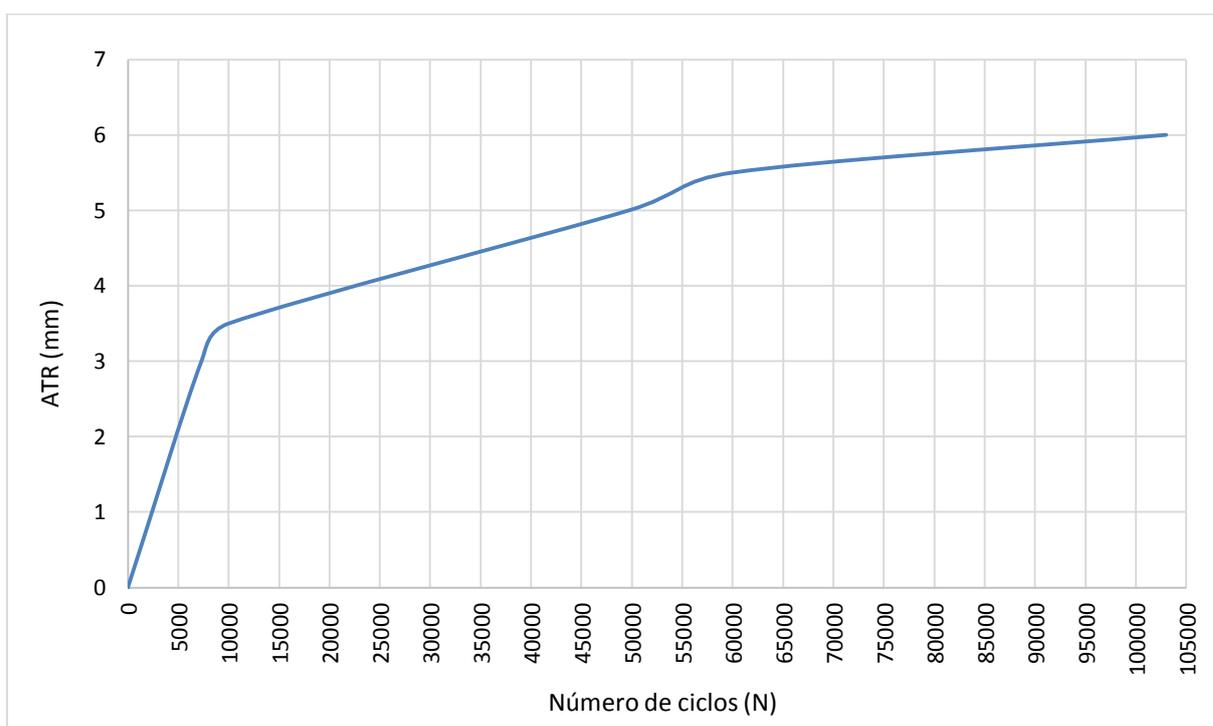


Figura 6.34 – Pista 2LE: Evolução dos ATR máximos (Seção 5)

6.3 MONITORAMENTO DA PISTA 2 – LADO DIREITO (LD)

6.3.1 Histórico do carregamento – Pista 2 (LD)

Os testes ocorreram entre os dias 11/12/2012 e 22/10/2013, totalizando 315 dias, onde foram aplicados 168.150 ciclos de uma carga de 100kN do eixo simples de rodado duplo, no simulador de tráfego do LAPAV/UFRGS.

A seção central do simulador de tráfego, de número 5 (Figura 6.35), por estar localizada em um ponto em que a velocidade, apesar de baixa, é constante e fluente, foi a escolhida como seção de monitoramento (seção de controle), evitando-se assim o trecho de aceleração e o de frenagem, porém para controle dos ATR também foi feito o acompanhamento em uma seção anterior (seção 4) e em uma seção posterior (seção 6), na mesma figura se pode observar uma esquema da pista de testes,

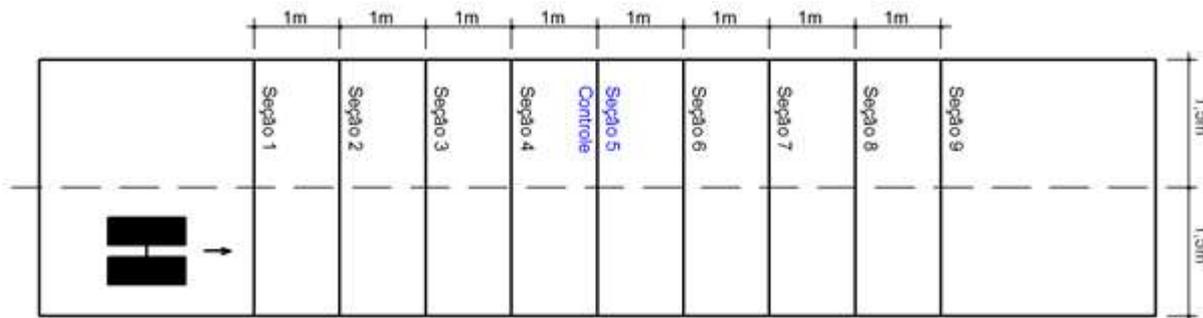


Figura 6.35 – Esquema da pista de testes 2 LD

Para a análise do comportamento na pista de testes, o pavimento foi submetido a uma carga de 100kN no eixo simples de rodagem dupla, com pressão de inflação dos pneus de 0,62MPa (90psi) no simulador de tráfego da UFRGS.

Desta forma, o número N de passagens do eixo padrão de 82kN foi corrigido de acordo com o fator de equivalência de operações (FEO) do DNIT, mostrado na Figura 6.36a seguir, de acordo com a aplicação do fator multiplicador igual a 3,2.

Assim, o número de passagens do eixo simples de rodagem dupla de 100kN foram corrigidos para o número de passagens do eixo padrão de 82kN de acordo com a Tabela 6.5, e para a análise dos resultados será considerado o valor de N corrigido igual a 538080 ciclos equivalentes do eixo padrão de 82kN.

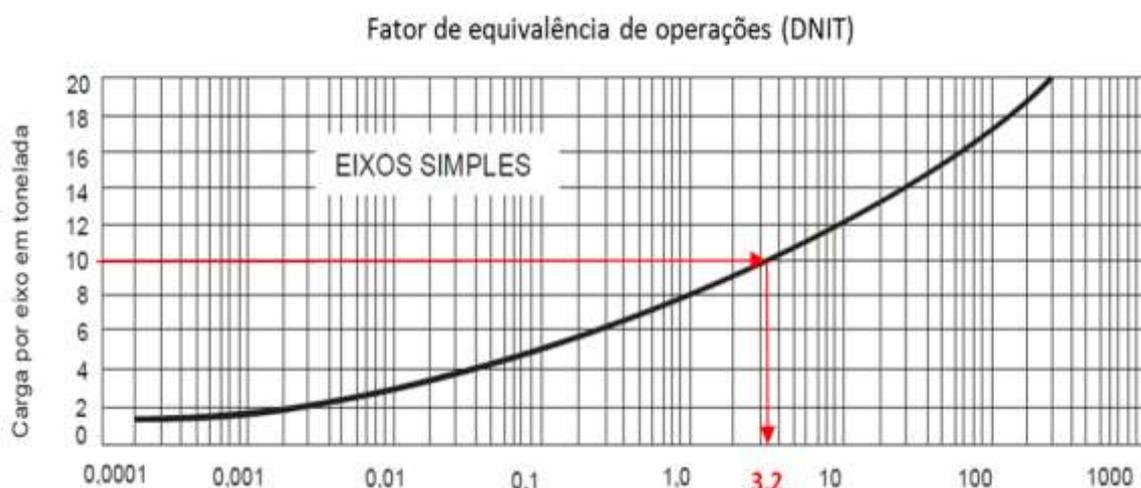


Figura 6.36 – Fator de equivalência de operações
Fonte: DNIT (2006)

Tabela 6.5 – Número N corrigido

N (100kN) (aplicado)	FEO	N (82kN) (corrigido)
12.000	3,2	38.400
25.000	3,2	80.000
50.000	3,2	160.000
70.000	3,2	224.000
100.000	3,2	320.000
110.000	3,2	352.000
122.000	3,2	390.400
168.150	3,2	538.080

Na Figura 6.37 observamos o histórico do carregamento durante o experimento para um número N de passagens do eixo padrão de 82kN.

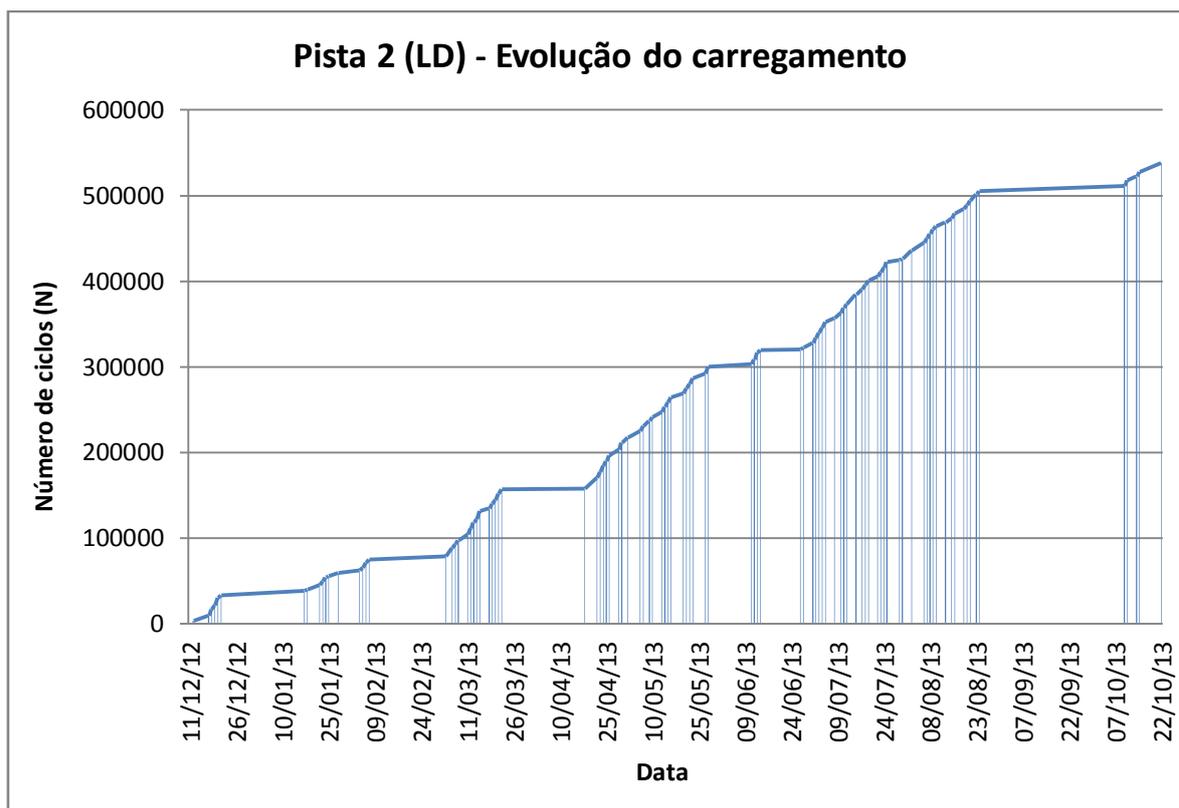


Figura 6.37 – Pista 2 LD – Evolução do carregamento

6.3.2 Parâmetros ambientais – Pista 2 (LD)

A Tabela 6.6 apresenta as chuvas que ocorreram durante os testes acelerados na pista 2 LD, podemos observar que durante os 315 dias de testes ocorreram chuvas em 126 dias, sendo que nos meses de dezembro/2012 e janeiro, abril, agosto e outubro/1013 a média de precipitação mensal superou a média histórica mensal e nos meses de março, maio, junho, julho e setembro/2013 a média foi menor, sendo o período de testes que mais apresentou dias de precipitação, em aproximadamente 40% dos dias houveram chuvas em maior ou menor intensidade.

Também pode se observar na Tabela 6.6 que em algumas datas em que foram feitas medidas de deflexões com a viga eletrônica ocorreu chuvas de pequena intensidade (não no momento das medidas) e que em outras datas houve precipitações no dia anterior.

Tabela 6.6 – Controle de chuvas durante acelerados na Pista 2 LD
 Fonte: INMET - 8º Distrito de Meteorologia - Porto Alegre

DIA	2012	Pluviômetro Medição Diária (mm) 2013									
	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
01	0,00	23,80	0,00	0,00	0,00	0,00	8,40	0,00	0,00	0,00	0,20
02	9,10	0,70	0,00	0,00	0,70	0,00	17,90	0,00	0,00	0,70	0,00
03	0,00	0,00	5,00	0,00	0,10	0,10	0,00	0,00	1,10	0,30	0,00
04	0,00	0,00	4,20	13,30	53,70	0,30	0,10	0,00	14,80	0,90	0,00
05	0,00	0,00	0,00	10,10	24,80	0,00	0,10	0,00	0,10	0,00	11,10
06	0,00	7,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,50	0,00	0,00
07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	42,10	1,50	0,00	0,00
08	15,30	68,00	0,00	0,00	0,00	0,80	0,10	10,90	6,50	3,40	0,00
09	0,00	0,00	0,60	0,70	0,00	0,00	0,20	0,30	2,60	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,20	0,00	0,00
11	18,10	0,00	0,50	0,00	0,10	0,10	0,10	0,00	16,90	0,00	0,00
12	0,00	0,00	1,80	6,20	18,50	0,00	0,00	0,10	0,10	0,00	0,00
13	5,90	0,00	0,00	10,50	2,20	0,00	0,00	8,70	0,80	0,00	17,20
14	0,00	0,00	3,80	0,30	0,00	0,30	0,10	0,00	3,60	0,00	0,00
15	0,00	0,00	22,10	2,40	0,00	0,00	0,10	24,00	0,80	0,00	0,00
16	0,00	0,00	0,50	4,80	0,00	13,30	0,00	0,00	0,00	23,80	0,00
17	8,50	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	2,80	0,00	0,00	8,30	0,20
18	0,00	0,10	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	2,20	0,00	0,00	0,00
19	0,00	1,30	0,00	0,00	0,00	1,50	1,70	23,90	0,00	0,00	0,00
20	0,00	1,30	0,00	7,50	0,00	19,80	3,60	0,00	0,00	0,00	0,00
21	46,20	0,00	70,40	0,00	0,10	1,40	34,80	3,70	0,00	31,80	13,40
22	17,10	0,00	2,00	0,00	0,10	0,00	7,90	0,00	0,00	7,50	19,80
23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,70	14,70	3,20
24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	23,60	12,20	41,40
25	0,00	3,60	0,00	0,00	0,00	0,00	3,90	0,00	72,00	26,80	0,10
26	0,10	0,00	1,40	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	30,50	0,00	0,40
27	14,20	0,00	0,00	10,10	0,00	0,00	0,10	0,00	12,10	0,00	24,60
28	58,50	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,10	0,00	5,00	4,70	0,00
29	3,20	0,00		0,00	2,40	0,10	19,20	0,00	0,00	0,20	0,00
30	0,00	0,00		0,00	6,10	27,50	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
31	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00		0,10	0,00		0,00
Mensal	196,20	106,20	112,70	66,50	108,90	65,30	101,60	115,90	247,40	135,30	131,60
Média Histórica	101,20	100,10	108,60	104,40	86,60	94,60	132,70	121,70	140,00	139,50	114,30
Diferença Média	95,00	6,10	4,10	-37,90	22,30	-29,30	-31,10	-5,80	107,40	-4,20	17,30

	Valores Inferiores a média histórica
	Valores Superiores a média histórica
	Período de testes - pista 2 (LD)
	Datas de medições de deflexões com viga eletrônica

Da Figura 6.38 a Figura 6.42 podemos observar as temperaturas médias compensadas, as temperaturas mínimas e temperaturas máximas durante o período do experimento. Nas mesmas figuras é possível verificar os dias em que foram feitas as medidas de deflexões com a viga eletrônica dentro do contexto das temperaturas da época de cada medição.

A Figura 6.43 mostra as precipitações pluviométricas que ocorreram durante o carregamento, de forma geral se observa que o período todo foi muito chuvoso porém muito forte no início do carregamento quando a média mensal de chuvas quase dobrou em relação à média histórica.

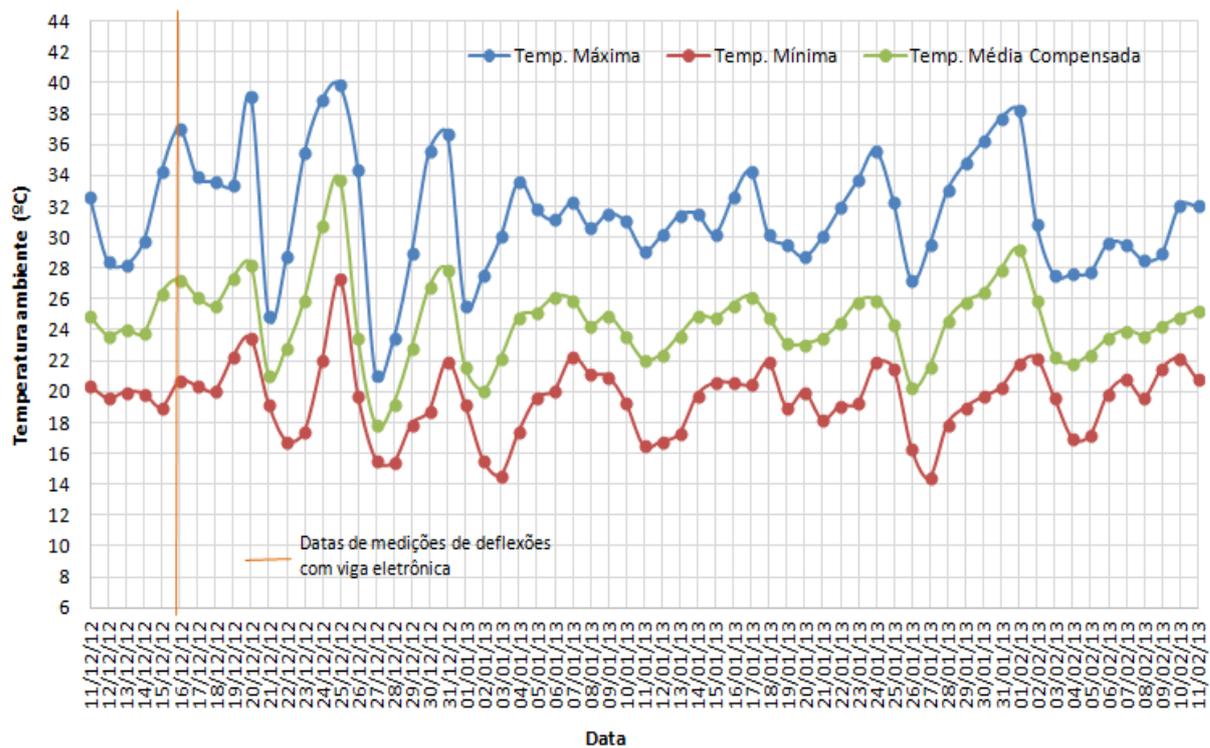


Figura 6.38 – Pista 2LD – Temperaturas ambiente diárias
 Fonte: INMET – 8º Distrito de Meteorologia

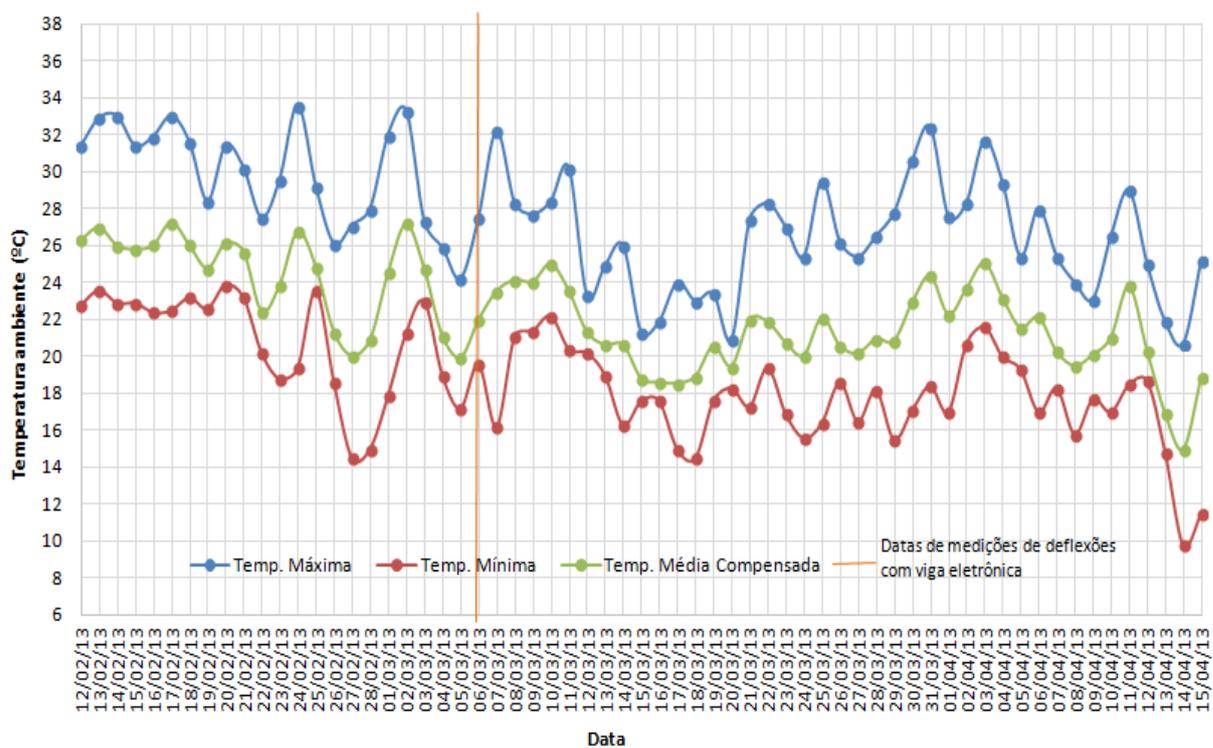


Figura 6.39 – Pista 2LD – Temperaturas ambiente diárias
 Fonte: INMET – 8º Distrito de Meteorologia

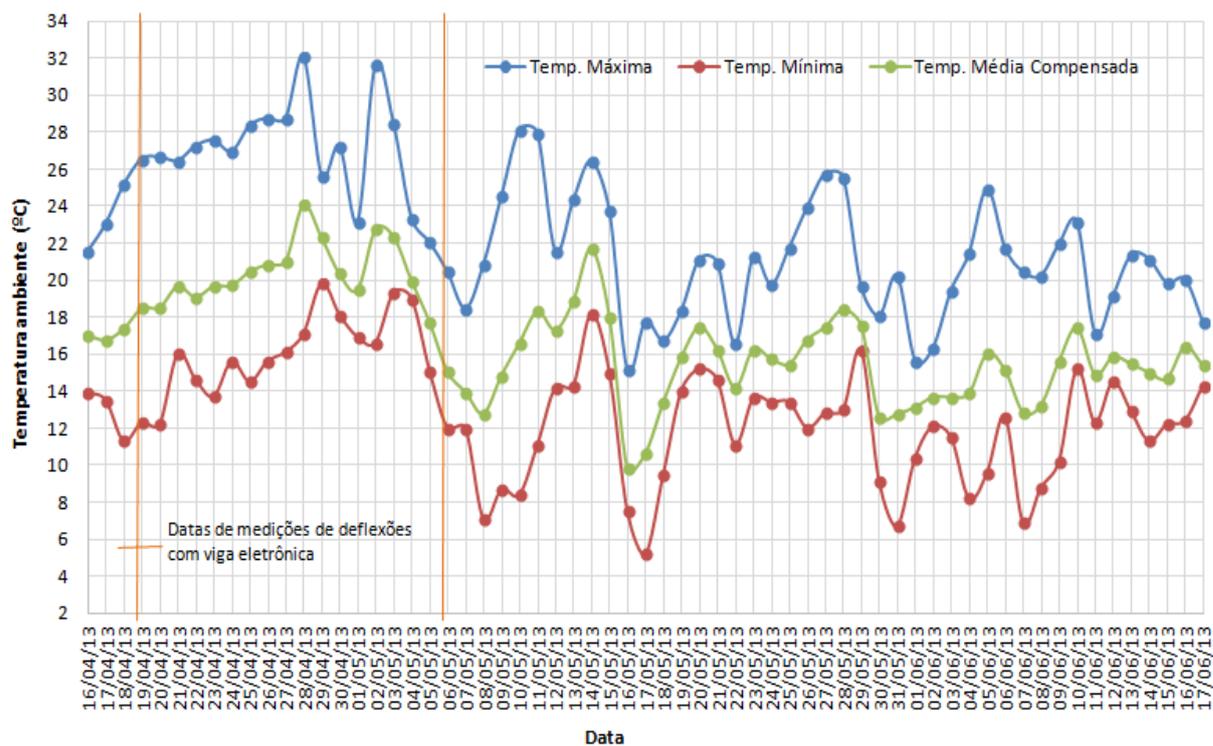


Figura 6.40 – Pista 2LD – Temperaturas ambiente diárias
 Fonte: INMET – 8º Distrito de Meteorologia

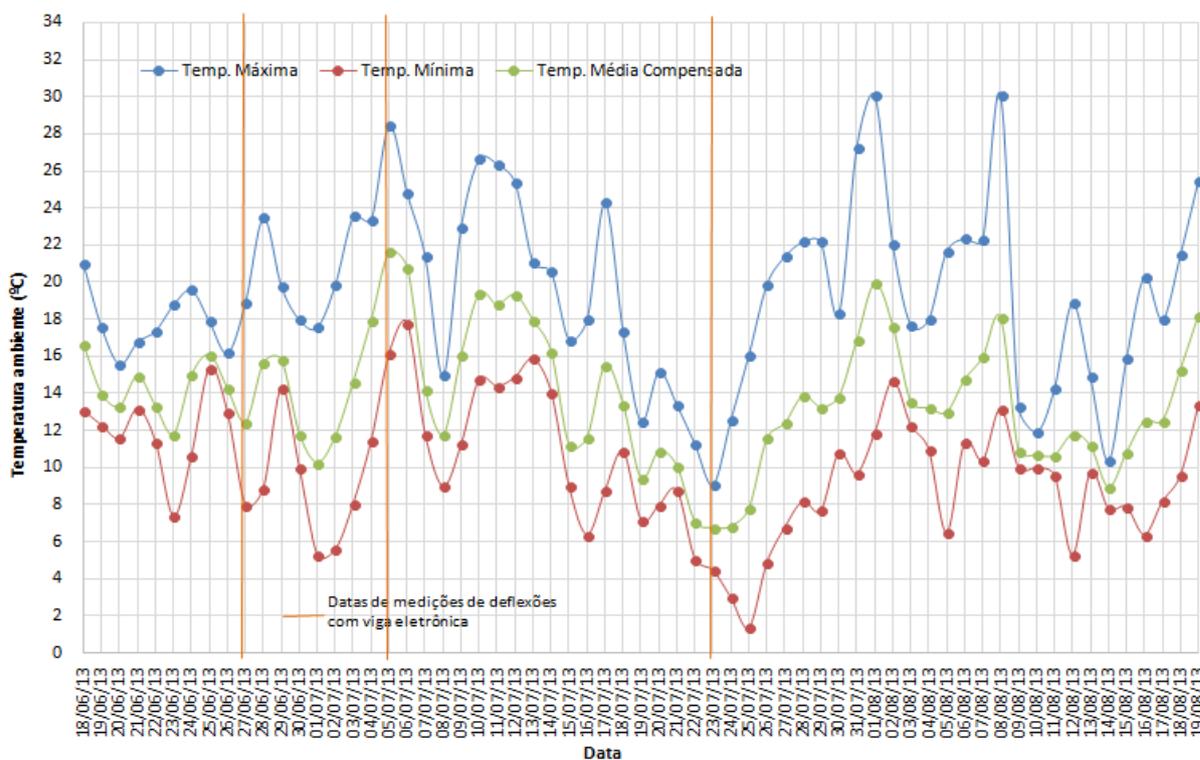


Figura 6.41 – Pista 2LD – Temperaturas ambiente diárias
 Fonte: INMET – 8º Distrito de Meteorologia

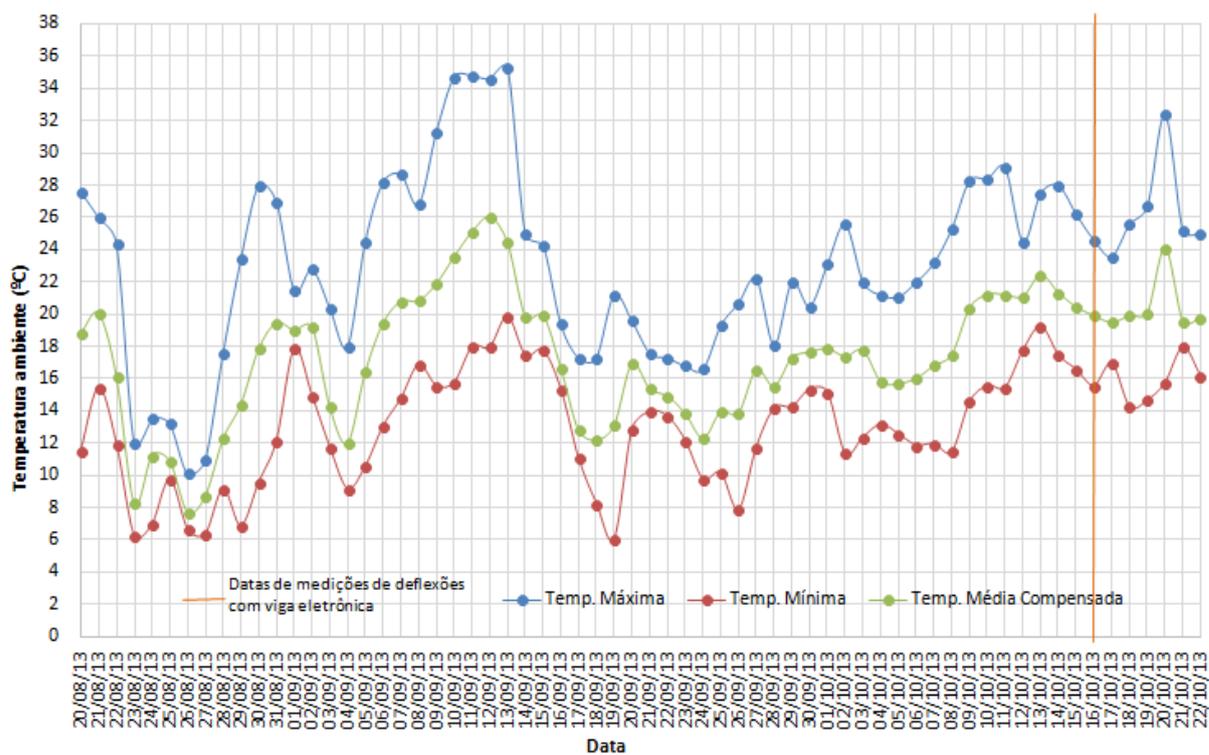


Figura 6.42 – Pista 2LD – Temperaturas ambiente diárias
Fonte: INMET – 8º Distrito de Meteorologia

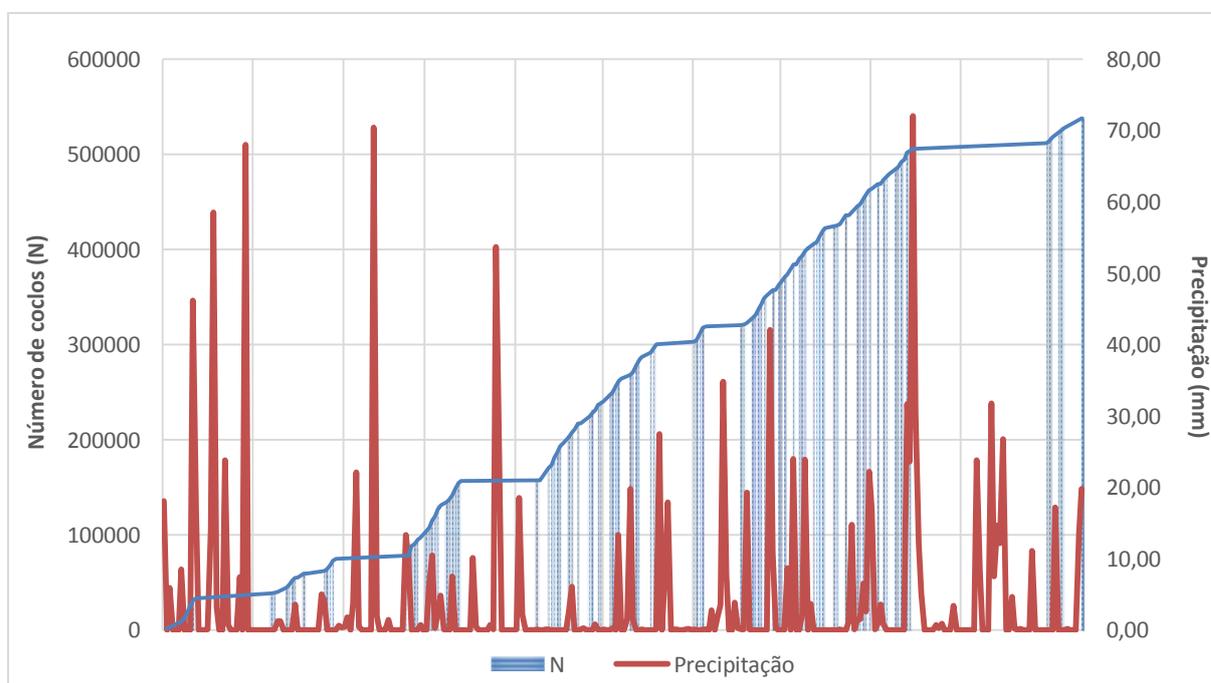


Figura 6.43 – Pista 2LD – Precipitações pluviométricas durante o carregamento

6.3.3 Resposta Estrutural – Pista 2 (LD)

Da Figura 6.44 a Figura 6.51 estão os gráficos que mostram as deflexões do pavimento para os números N de repetições do eixo padrão de 82kN iguais a 38.400, 80.000, 160.000, 224.000, 320.000, 352.000, 390.400 e 538.080 e os raios de curvatura de cada medida.

Para que fosse possível estabelecer uma comparação adequada, apesar desta pista de teste ter sido submetida a uma carga de 100kN, com inflação dos pneus do simulador em 0,62MPa (90psi) para acelerar o seu desgaste, durante as medições de deflexões com viga benkelman a carga aplicada foi de 82kN e a inflação dos pneus de 0,56MPa (80psi), após retornado à situação inicial para continuidade do teste acelerado.

A Figura 6.44 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para N=38400, na seção 5 da pista 2 LD e realizada no dia 16/01/2013, no momento da medição a temperatura da pista era de 26°C, porém as deflexões foram corrigidas para 20°C.

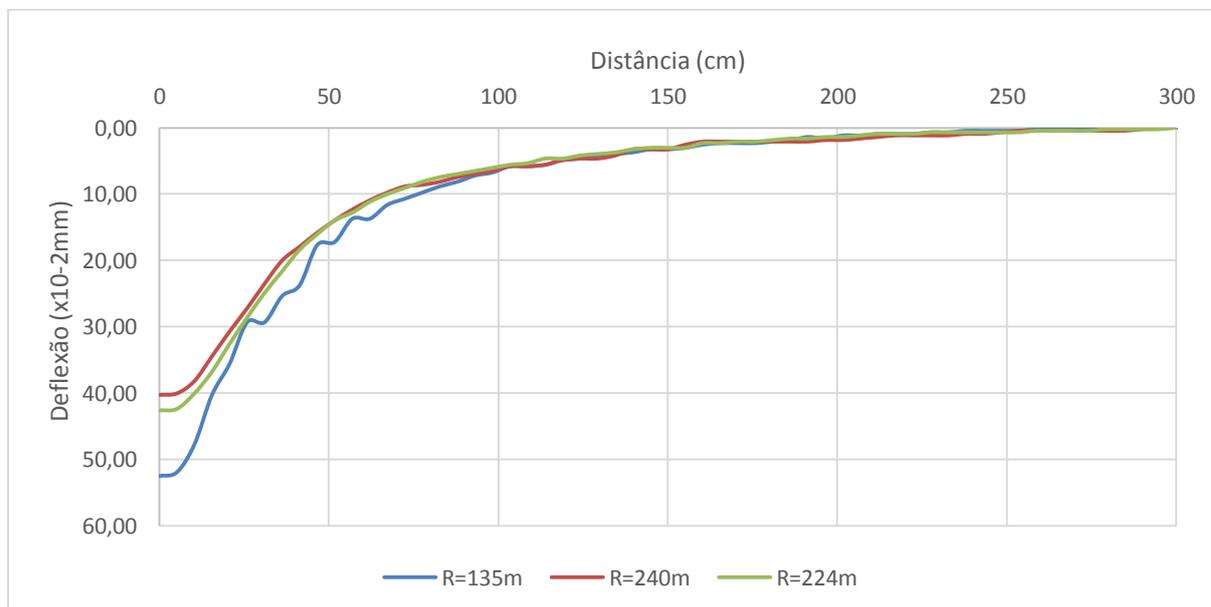


Figura 6.44 – Pista 2 LD: Deflexão e raio de curvatura para N=38.400 (Seção 5)

A Figura 6.45 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para $N=80000$, em medições na seção 5 da pista 2 (LD) em 06/03/2013, no momento a temperatura da pista era de 26°C , porém as deflexões foram corrigidas para 20°C .

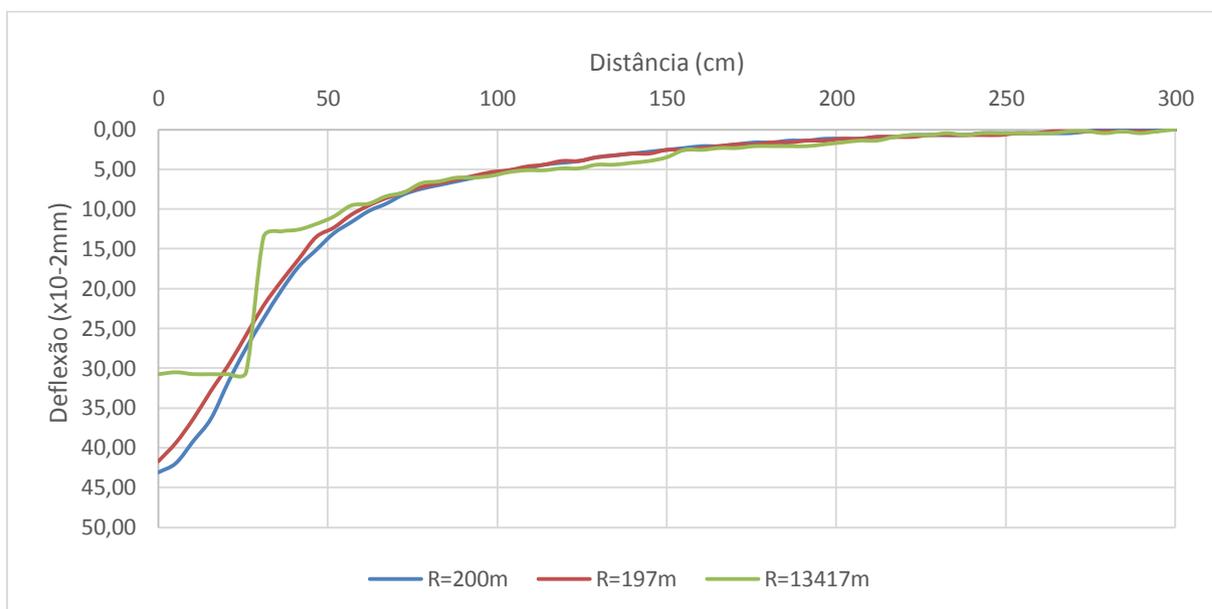


Figura 6.45 – Pista 2 LD: Deflexão e raio de curvatura para $N=80.000$ (Seção 5)

A Figura 6.46 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para $N=160000$, em medições na seção 5 da pista 2 (LD) em 19/04/2013, no medição a temperatura da pista era de 26°C porém as deflexões foram corrigidas para 20°C .

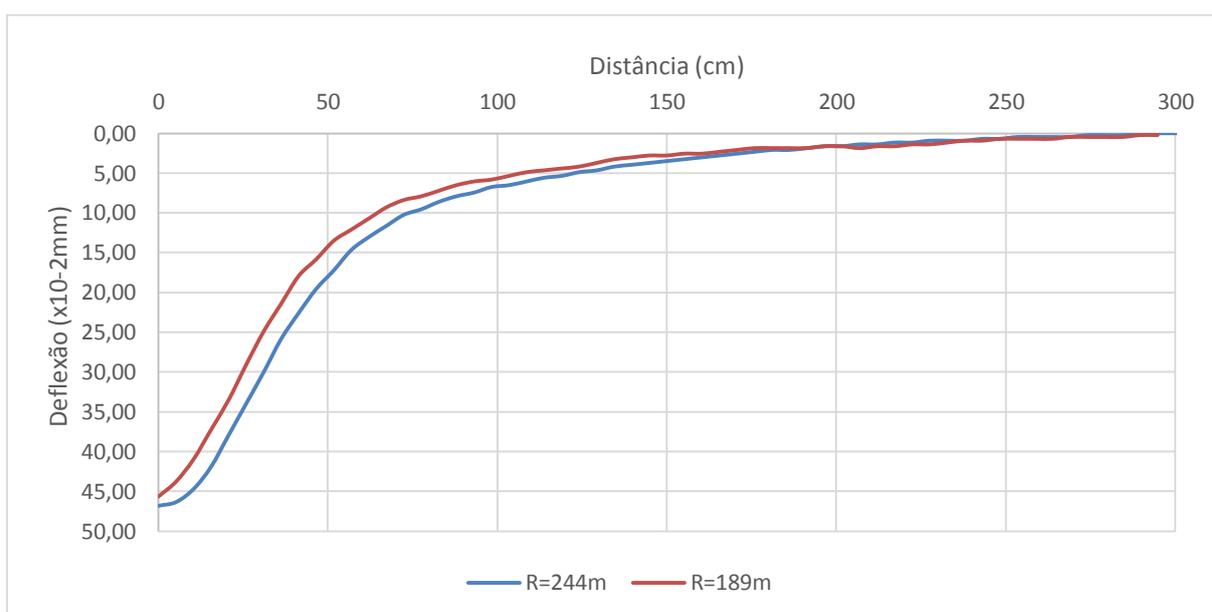


Figura 6.46 – Pista 2 LD: Deflexão e raio de curvatura para $N=160.000$ (Seção 5)

A Figura 6.47 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para $N=224000$, em medições na seção 5 da pista 2 (LD) em 06/05/2013, no momento a temperatura da pista era de 22°C , porém as deflexões foram corrigidas para 20°C .

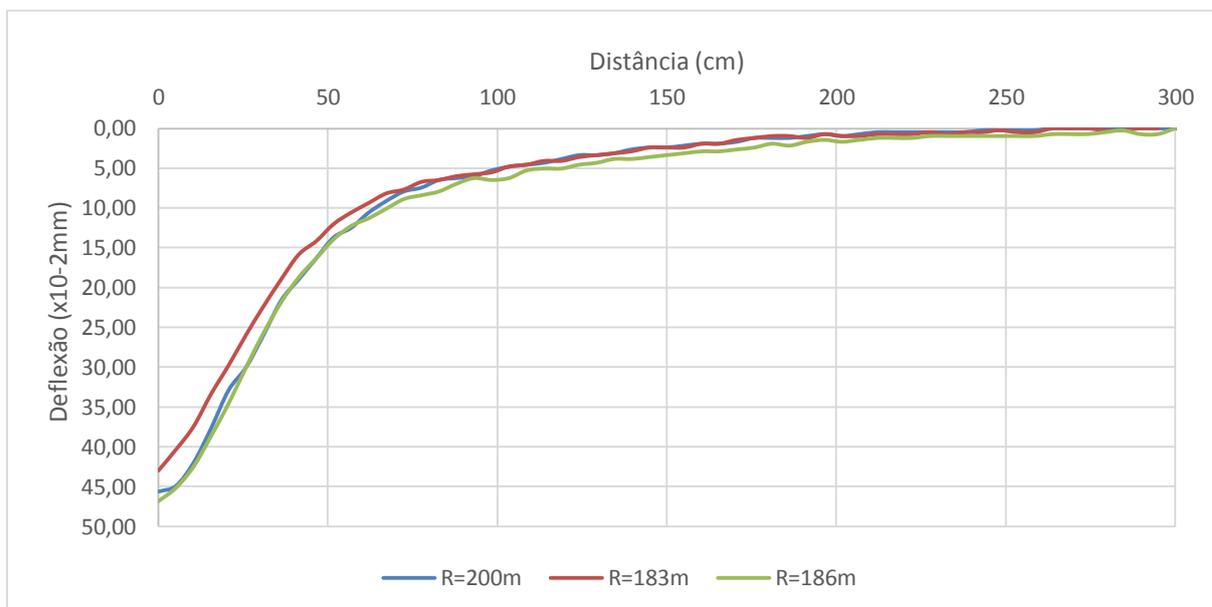


Figura 6.47 – Pista 2 LD: Deflexão e raio de curvatura para $N=224.000$ (Seção 5)

A Figura 6.48 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para $N=320000$, em medições na seção 5 da pista 2 (LD) em 27/06/2013, no momento a temperatura da pista era de 19°C , porém as deflexões foram corrigidas para 20°C .

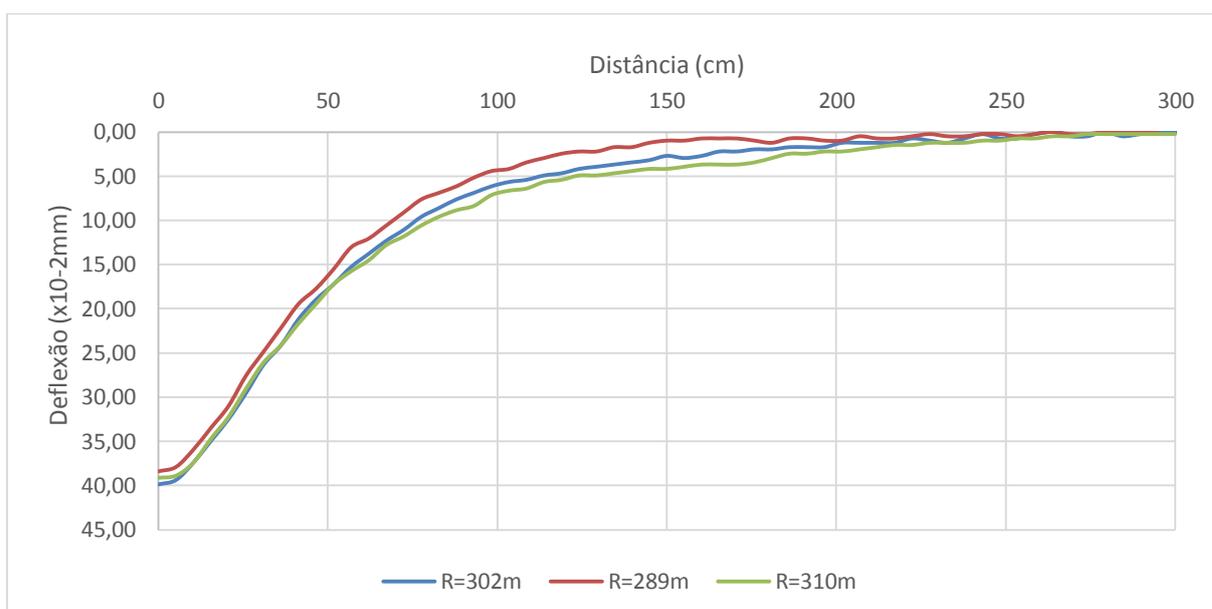


Figura 6.48 – Pista 2 LD: Deflexão e raio de curvatura para $N=320.000$ (Seção 5)

A Figura 6.49 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para $N=352000$, em medições na seção 5 da pista 2 (LD) em 05/07/2013, no momento a temperatura da pista era de $19,2^{\circ}\text{C}$ porém as deflexões foram corrigidas para 20°C .

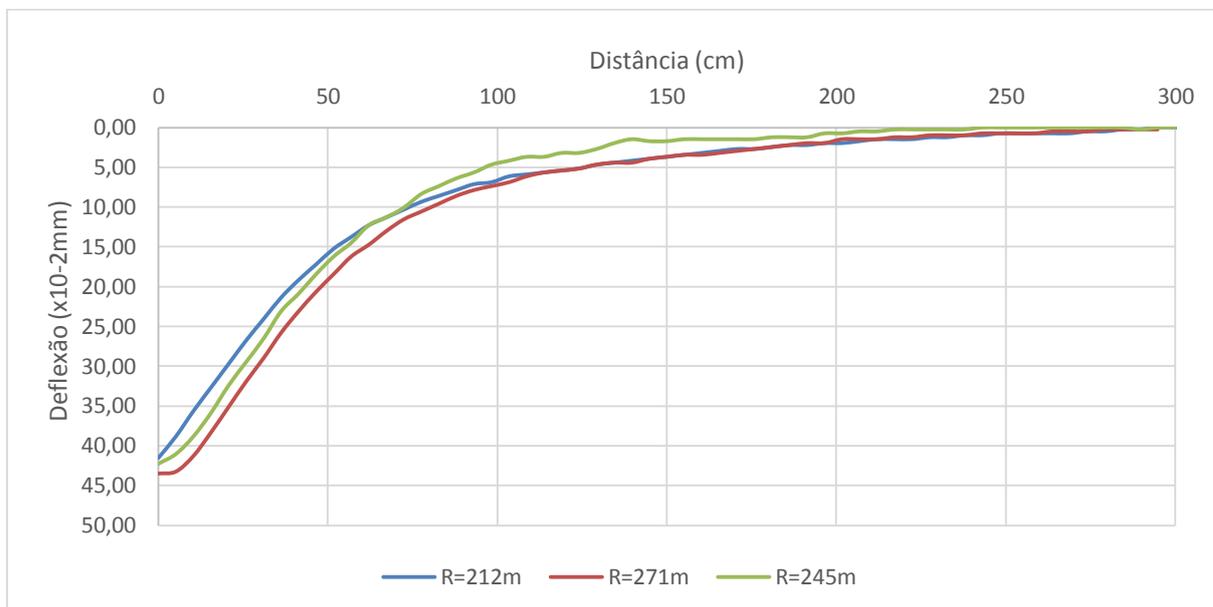


Figura 6.49 – Pista 2 LD: Deflexão e raio de curvatura para $N=352.000$

A Figura 6.50 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para $N=390400$, em medições na seção 5 da pista 2 (LD) em 23/07/2013, no momento a temperatura da pista era de 16°C porém as deflexões foram corrigidas para 20°C .

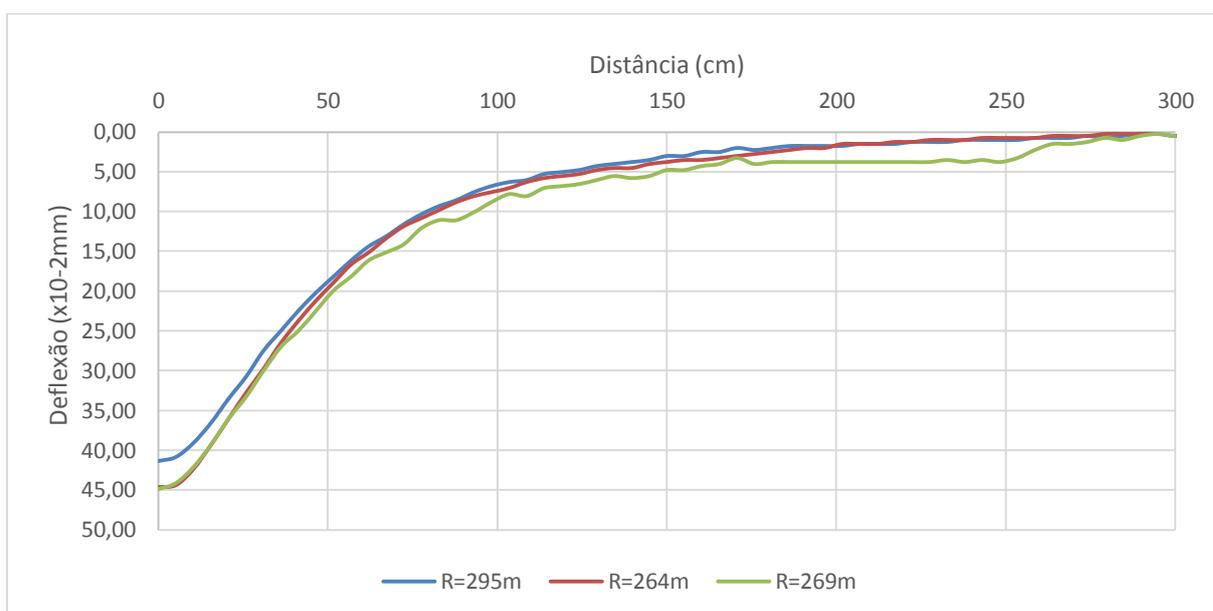


Figura 6.50 – Pista 2 LD: Deflexão e raio de curvatura para $N=390.400$ (Seção 5)

A Figura 6.51 apresenta as deflexões e os raios de curvatura para $N=538080$, em medições na seção 5 da pista 2 (LD) em 16/10/2013, no momento a temperatura da pista era de 22°C , porém as deflexões foram corrigidas para 20°C .

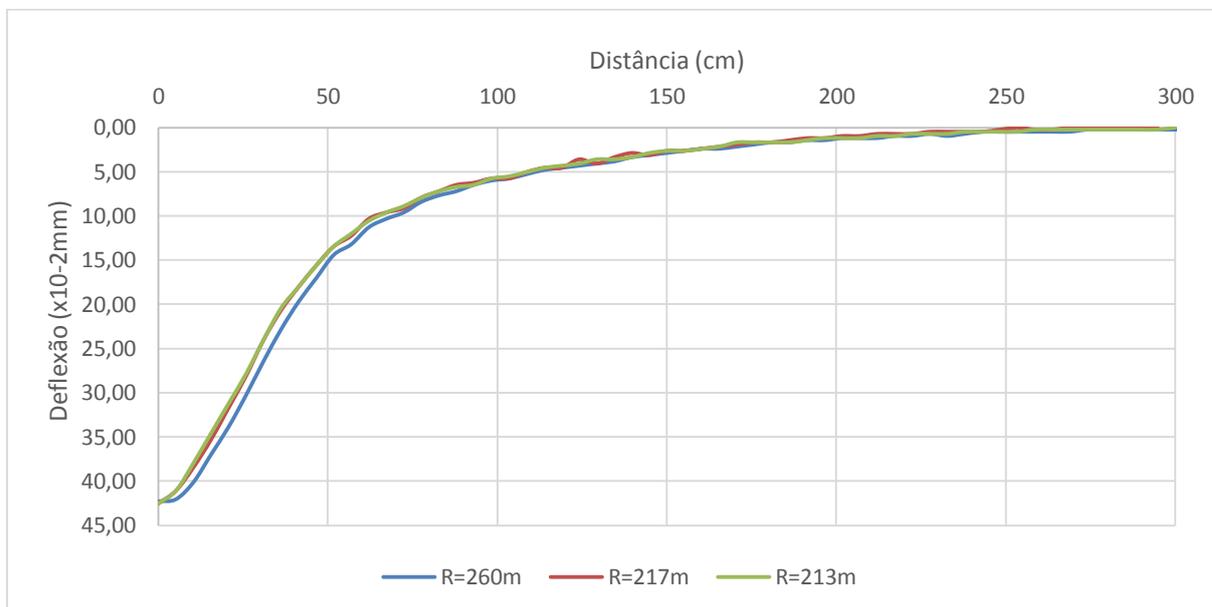


Figura 6.51 – Pista 2 LD: Deflexão e raio de curvatura para $N=538.080$ (Seção 5)

A tabela 6.7 faz uma síntese das deflexões máximas e dos raios de curvatura e a figura 6.50 mostra o histórico das deflexões máximas ocorridas durante o carregamento do teste acelerado.

Tabela 6.7 – Valores de deflexão e raio de curvatura para diferentes N – Pista 2 LD

N	Deflexão ($\text{mm}\cdot 10^{-2}$)	Raio de Curvatura (m)
38.400	42,63	224
80.000	43,10	200
160.000	46,82	244
224.000	38,39	289
320.000	42,26	245
352.000	44,64	264
390.400	42,50	213
538.080	42,00	217

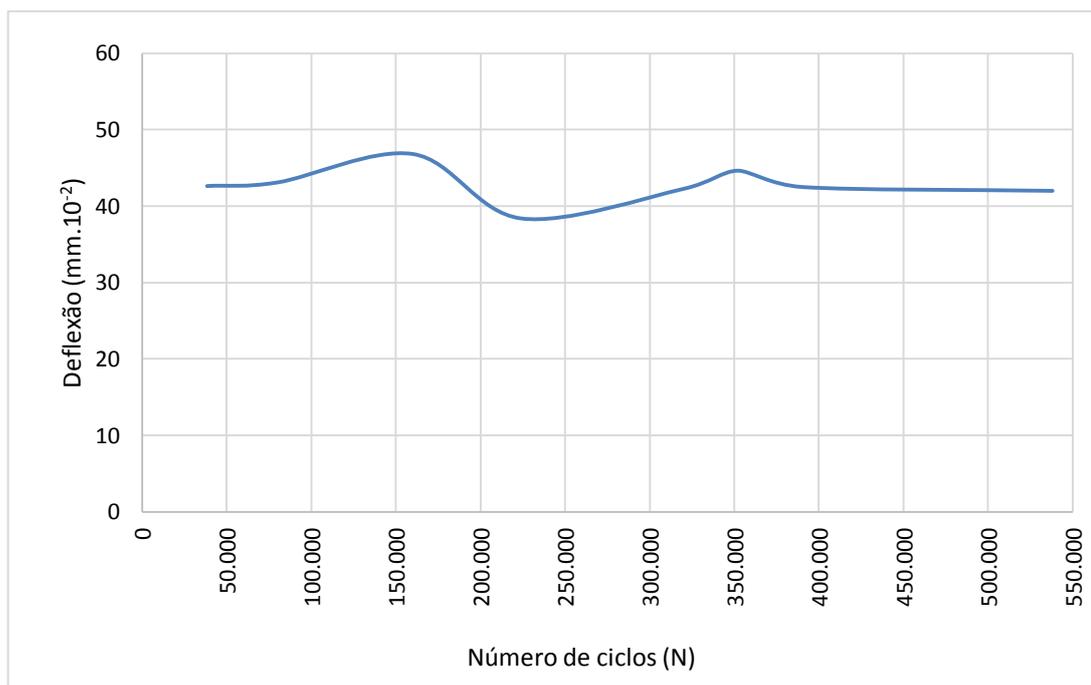


Figura 6.52 – Pista 2LD: Histórico de deflexões máximas (Seção 5)

6.3.4 Parâmetros de Comportamento – Pista 2 (LD)

A pista de testes acelerados 2, no lado direito (LD), foi analisada até um número N de repetições do eixo padrão de 82kN igual a 538.080. Pode-se observar algumas pequenas trincas que ocorreram quando da execução do pavimento e que não se alastraram durante o teste. Também não ocorreram panelas nem qualquer tipo de patologia que pudesse tornar o pavimento não adequado para rolamento.

A seção central, de número 5, por estar localizada em um ponto em que a velocidade, apesar de baixa, é constante e fluente, evitando-se assim o trecho de aceleração e o de frenagem, foi a escolhida como seção de controle do monitoramento. Porém para análise de resultados, foram verificados os ATR em uma seção antes (seção 4) e uma seção depois (seção 6) da seção de controle (seção 5).

O equipamento utilizado para medir afundamentos de trilho de rodas foi o perfilógrafo sobre a seção transversal de controle, e os resultados estão apresentados nos gráficos a seguir.

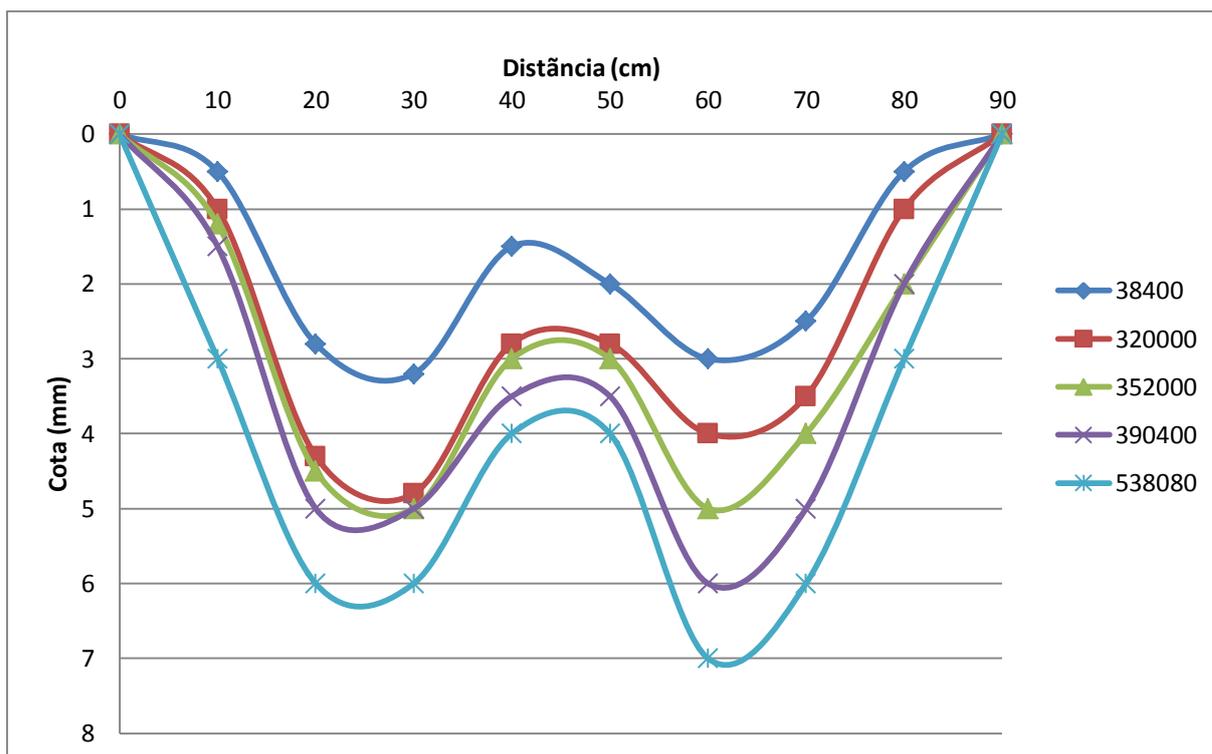


Figura 6.53 – Pista 2 LD: Afundamentos por trilho de rodas na Seção 4

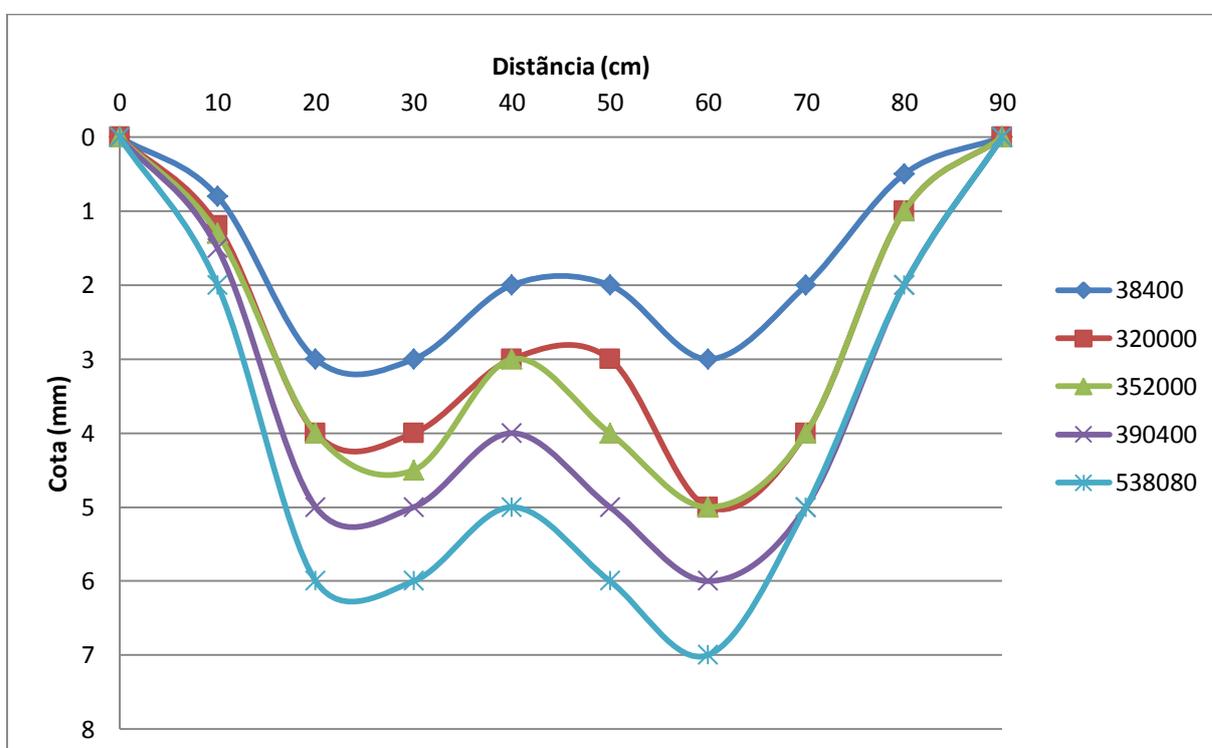


Figura 6.54 – Pista 2 LD: Afundamentos por trilho de rodas na Seção 5

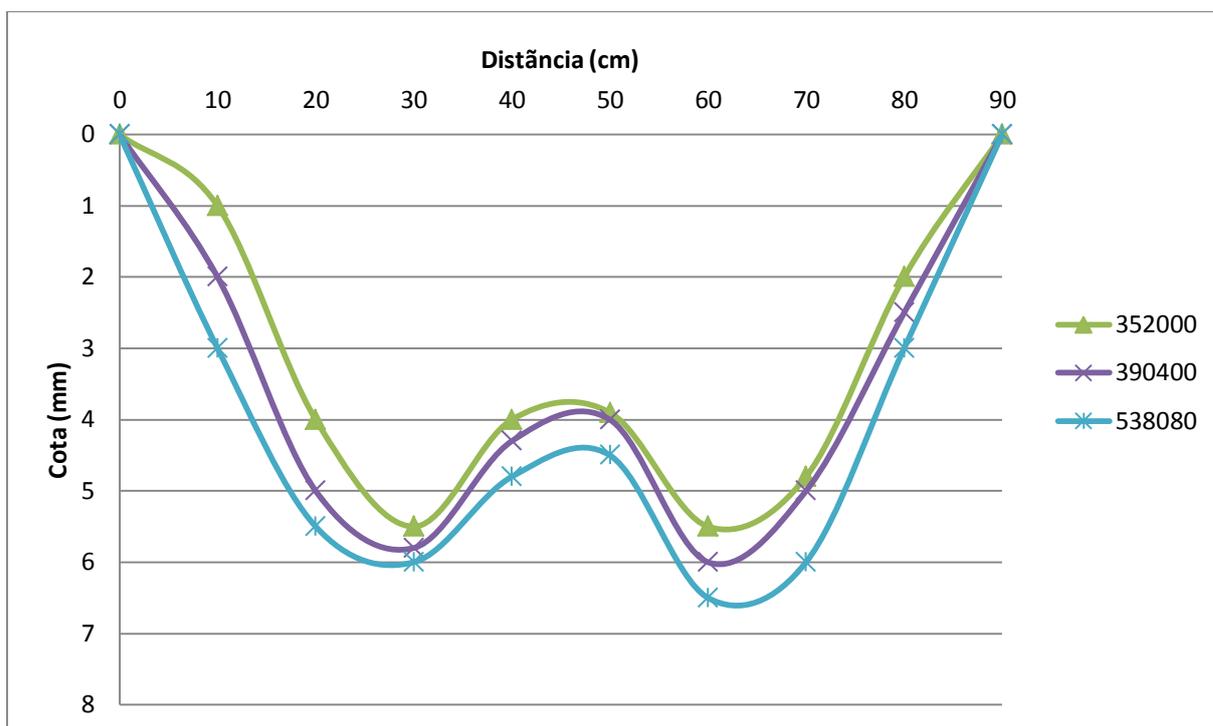


Figura 6.55 – Pista 2 LD: Afundamentos por trilho de rodas na Seção 6

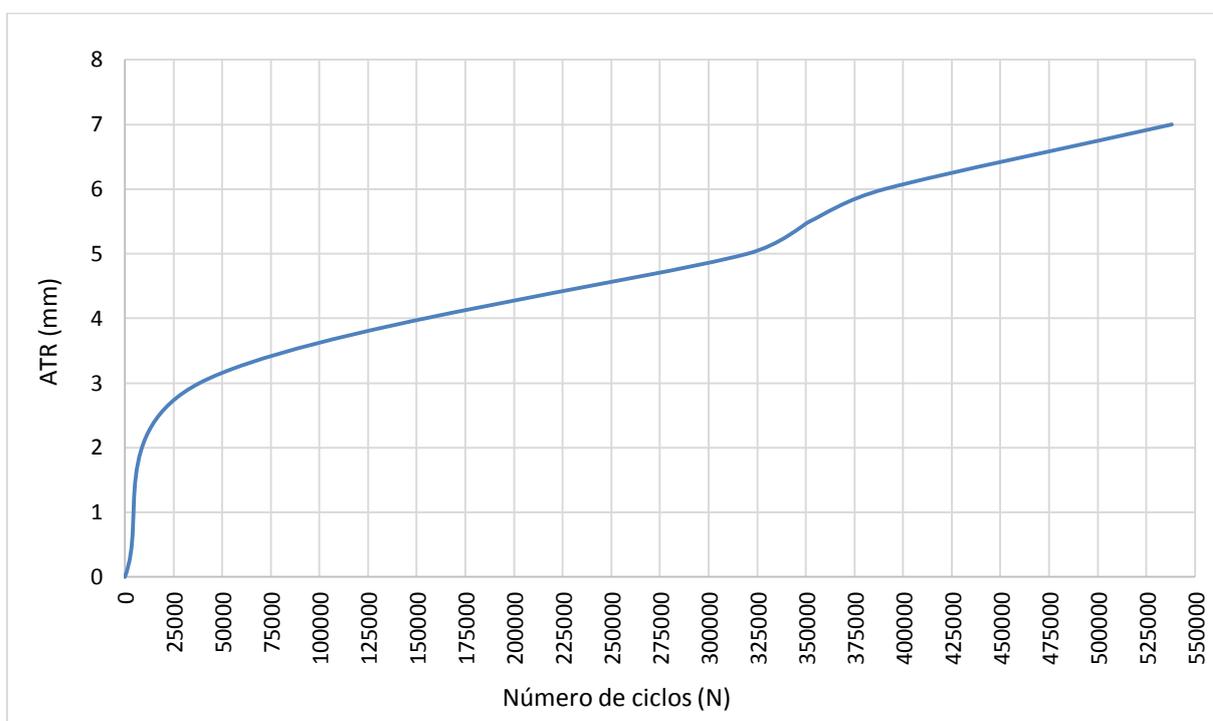


Figura 6.56 – Pista 2LD: Evolução dos ATR máximos (Seção 5)

A Figura 6.57 e a Figura 6.58 mostram a aparência final da pista 2 após os testes acelerados, na Figura 6.57 pode ser observado que os ATR no lado direito são mais expressivos que os do lado esquerdo, o que era de se esperar porque o carregamento no lado direito chegou a ser cinco vezes superior ao do lado esquerdo em equivalências do eixo padrão de 82kN, foram aplicados 538000 ciclos no LE e 103000 ciclos no LD.



Figura 6.57 – Pista 2 LD e LE: Aspecto final da evolução dos ATR



Figura 6.58 – Pista 2 LD e LE: Aspecto final da evolução dos ATR

A água na pista que pode ser observada na Figura 6.58 evidencia que os maiores ATR ocorreram no lado direito sendo que pouco se observa do lado esquerdo. Também é possível observar que os ATR são mais expressivos no trecho de desaceleração e frenagem, que ocorrem a partir da seção 6 até a seção 9 quando para.

É característica do simulador (Figura 6.59), que nos 3m iniciais, da seção 1 até a seção 4, que o trem de carga parta do repouso aumentando sua velocidade devido a aceleração, nos dois me centrais, entre a seção 4 e a seção 6, um trecho de velocidade constante e o mais indicado para medições motivo pelo qual a seção 5 foi escolhida como de controle. E após, nos últimos 3m, a seção de desaceleração e frenagem.



Figura 6.59 – Ciclo do simulador de tráfego do LAPAV/UFRGS

6.4 CONTROLES E AVALIAÇÕES ADICIONAIS

6.4.1 Investigação do Afundamento por Trilho de Rodas – Pista 2 (LD)

Com o intuito de verificar a ocorrência do afundamento por trilho de rodas foram extraídos corpos de prova da pista 2 (LD) junto à seção transversal 6.

As amostras números 1 (CP1) e 3 (CP3) foram retiradas de locais onde não houve passagem do rodado e onde também não ocorreu nenhuma deformação devido ao carregamento, o objetivo destas extrações foi somente de verificar a espessura da camada construída para aferir se o afundamento ocorreu na camada de revestimento.

A amostra número 2 (CP2) foi extraída de um dos pontos mais severamente atingido pelo ATR, a Figura 6.60 mostra a posição dos furos 1, 2 e 3 no pavimento de onde foram extraídos os CPs.



Figura 6.60 – Posição dos furos de onde foram extraídos os CPs para verificação da espessura da camada de revestimento

Foram feitas medidas nas amostras para a determinação das suas espessuras medianas, a Tabela 6.8 mostra os valores médios encontrados em diversas medidas realizadas e a mediana da espessura de cada corpo de prova.

Tabela 6.8 – Espessura de CPs extraídos da Pista 2 LD

Medidas da espessura (cm)		
CP 1	CP 2	CP 3
11,80	11,4	11,2
11,90	11,4	11,2
11,90	11,6	11,2
12,00	11,5	11,1
12,00	11,5	11,2
12,00	11,4	11,2
12,10	11,4	11,2
12,10	11,3	11,1
12,10	11,3	11
12,10	11,4	11,1
12,00	11,4	11,3
12,00	11,4	11,4
12,00	11,2	11,4
11,90	11,4	11,3
11,90	11,1	11,4
11,90	11,2	11,2
11,90	11,3	11,2
11,90	11,3	11,2
11,90	11,5	11,3
11,80	11,3	11,2
11,80	11,5	11,2
Mediana	Mediana	Mediana
11,90	11,40	11,20



Figura 6.61 – Corpos de prova extraídos da Pista 2 - LD

Com base nas espessuras encontradas e pelo distanciamento entre os CPs foi possível se estabelecer um padrão para a espessura esperada de revestimento asfáltico na seção verificada (Figura 6.62), traçando-se linhas guias observa-se que a espessura do corpo de prova 2 (CP2), mostrada na Figura 6.63, era a esperada antes do carregamento, sugerindo que não houve ATR no revestimento asfáltico ou que, se houve foi praticamente insignificante perante o total ocorrido durante o teste, não chegando a 1mm do ATR ocorrido.

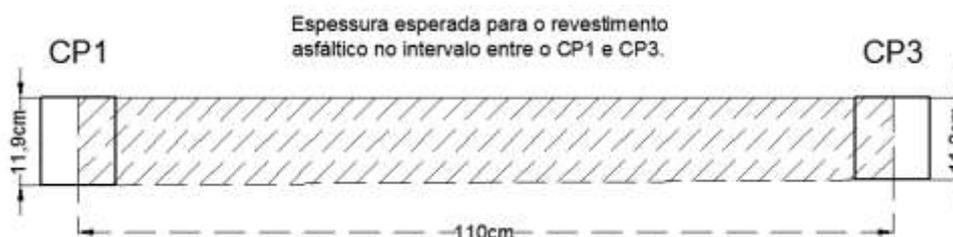


Figura 6.62 – Espessura esperada de CA na pista 2 – LD antes do carregamento

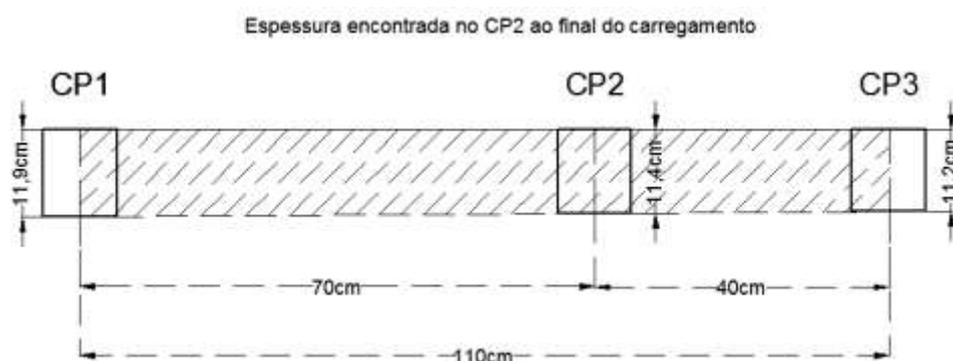


Figura 6.63 – Espessura do CP extraído da pista 2 – LD no local do ATR máximo.

O mais provável é que a base de brita graduada e o subleito tenham uma maior contribuição na deformação permanente observada gerada pela carga do simulador, e que o revestimento tenha cedido para acompanhar a deformação da base e do subleito, porém mantendo a sua espessura de construção, conforme mostrado na Figura 6.64, ou contribuindo com a deformação permanente em um percentual muito pequeno do ATR total verificado.



Figura 6.64 – Situação mais provável de ocorrência no revestimento asfáltico

6.4.2 Avaliação do grau de compactação da mistura morna – MM2

Para avaliar se a mistura asfáltica morna atingiu o grau de compactação desejado foi realizada a pesagem (Figura 6.65) dos corpos de prova da mistura morna produzida e utilizada na pista 2 (MM2) para a determinação da sua densidade aparente com objetivo de efetuar a comparação com a densidade aparente do projeto da mistura.

O maior grau de compactação ocorreu, como era de se esperar, no CP2, que foi extraído da trilha onde houve carregamento, porém o grau de compactação do CP3, que fica próximo ao centro em área não carregada também apresentou uma compactação próxima a 100%.

Já o CP1, extraído de área não carregada, porém próxima a borda da pista, foi o que apresentou o menor grau de compactação, porém acima de 95%.

Assim foi possível verificar que o grau de compactação está acima de 99% no CP2 e CP3 e acima de 95% para o CP1, ou seja, a mistura morna atingiu o objetivo de compactação em temperatura abaixo da usual, com média de 103°C.



Figura 6.65 – Pesagem dos corpos de prova extraídos da pista 2D

A seguir apresentam-se os graus de compactação encontrados para cada amostra.

- Densidade aparente de laboratório = 2.429 kg/m³
- Densidade aparente de campo (CP1) = 2.319,38 kg/m³
- Grau de compactação (CP1) = $\frac{2.319,38 \text{ kg/m}^3}{2.429 \text{ kg/m}^3} = 0,955 \rightarrow 95,5\%$
- Densidade aparente de campo (CP2) = 2.410,78 kg/m³
- Grau de compactação (CP2) = $\frac{2.410,78 \text{ kg/m}^3}{2.429 \text{ kg/m}^3} = 0,993 \rightarrow 99,3\%$
- Densidade aparente de campo (CP3) = 2.409,29 kg/m³
- Grau de compactação (CP3) = $\frac{2.409,29 \text{ kg/m}^3}{2.429 \text{ kg/m}^3} = 0,992 \rightarrow 99,2\%$

6.4.3 Retroanálise das camadas do pavimento

Através do módulo de retroanálise do programa SisPave 2009 (Franco, 2007), fixando-se o valor de 4126 MPa para a camada de revestimento, determinado através de ensaio de módulo de resiliência em laboratório, e utilizando-se dados da última bacia de deflexões da pista 2, no lado direito (P2D), determinou-se o módulo de resiliência das camadas de base e do subleito, conforme mostrado na Figura 6.66.

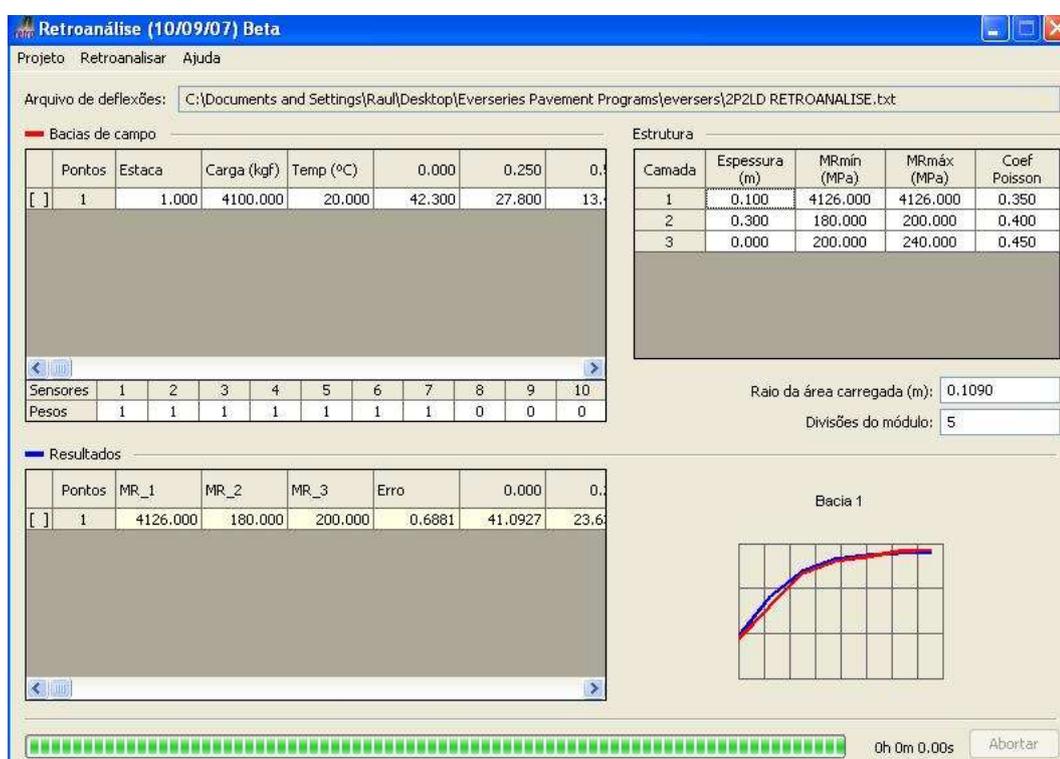


Figura 6.66 – Resultado da retroanálise através do SisPav 2009

Os resultados encontrados para módulos de resiliência (MR) foram:

- MR do revestimento asfáltico: 4126 MPa (determinado por ensaio)
- MR da base de brita graduada: 180 MPa (determinado por retroanálise)
- MR do subleito: 200 MPa (determinado por retroanálise)

6.4.4 Análise Elástica de Múltiplas Camadas

Utilizando o modelo de Preussler e Pinto para a determinação da deflexão admissível em função do número N determinado pela equação:

$$\log (D_{adm}) = 3,148 - 0,188 \cdot \log (N)$$

Considerando-se um número $N = 1,1 \times 10^7$, obtém-se um valor de deflexão admissível igual a $67,92 \times 10^{-2}$ mm.

Através do módulo AEMC, do SisPav 2009, foi encontrada uma deflexão de $31,1 \times 10^{-2}$ mm no topo da camada, inferior à calculada pela equação de Preussler e Pinto.

A deflexão encontrada na pista, no valor de $42,3 \times 10^{-2}$ mm, através de medição com viga eletrônica, difere do valor encontrado pelo software AEMC, porém está abaixo da deflexão admissível proposta por Preussler e Pinto.

Adotando-se a mesma equação de Preussler e Pinto para realizar uma previsão de número N em função da deflexão encontrada na medição com a viga eletrônica obtém-se uma previsão para $N = 1,25 \times 10^7$.

O módulo AEMC do Sispav também mostrou o que havia sido sugerido no item 6.4.1 e mostrado na figura 6.64, ou seja, as deflexões ocorreram principalmente nas camadas de base de brita graduada e subleito, com a camada de revestimento apenas acompanhando estas deformações.

Como o principal objetivo desta tese foi estudar a viabilidade técnica da produção e aplicação de mistura morna, as camadas inferiores passam a ter menor importância, uma vez que podem ser utilizadas variações que resultem em melhorias no suporte ao revestimento, a maior importância estava em avaliar a tecnologia proposta.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A seguir apresentam-se as considerações finais e conclusões que resultaram da análise de todo o experimento bem como algumas sugestões para futuras pesquisas.

7.1 CONCLUSÕES

O objetivo desta pesquisa foi o de verificar a viabilidade técnica de se executar pavimento asfáltico com mistura morna através da utilização de zeólitas naturais como aditivo e com essa finalidade foram construídas duas pistas para testes acelerados no simulador de tráfego do LAPAV/UFRGS as quais serão feitas análises distintas.

Primeiro teste

No primeiro teste foi feita a mistura morna foi produzida na temperatura média de 114,3°C e compactada na temperatura média de 92°C enquanto os estudos laboratoriais foram executados em 120°C e 95°C, respectivamente.

Desta forma valores encontrados em testes laboratoriais para módulo de resiliência e resistência a tração, que apresentaram valores adequados possuíram valores reduzidos na execução, apesar de ainda adequados. O valor de dano por umidade induzida, não apresentou valor adequado em ambos os casos, sendo ainda de menor na mistura de execução.

Também foi verificado que a mistura de execução apresentou um teor de vazios acima do previsto no projeto e uma deficiência no teor de CAP.

No teste acelerado, entretanto, o resultado pode ser considerado surpreendente, pois a pista, após mais de 100.000 ciclos não apresentou afundamentos de trilho de rodas nem trincamentos evidentes, e o resultado das deflexões foram altamente satisfatórios.

Assim se pode confirmar a excelente resposta da pista pré-existente, construída em asfalto de módulo elevado, como base para o recapeamento executado e também, a boa resposta da mistura morna na camada delgada executada apesar de alguns resultados laboratoriais não desejáveis.

Deve-se considerar que neste teste foi utilizado cal hidratada na mistura morna, em um período de cem dias onde houve uma precipitação pluviométrica total de 360mm, equivalente a uma média diária de 3,6mm, podendo ser considerado um período bastante chuvoso.

Entretanto os resultados de dano por umidade induzida causaram um certo desconforto, principalmente associado a utilização de cal hidratada.

Desta maneira, apesar do bom desempenho junto ao simulador, sugerimos a não utilização de misturas mornas com cal hidratada e na temperatura de fabricação de 120°C, uma vez que o segundo teste apresentou melhores resultados.

Segundo teste

No segundo teste, com temperatura de execução de 131°C e de compactação de 103,4°C contra 130°C e 105°C de projeto, respectivamente e sem cal hidratada na mistura os resultados foram adequados em módulo de resiliência, resistência a tração e dano por umidade induzida e apresentou uma curva de fadiga adequada.

Na mistura de execução o teor de vazios foi menor que o de projeto e o teor de betume superior, o inverso do primeiro teste, onde provavelmente um fato explica a ocorrência do outro.

Esta pista de testes foi construída desde a camada de base e foi ensaiada em dois lados, um até 100.000 ciclos e outra até 500.000 ciclos equivalentes.

Observando as chuvas que ocorreram, no lado esquerdo houve 802mm e no lado direito 1293mm de precipitação pluviométrica durante o período de testes, perfazendo uma média diária de 3,4mm e 4,1mm, respectivamente, também podendo ser considerados períodos bastante chuvosos.

Analisando os resultados obtidos de módulo de resiliência, resistência à tração, dano por umidade induzida e monitoramento das pistas experimentais através do controle de deflexões com a viga eletrônica, de deformação permanente com o perfilógrafo e também pela observação visual das pistas podemos acreditar que os resultados são satisfatórios e animadores.

Chegou-se a uma mistura que possui um valor adequado de dano por umidade induzida, que é um fator muito importante no estudo de misturas mornas, aliado a valores também adequados de módulos de resiliência e resistência à tração, que induzem a conclusão de que problemas de deformação permanente poderão ser controlados ou que pelo menos se tenha um comportamento similar à de um CA convencional.

Os resultados obtidos pela viga eletrônica também mostram um bom desempenho das camadas do pavimento, sobretudo no topo das camadas asfálticas, mostrando que a tecnologia pode ser usada para recapeamentos e construção de pistas novas.

A análise dos resultados do perfilógrafo mostraram afundamentos mais significativos na segunda pista experimental, no lado direito, onde foi aplicada uma carga de 100kN no rodado do simulador de tráfego do LAPAV/UFRGS, porém as deformações verificadas estão compatíveis com o esperado.

Os afundamentos de trilho de rodas verificados ao final dos testes em ambos os lados da pista foram considerados compatíveis com o volume e tipo do tráfego, e ocorreram de forma mais acelerada no início dos testes, as deflexões foram consideradas satisfatórias e não foram verificados trincamentos relevantes.

Porém após a extração de corpos de prova da trilha mais profunda e de locais ao lado onde o teste não ocorreu foi possível perceber que possivelmente não houve afundamentos por trilho de rodas no revestimento asfáltico ou que, se houve, foi muito pequeno, pois as amostras apontam para a conservação da espessura do revestimento, sugerindo que os maiores ou a totalidade dos afundamentos ocorreram na base e subleito.

Os dificilmente perceptíveis trincamentos que ocorreram em função dos testes não foram o suficiente para a abertura de panelas e degradação total do pavimento mesmo após de 500.000 ciclos equivalentes do eixo padrão, pois após este período o revestimento ainda apresentava boas condições de rolamento.

Quanto ao simulador

É importante lembrar que o simulador de tráfego possui uma ação muito severa sobre o pavimento, pelo trânsito de uma carga pesada constante e canalizada e também pela baixa velocidade, além de ser um teste acelerado, ou seja, um tráfego esperado para 10 anos é obtido em alguns meses.

O comportamento do pavimento no simulador lembra o que ocorre junto a uma parada de ônibus, aonde o veículo pesado chega a baixa velocidade, para e após arranca também em baixa velocidade.

Mas neste caso nem sempre o ônibus tem carga total, estando lotado, ou carga similar a do simulador de tráfego e nem a frequência é a mesma, porém é sabido que as paradas de ônibus, quando em asfalto, são um dos locais que possuem pavimentos mais danificados dentro das cidades, com severos danos ocorrendo em tempos muito curtos e recorrentes investimentos em manutenção e conservação. Portanto a deformação permanente em um pavimento asfáltico submetido ao simulador de tráfego é esperada em qualquer situação, sobretudo com a aplicação de um carga de 100kN sobre o rodado.

Quanto à zeólita natural

Na análise da zeólita, ela aparentemente tem condições de cumprir o papel que dela se espera, apesar de que, pelos testes verificados, possa se ter a certeza de que a mesma possui em seu estado natural água facilmente disponível que varia em torno de 6% do seu peso, e podendo fornecer, em seu estado natural, um máximo de 15% de água do seu peso. Porém, caso seja necessário maior teor de água, entende-se que, ou se possa adicionar água à zeólita antes da sua utilização ou aumentar o seu teor na mistura.

Deve-se lembrar da maneira artesanal de produção, sendo que para produção industrial deverá ser adicionado um silo dosador de zeólita.

Quanto à cal hidratada

Não foi conclusivo durante os testes se a cal hidratada, sobretudo a dolomítica, confere danos ou vantagens à mistura morna.

Foi possível observar que nos estudos laboratoriais, em amostras que possuíam cal hidratada, foram obtidos os melhores resultados de resistência à tração, e que na pista onde foi testado, o resultado da análise do desempenho foi considerado satisfatório, apesar de problemas em todo o processo.

Quanto aos projetos de misturas

Entendemos que ambos os projetos de mistura podem ser utilizados, porém sugere-se a não utilização de cal hidratada e a fabricação da mistura morna na temperatura de 130°C, o principal motivo deste entendimento é porque as misturas que não continham cal hidratada e a fabricada na temperatura de 130°C foram as que apresentaram melhores resultados no ensaio de dano por umidade induzida, fator muito importante no estudo das misturas mornas.

O projeto de mistura 1, por possuir um teor maior de agregados graúdos, e construído sobre uma pista pré-existente com revestimento asfáltico de alto módulo de elasticidade, possivelmente tenham sido responsáveis pelo bom desempenho da pista 1 no teste acelerado, porém os baixos valores encontrados para módulo de resiliência e dano por umidade induzida, não recomendam a sua utilização do modo como foi produzido, possivelmente com o aumento da temperatura de fabricação para 130°C e sem utilização de cal hidratada, o projeto se enquadre dentro dos requisitos necessários.

O projeto de mistura 2 se mostrou mais consistente, com melhores resultados, e de forma global alcançando os requisitos necessários nos métodos de ensaios e normas para a produção e aplicação de concretos asfálticos, que desta forma recomendam a sua utilização da forma que foi concebido.

Em ambas as misturas houve pequeno problema no índice de forma dos agregados miúdos, que se corrigidos, podem proporcionar melhor desempenho.

Quanto ao processo de fabricação e compactação

É de grande importância saber se esta tecnologia proporciona resistência, durabilidade e características técnicas similares às tecnologias convencionais atualmente empregadas de forma que transmita segurança aqueles que a vão utilizar.

Por este motivo esta pesquisa foi realizada, para que fossem estabelecidas comparações com as tecnologias convencionais utilizadas e para se observar, qual o nível de comprometimento e de satisfação, que esta tecnologia de misturas mornas utilizando zeólitas naturais poderia proporcionar.

Entretanto se observa que apesar dos resultados satisfatórios junto ao simulador existe uma tendência de melhores resultados de dano por umidade induzida quando se elevou a temperatura da produção de 120°C para 130°, bem como quando não foi utilizada cal hidratada na mistura e, desta forma, entendemos ser melhor recomendada a produção da mistura morna com adição desta zeólita natural desta maneira, ou seja, a 130°C e sem adição de cal hidratada.

Verificou-se que nas 3 temperaturas de produção estudadas, 130°C, 120°C e 110°C, as duas primeiras atingiram valores satisfatórios no dano por umidade induzida e a última não, reforçando a ideia de que a temperatura de produção mais elevada melhora este quesito.

Deve-se observar que a maior parte das tecnologias de mistura morna existentes produzem suas massas a temperaturas com valores entre 130°C e 140°C, o que também se confirmou no estudo desta tese.

O objetivo principal da zeólita no processo é de baixar a viscosidade do CAP quando este estiver a temperaturas abaixo das usuais e permitir, desta forma, que a mistura asfáltica ocorra com todos agregados cobertos pelo CAP e aglomerados por adesividade adequada.

Todavia se percebe que esta redução de temperatura tem um limite para esta tecnologia, abaixo da qual a adesividade fica comprometida.

Também é possível verificar que as misturas sem cal tiveram desempenhos melhores que seus pares com cal, indicando que a cal hidratada utilizada não ajudou a promover uma melhor adesividade.

No que diz respeito à temperatura de compactação entendemos que seja desejável que não seja inferior a 90°C, porém os serviços de compactação podem ser iniciados a qualquer temperatura acima desta, ou seja, podem ser iniciados os serviços de espalhamento e compactação no momento em que a carga de mistura morna chegar ao local de aplicação.

Entende-se que os resultados obtidos foram satisfatórios e que a tecnologia pode ser utilizada, porém é fundamental que o processo ocorra de forma industrial e não artesanal, ou seja, será necessária a adaptação de um dosador que possa introduzir a zeólita de maneira mecânica e com maior controle.

Considerações finais

Assim sugere-se a utilização desta tecnologia de maneira inicial em locais de tráfego moderado e que seja feita uma observação do desempenho em uma via pública, na temperatura de fabricação de 130°C e sem adição de cal hidratada para que, em um futuro, possa ser ampliada para vias urbanas e estradas de tráfego mais pesado.

Como ilustração, na entrada do LAPAV foi feito um recapeamento com mistura morna fabricada a 114°C com cal hidratada, em abril/2010, juntamente com a primeira pista experimental, que não entrou de forma oficial nesta pesquisa primeiro porque não está submetida ao simulador, depois porque não foi feito nenhum tratamento estrutural para a sua aplicação e por fim porque foi compactada em temperatura inferior a mínima estipulada.

Mas este trecho vem sendo observado porque estava totalmente degradado e está sendo utilizado em um local público, que poderia e deveria ter sido recapeado por um CA convencional.

E este pequeno trecho, mesmo executado com material que sobrou da pista experimental 1 e com finalização da compactação com temperatura em torno de 50°C, após quatro anos de utilização, ainda apresenta-se em condições totais de tráfego, que embora saibamos que apresenta tráfego leve e local, mostra durabilidade, resistência à intempéries como o calor da

radiação solar e os danos por umidade causados pelas chuvas, mostrando que, para esta utilização tem se mostrado também satisfatório.

Assim, consideram-se satisfatórios os resultados obtidos pela pesquisa, através da utilização de um mineral de baixo valor agregado, que poderá produzir uma mistura asfáltica morna de qualidade aceitável, e que deve ocupar o seu lugar no espaço de forma gradual com maiores investimentos no processo de fabricação.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizado o experimento descrito nesta tese, sugere-se para pesquisa em trabalhos futuros:

Estudos com diferentes teores de zeólita natural e/ou adição de água às mesmas para verificar se haverá algum tipo de ganho no processo.

Análise de diferentes temperaturas de fabricação. Foi observado que pelo motivo da mistura morna ser produzida em temperatura inferior, a mesma pode ser compactada tão logo chegue ao local de aplicação, não necessitando esperar que sua temperatura recue a uma temperatura de compactação de projeto, porém não deverá ser inferior a esta.

A verificação do comportamento com aditivos melhoradores de adesividade, por este ser um dos grandes problemas verificados no estudo de misturas mornas.

Pesquisas com incorporação de outros tipos de aditivos que proporcionem algum tipo de vantagem, como um melhor retorno elástico ou elevação do módulo de resiliência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials. Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage: T 283. Washington D.C., USA, 1989.

_____ - Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending: T 321. Washington D.C., USA, 2007.

_____ - Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures (Rice Test): T 209. Washington D.C., USA, 1999.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Misturas asfálticas: Determinação do dano por umidade induzida: NBR 15617. Rio de Janeiro, 2011.

_____ - Cimento Portland. Análise Química: Determinação de perda ao fogo. NBR NM 18. Rio de Janeiro, 2012.

_____ - Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol. NBR 14950. Rio de Janeiro, 2003.

_____ - Misturas asfálticas: Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. NBR 15619. Rio de Janeiro, 2012.

_____ - Misturas asfálticas: Determinação da resistência à tração por compressão diametral. NBR 15087. Rio de Janeiro, 2012.

_____ - Misturas asfálticas: Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. NBR 16018. Rio de Janeiro, 2011.

ADHIKARI, S.; YOU, Z. Fatigue Evaluation of Asphalt Pavement using Beam Fatigue Apparatus, *The Technology Interface Journal*, Volume 10, N°3, ISSN # 1523-9926, Spring 2010.

AESCO MADSEN. Ecofoam II. Disponível em:

<<http://www.asphaltequipment.com/documents/EcoFoamII.pdf>>. Acesso em: 12 Fevereiro 2014.

AGUIAR, M. R. M. P., NOVAES A.C., GUARINO A.W.S. Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. *Quím. Nova*, **25**(6B):1145-1154. 2002.

AKZO NOBEL. Rediset®. Disponível em:

<https://www.akzonobel.com/innovation/our_innovations/more_innovations/rediset/>.

Acesso em: 10 Março 2014.

ASTEC INC. Double Barrel Green®. Disponível em:

<http://www.astecinc.com/index.php?option=com_content&view=article&id=117&Itemid=188>. Acesso em: 08 Fevereiro 2014.

ASTM - American Society for Testing and Materials. Cyclical loading applied at a constant strain (or stress) until stiffness decreases significantly: D 7460. West Conshohocken, PA, USA, 2008.

AZAMBUJA, D. M. Estudos de recapeamentos asfálticos de pavimentos através de testes acelerados. Dissertação de Mestrado UFRGS, 2004.

BARTHEL, W.; MARCHAND, J.P.; Von DEVIVERE, M. Warm Mix Asphalt by Adding a Synthetic Zeolite. *Proceedings of the Third Eurasphalt and Eurobitume Conference, Book 1*, Foundation Eurasphalt, Breukelen, Netherlands, 2004. Disponível em: <http://www.aspha-min.com/Downloads.html?file=web/files/Dokumente/0310_warm_mixes_with_zeolites.pdf> Acesso em: 03 fevereiro 2014.

BERNARDI, A.C.C., MONTE, M.B.M., PAIVA, P.R.P., WERNWCK, C.G., HAIM, P.G., POLIDORO, J.C. Potencial de uso da zeólitas na agropecuária. Documento 85, 45p. Embrapa Pecuária Sudeste, 2008.

BERNUCCI et al. Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros.

PETROBRAS/ABEDA, 2006.

BISTOR, B. Aspha-min Warm Asphalt Mixes. Hubbard Construction Co. WMA Technical Working Group Meeting, 2007. Disponível em:

<http://76.12.53.242/submissions/43_20071227_Bob%20Bistor%20-%20FHWA%20ASPHA%20%E2%80%93%20MIN.ppt> Acesso em: 10 Janeiro 2014.

BRECK, D.W. Zeolite Molecular Sieves. Structure, Chemistry and Uses, pp. 313-320 and pp. 731-738. John Wiley & Sons, New York, 1974.

CAVALCANTI, L.S.; FARIA, V.C.; ODA, S.; BARELLA, R.M. Determinação da Resistência à Fadiga de Misturas Asfálticas com diferentes tipos de ligantes asfálticos e agregados. Rio de Janeiro, 2013.

CECA. ARKEMA GROUP. Cecabase RT[®]. Disponível em:

<<http://www.cecachemicals.com/en/expertise/specialty-surfactants-and-polyols/road-construction/warm-mix-asphalt-additives/index.html>>. Acesso em: 23 Fevereiro 2014.

CERATTI, J.A.P. e REIS, R.M.M. Manual de Dosagem de Concreto Asfáltico. Oficina de Textos. Rio de Janeiro, 2011.

CLIFTON, R. A. Natural and synthetic zeolites, (Information Circular; 9140, 21p.). Washington: Bureau of Mines, 1987.

CLYNE, T. Introduction to Warm Mix Asphalt. North Dakota Asphalt Conference, 2010.

CORRIGAN, M. Warm Mix Asphalt in the United States: From Evolution to Revolution. U.S. DOT – Federal Highway Administration. Global Warm Mix Asphalt Workshop. Coralville, Iowa, 2013.

D'ANGELO ET AL. Warm-Mix Asphalt: European Practice, 2008. Disponível em:

<<http://international.fhwa.dot.gov/pubs/pl08007/pl08007.pdf>>. Acesso em: 30/04/2013.

DAER – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. Determinação da Sanidade de agregados pelo uso de sulfato de sódio. DAER /RS-EL 104/01. Porto Alegre, 2001.

DAL BOSCO, S.M.; JIMENEZ, R.S. e CARVALHO, W.A. Aplicação da zeólita natural escolecita na remoção de metais pesados de efluentes industriais: competição entre os cátions e processo de dessorção. Eclética Química. Volume 29 – nº1. São Paulo, 2004.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Pavimento: Determinação das deflexões pela viga Benkelman: ME 024. Rio de Janeiro, 1994.

_____ - Agregado graúdo: Adesividade a ligante betuminoso: ME 078. Rio de Janeiro, 1994.

_____ - Agregado: Adesividade a ligante betuminoso: ME 079. Rio de Janeiro, 1994.

_____ - Agregado: Avaliação da durabilidade pelo emprego de sulfato de sódio ou magnésio: ME 089. Rio de Janeiro, 1994.

_____ - Agregado: Determinação do Índice de Forma: ME 086. Rio de Janeiro, 1994.

_____ - Agregado: Equivalente de areia: ME 054. Rio de Janeiro, 1997.

_____ - Agregados: Determinação da abrasão Los Angeles: ME 035. Rio de Janeiro, 1998.

_____ - Agregados: Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo: ME 081. Rio de Janeiro, 1998.

_____ - Misturas betuminosas a quente: Ensaio Marshall: ME 043, Rio de Janeiro, 1995.

_____ - Misturas betuminosas a quente: Viscosidade Saybolt Furol: ME 04, Rio de Janeiro, 1994.

_____ - Misturas betuminosas: Determinação da resistência à tração por compressão diametral: ME 138. Rio de Janeiro, 1994.

_____ - Misturas betuminosas: Determinação do módulo de resiliência: ME 133. Rio de Janeiro, 1994.

_____ - Misturas betuminosas: determinação resistência à tração por compressão diametral: ME 138, Rio de Janeiro, 1994.

_____ - Pavimentação: Concreto betuminoso: ES 313, Rio de Janeiro, 1997.

_____ - Pavimento: Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman: ME 061. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. Pavimentos flexíveis: Concreto asfáltico. ES 031. Rio de Janeiro, 2006.

_____ - Manual de Conservação Rodoviária. Rio de Janeiro, 2005.

_____ - Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro, 2006.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Anuário Mineral Brasileiro. Brasília, 2006.

EAPA. European Association Pavement Association. Página web da entidade. Disponível em: <<http://www.eapa.org/promo.php?c=202>>. Acesso em: 30 Maio 2014.

ECOBIT. The Green Alternative to Black Pavement. Página web da entidade. Disponível em: <<http://www.ecobit.com>>. Acesso em: 20 Março 2014.

EUROVIA SERVICES GmbH. Aspha-min[®]. Disponível em: <<http://www.aspha-min.com/asphamin-en.html>>. Acesso em: 03 Fevereiro 2014.

EYDE, T.H., SHELTON, V. Zeolites. Mining Engineering, p. 618-619, 1991.

FERREIRA, C.M. Trabalhando com viga benkelman. Porto Alegre, 2007.

FERRET, L. Zeólitas de Cinzas de Carvão: Síntese e Uso. Tese de Doutorado. UFRGS, Porto Alegre, 2004.

FIEDLER, J., KASPAR, J., VALENTIN, J. WMA specifications and experience with this mix type in the Czech Republic, HAPA conference, Hungary, 2013.

FONTANA FILHO, A. Análise laboratorial de misturas asfálticas abertas usinadas a quente com a utilização de diferentes ligantes. Dissertação de Mestrado UFOP, 2009.

FRANCO, F.A.C.P. Método Mecanístico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SISPAV. Tese de Doutorado, UFRJ. Rio de Janeiro, 2007.

GARRET, B. Meeker Equipment's AquaFoam Technologies for Warm-Mix Asphalt. Warm Mix "Technical Working Group". Belleville, Pennsylvania, 2009.

GENCOR INDUSTRIES INC. Ultrafoam GX2 System. Disponível em:
<<http://www.gencorgreenmachine.com/index.php?page=the-ultrafoam-gx2-process>>.
Acesso em: 23 Fevereiro 2014.

GIANNETO, P. Zeolitas: características, propiedades y aplicaciones industriales. In: Síntese de Zeolitas. [s.l.]; Editorial Innovación Tecnológica, cap. 2 e 4.1989.

GONÇALVES, F. J. P. Estudo experimental do desempenho de pavimentos flexíveis a partir de instrumentação e ensaios acelerados. Tese de Doutorado UFRGS, 2002.

GRANICH, A. R. Análise do desempenho de misturas asfálticas com adição de cal: um estudo de caso. Trabalho de diplomação em Engenharia Civil. UNIJUÍ. Ijuí, 2010.

GUTIÉRREZ, M. T. O. Zeolitas Características y Propiedades - Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Depto. de Química, A. P. 18-1027, Col. Escandón, Delegación Miguel Hidalgo, C. P. 11801, México, D. F., México, 2004.

HARDER, G.A. Low Energy Asphalt – A Cooler Mix. Warm Mix TWG. McConnaughay Technologies. Baltimore, Maryland, 2007.

HURLEY, G.C. e PROWELL, B.D. Evaluation of Aspha-min® zeolite for use in warm mix asphalt. NCAT Report, 2005.

KRISTJANSDOTTIR, Olof. Warm mix asphalt for cold weather paving. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de Washington, Estados Unidos, Washington, 2006.

LEA-CO. Low Energy Asphalt (LEA). Disponível em:
<<http://www.lea-co.com/en/our-process>>. Acesso em: 16 Fevereiro 2014.

LUNA, F. J.; SCHUCHARDT, U. Modificação de zeólitas para uso em catálise. Química Nova, São Paulo, v. 24, n. 6, p. 885-892, 2001.

LUZ, A. B. Zeólitas: propriedades e usos industriais. (CETEM. Série Tecnologia Mineral, 68, 37 p.). Rio de Janeiro: CETEM-CNPq, 1994.

MAXAM EQUIPMENT INC. AQUABlack® WMA. Disponível em:
<<http://maxamequipment.com/products/aquablack/>>. Acesso em: 07 Fevereiro 2014.

McCONNAUGHAY TECHNOLOGIES. Low Energy Asphalt (LEA). Disponível em: <http://www.mcconnaughay.com/lowemissionasphalt_process.php>. Acesso em: 16 Fevereiro 2014.

MEADWEST VACO. Evotherm[®]. Disponível em: <<http://www.meadwestvaco.com/SpecialtyChemicals/AsphaltAdditives/MWV002106>>. Acesso em: 03 Março 2014.

MEEKER EQUIPMENT INC. Acqua Foam. Disponível em: <<http://www.meekerequipment.com/index.php>>. Acesso em: 21 Fevereiro 2014.

MEIER, W.M., OLSON, D.H. Atlas of Zeolites Structure Types; 3. ed. rev. London, Butterworth; Heinemann, 1992.

MIDDLETON, B.; FORFYLOW, B. An evaluation of warm mix asphalt produced with Double Barrel Green Process – 7th International Conference on Managing Pavement Assets. Calgary, AB, Canada, 2008.

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

MURATA, K.J., FORMOSO, M.L.L., ROISENBERG, A. 1987. Distribution of zeolites in lavas of Southeastern Parana Basin, State of Rio Grande do Sul, Brazil. Journal of Geology, v. 95, n. 4, p. 455-467, 1987.

MUSIL, J. Terex[®] WMA System, 2009. Disponível em: <http://www.warmmix.org/submissions/may2009/04_Terex_JoeMusil.pdf>. Acesso em: 10 março 2014.

NAPA. National Association Pavement Association. Página web da entidade. Disponível em: <<http://www.asphaltpavement.org/>>. Acesso em: 30 Maio 2014.

NEITZKE, B e WASILL, B. Placement of Warm Mix Asphalt on the East Entrance Road of Yellowstone National Park. Report Number: FHWA-WFL/TD-09-002. 2009.

NEVES, C.A.R., DA SILVA, L.R. Universo da Mineração Brasileira. DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral – Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2007.

- NEWCOMB, D. An Introduction to Warm-mix Asphalt , 2007. Disponível em: <http://www.warmmixasphalt.com/submissions/4_20071125_introduction_to_warm-mix_asphalt.pdf>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2010.
- NÚÑEZ, W. P. Análise experimental de pavimentos rodoviários delgados com basaltos alterados. Tese de doutorado, UFRGS. Porto Alegre, 1997.
- OBERDING, B e KESTERSON, B. Portland's First WMA Projects. Northwest Pavement Management Association - Fall Conference, 2009.
- OLARD, F.; TAMAGNY, P. e PÉREZ, L.M. Fabricación de una mezcla bituminosa templada frente a una convencional en caliente. XV Congresso Ibero-LatinoAmericano do Asfalto (CILA), Lisboa, Portugal, 2009.
- OTTO, G.G. Misturas asfálticas mornas – Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo. Dissertação de Mestrado UFSC, 2009.
- PABALAN, R.T. e BERTETTI, F.P. Cation-exchange properties of natural zeolites. In: Bish D.L. & Ming D.W. (eds.) Reviews in Mineralogy and Geochemistry. Mineralogical Society of America, 45:453-518. 2001.
- PQ CORPORATION. Advera® WMA. Disponível em: <<http://www.adverawma.com/>>. Acesso em: 05 Fevereiro 2014.
- PROWELL, B.D.; HURLEY, G.C e FRANK. Warm-Mix Asphalt: Best Practices. 3rd Edition. NAPA – National Asphalt Pavement Association. Lanham, Maryland, 2012.
- ROHDE, L. Estudo de misturas asfálticas de módulo elevado para camadas estruturais de pavimentos. Tese de Doutorado UFRGS, 2007.
- SASOL WAX. Sasobit®. Disponível em: <<http://www.sasolwax.com/en/Applications/Bitumen+Modification/Europe/Sasobit+Technology.html>>. Acesso em: 10 Março 2014.
- SHAW, J. TWG – Warm Mix Asphalt - Sasobit. Sasol Wax. Hunt Walley, Maryland, 2007.
- SHEPPARD, R.A. Zeolite in sedimentary rocks: Industrial Mineral and Rocks. p. 1257-1262. 4.ed. [New York]: AIME, 1975.

SHINZATO, M. C. Caracterização tecnológica das zeólitas naturais associadas às rochas eruptivas da Formação Serra Geral, na região de Piraju-Ourinhos (SP). *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 38, n. 3, p. 525-532, set. 2008.

SHINZATO, M. C., Remoção de Metais Pesados em Solução por Zeólitas Naturais: Revisão Crítica, *Revista do Instituto Geológico* 27-28, P. 65-78. São Paulo, 2007.

SMITH, A. Advera WMA Zeolite - Warm Mix Asphalt Innovation Project. PQ corporation, 2007.

SOARES, F.S.C. Caracterização e Aplicação de Zeólitas Naturais. Tese de Doutorado. São Paulo, USC, 2010.

SONNEBORG INC. SonneWarmix™. Disponível em: <<http://www.sonnewarmix.com/>>. Acesso em: 11 Fevereiro 2014.

SOUSA FILHO, A.C. Produção de misturas asfálticas mornas pela inserção de zeólitas. Dissertação de Mestrado UFC, 2006.

SPECHT, L. P. Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus. Tese de Doutorado. UFRGS, 2004.

STANSTEEL. Accu-Shear®. Disponível em: <<http://www.stansteel.com/accushear.asp>>. Acesso em: 03 Fevereiro 2014.

TEREX. Terex® WMA System. Disponível em: <http://elit.terex.com/assets/ucm03_047487.pdf>. Acesso em: 10 março 2014.

UFRGS. Projeto Paleotocas. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/paleotocas/GeomorfologiaRS.jpg>>. Acesso em: 19 março 2014.

VIRTA, R. L. Zeolites. In: U. S. Geological Survey. 2006 Minerals yearbook: metals and minerals. 2007. Disponível em: <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/zeolites/zeolimyb06.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2014.

VIRTA, R.L. U.S. Geological Survey. 2012 Minerals Yearbook: Zeolites [Advanced Release]. Reston, VA, USA, 2013. Disponível em:

<<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/zeolites/myb1-2012-zeoli.pdf>> Acesso em: 10 maio 2014.

WALKER, D. Emerging Warm Mix Asphalt technologies. Asphalt - The Magazine of the Asphalt Institute, 2009. Disponível em:

<<http://www.asphaltmagazine.com/news/detail.dot?id=c7a06a94-e636-4dc2-953e-24c4d317f6c6>>. Acesso em: 20 fevereiro 2014.

ZAUMANIS, M. Warm Mix Asphalt Investigation. Master of Science Thesis. Kgs. Lyngby, Denmark, 2010.