



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

RÔMULO LUIZ BORGES

**DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM MISTURAS ASFÁLTICAS A PARTIR DO
SHIFT MODEL VISCOPLÁSTICO E ENSAIOS TRIAXIAIS DE CARGA REPETIDA**

FORTALEZA

2014

RÔMULO LUIZ BORGES

DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM MISTURAS ASFÁLTICAS A PARTIR DO *SHIFT*
MODEL VISCOPLÁSTICO E ENSAIOS TRIAXIAIS DE CARGA REPETIDA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientador: Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D.

FORTALEZA

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

-
- B734d Borges, Rômulo Luiz.
 Deformação permanente em misturas asfálticas a partir do *Shift Model* viscoplástico e ensaios triaxiais de carga repetida / Rômulo Luiz Borges. – 2014.
 195 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2014.
 Área de Concentração: Infraestrutura de Transportes.
 Orientação: Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares.

1. Transportes. 2. Misturas de emulsão asfáltica. 3. Asfalto - Deformação. I. Título.

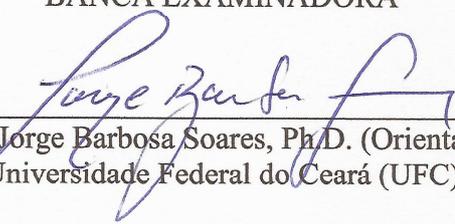
RÔMULO LUIZ BORGES

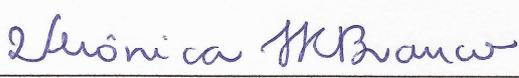
DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM MISTURAS ASFÁLTICAS A PARTIR DO *SHIFT*
MODEL VISCOPLÁSTICO E ENSAIOS TRIAXIAIS DE CARGA REPETIDA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em 31 / 10 / 2014.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)


Profª. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D.
Universidade Federal do Ceará (UFC)


Prof. Ivaldo Dário da Silva Pontes Filho, D.Sc.
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

À família, o meu maior tesouro, e que por ela eu descobri a felicidade.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre cuidou de cada polegada do caminho que por Ele eu sigo. Que me fez compreender e viver o mais belo de todos os conceitos já conhecido pela humanidade: Amor! Obrigado, Senhor!

À minha mãe, Cristina, e avó, Terezinha, por terem me dado sempre o melhor desta vida e nunca terem desistido dos meus próprios sonhos. Ao resto da minha amável família, em especial à minha irmã, Carla, por estar sempre ao meu lado de forma adorável. Família, muito obrigado!

Ao professor e amigo Jorge Soares, pela incansável dedicação, por ter sido a pessoa que mais me acompanhou em todos os momentos nessa jornada que vivenciei em Fortaleza. Por ter me ajudado a entender melhor a ciência do viver, com o seu dedicado amor pelo que faz e sua surpreendente capacidade de acreditar incondicionalmente nas coisas boas. Agradeço também pelo seu entusiasmo e carinho empregados nesse trabalho, e por ter sido um verdadeiro pai acadêmico com todas as suas grandiosas orientações e conselhos de vida dados não só a mim, mas como a todos os seus alunos. Realmente, obrigado!

Agradeço aos demais professores do PETRAN, em especial às professoras Áurea Holanda, Suelly Barroso e Verônica Castelo Branco, pelas conversas apoiadoras, ideias enriquecedoras e principalmente pelo grato acolhimento que tive aqui em Fortaleza. Obrigado pelo carinho!

Agradeço ao professor João Mota, pelo incentivo inicial desta jornada que me trouxe ótimos momentos. Agradeço também por ter sempre acreditado no meu trabalho e ter me apresentado o LMP, um lugar maravilhoso.

Agradeço ao professor Y. Richard Kim (NCSU/Raleigh) e ao colega Yeong Choi (NCSU/Raleigh), pela troca de ideias, envio de materiais, e sugestões, o que contribuiu de forma fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao engenheiro Luis Alberto Nascimento do Cenpes, por ter sido sempre bastante interessado em ajudar neste trabalho com suas sugestões e discussões, e por ter contribuído de forma fundamental com as análises realizadas no LVECD. Agradeço também pelo envio do material que foi parte integrante dessa pesquisa e a tornou mais rica. Obrigado, amigo!

Ao amigo Jorge Luis, que esteve sempre comigo na realização desta pesquisa, que nunca negou ajuda dentro e fora do LMP, e sempre acreditou o tanto quanto eu na realização

deste trabalho. Agradeço também a sua amizade motivadora, e vou levá-la sempre nas próximas jornadas dessa vida. Obrigado, amigão!

Agradeço ao Lucas Babadopulos, pelo acolhimento aqui em Fortaleza e pela sua disposição em sempre me ajudar no decorrer deste trabalho. Agradeço também por todo o apoio e carinho que mesmo de longe ele vem doando como amigo. Valeu, Luquinha!

Agradeço às demais amizades feitas em Fortaleza e no LMP, em especial ao Henrique Silva, pela força que foi dada e pelos bons conselhos. Agradeço ao Rômulo Jácome, pela sua enorme e incansável ajuda no laboratório disponibilizando horas e horas extras, e pela preocupação no andamento deste trabalho. Agradeço também à Annie Karine, por todo o apoio, preocupação e carinho no andamento desta pesquisa. Obrigado, LMP!

Ao professor Ivaldo Dário Filho por ter aceitado o convite para compor a banca examinadora dessa dissertação.

Agradeço ao Cenpes/Petrobras pelo envio dos materiais que foram utilizados neste trabalho, e à Rede Asfalto N/NE pelo financiamento desta pesquisa.

“The most beautiful experience we can have is the mysterious. It is the fundamental emotion that stands at the cradle of true art and true science. Whoever does not know it and can no longer wonder, no longer marvel, is as good as dead, and his eyes are dimmed (...) The mind that opens to a new idea never returns to its original size”

Albert Einstein

RESUMO

A deformação permanente é um dos principais defeitos em pavimentos asfálticos. Para prever esta falha em revestimentos, por meio de ensaios laboratoriais, é frequentemente utilizado o ensaio de *creep* dinâmico cujo resultado final é apresentado em termos do chamado *flow number*. No entanto, para este trabalho foi realizado o *triaxial repeated load permanent deformation (TRLPD) test*, que é um ensaio sob condições de confinamento, a fim de melhor se aproximar das condições encontradas em campo. Os modelos que incorporam o *flow number* não representam a principal região de ensaio de *creep* dinâmico, denominada região secundária, na qual o incremento de deformação permanente cresce em valor constante. No presente trabalho utilizou-se o *Shift Model*, o qual é um modelo viscoplástico que avalia a deformação permanente a partir da superposição dos efeitos tempo-temperatura e tempo-tensão. Dessa forma, as misturas asfálticas foram testadas sob diferentes condições de carregamento, temperatura, tempo de aplicação de carga e período de repouso. Foram avaliados três parâmetros do ensaio em questão: o parâmetro C , que fornece os dados de onde a região secundária se inicia (parâmetro que governa a região primária do ensaio); o parâmetro α (alfa), que é o aclave da região secundária; e o parâmetro B , que representa o nível de deformação permanente da região secundária. Os resultados obtidos mostram que o ensaio TRLPD é mais severo do que o ensaio convencional de *creep* dinâmico, porém considera-se que a utilização de ensaios confinados representa um avanço para o entendimento do comportamento das misturas asfálticas quanto à resistência à deformação permanente das mesmas, e este traz a vantagem de poder ser usado em simulações computacionais.

Palavras-chave: Deformação Permanente, *Shif Model*, Viscoplasticidade, Misturas Asfálticas.

ABSTRACT

Permanent deformation or rutting is a major distress in asphalt pavements. To predict permanent deformation of asphalt mixtures the dynamic creep test is often used in laboratory, with the result presented in terms of the so called flow number. However, for this work it was performed the triaxial repeated permanent deformation load test, a confined test that better represents field conditions. The models that incorporate the flow number do not represent the main zone of the dynamic creep test result, denoted secondary region, in which the permanent deformation rate of growth is constant. In this work the Shift Model was used, which is a viscoplastic model that accesses the permanent deformation from the superposition principles, i.e., time-temperature superposition and time-stress superposition. Thus, the asphalt mixtures were tested under different loading conditions, temperature, load time and rest period, in order to assess three parameters of the test: parameter C , which indicates where the secondary region begins (parameter that governs the primary region of the test); the parameter α (alpha) is the slope of the secondary region; and the parameter B represents the level of permanent deformation of the secondary region. The results show that the TRLPD test is more severe than the conventional dynamic creep test. Nevertheless, the use of TRLPD test represents an advance in the understanding of the behavior of asphalt mixtures with respect to rutting performance, and has the advantage of allowing the use of results in computational simulations.

Keywords: Permanent Deformation, Shift Model, Viscoplasticity, HMA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Deformação permanente em pavimentos asfálticos.	7
Figura 2.2 - Deformação devido à aplicação de carga estática.	8
Figura 2.3 - Deformação devido à aplicação de carga dinâmica.....	9
Figura 2.4 - Diagrama esquemático do mecanismo de formação de deformação permanente.	10
Figura 2.5 - Influência do agregado e do ligante no comportamento de misturas asfálticas....	11
Figura 2.6 - Critério de plastificação - espaço de tensões admissíveis.....	12
Figura 2.7 - Análogo mecânico para o modelo geral viscoplástico.....	13
Figura 2.8 - Representação esquemática do ensaio de <i>creep and recovery</i>	14
Figura 2.9 - Diagrama esquemático do modelo da taxa: (a) modelo análogo e (b) conceito de tensão efetiva.....	25
Figura 2.10 - Representação dos parâmetros <i>A</i> , <i>B</i> , <i>C</i> e α na curva de deformação permanente do ensaio TRLPD.....	30
Figura 2.11 - Resultados ajustados de modelos de deformação permanente com ensaio TRLPD (0,1s de tempo de carregamento e 0,9s de tempo de repouso com pressão confinante de 138kPa (20psi)): (a) 621kPa (90psi) e (b) 1.035kPa (150psi) de tensão desvio.....	33
Figura 2.12 - Montagem da amostra na célula triaxial: (a) montagem do conjunto e (b) esquema do conjunto montado para o ensaio com confinamento.....	34
Figura 2.13 - Diagrama esquemático do ensaio CHC.	37
Figura 2.14 - Esquema de comparação entre o ensaio TRLPD e o ensaio CHC.....	38
Figura 2.15 - Resultados ajustados do <i>Shift Model</i>	40
Figura 2.16 - Pista de teste do NCAT: (a) vista aérea e (b) divisão da pista por trechos experimentais.	42
Figura 2.17 - Fatores de correção das misturas por trecho experimental.....	43
Figura 2.18 - Curva mestra do módulo dinâmico.....	45
Figura 2.19 - Curvas mestras do ensaio de módulo dinâmico para misturas com agregados de origem basáltica.	46
Figura 2.20 - Curva típica de um ensaio de <i>creep</i> estático com recuperação.	47
Figura 2.21 - Ensaio de <i>creep</i> com carregamento axial.	48
Figura 2.22 - Ensaio de <i>creep</i> por tração indireta.....	48
Figura 2.23 - Ensaio de <i>creep</i> estático com os três estágios de deformação por fluência.....	50

Figura 2.24 - Função fluência e respectivo ajuste para a série de Prony.....	51
Figura 2.25 - Carregamento e deformação no ensaio de <i>creep</i> dinâmico.	52
Figura 2.26 - Gráfico com a deformação plástica e a taxa de deformação plástica ao longo do ensaio de <i>creep</i> dinâmico, com a identificação do FN.	53
Figura 2.27 - (a) Aplicação de tensão durante o ensaio uniaxial de carga repetida e (b) deformação permanente durante o ensaio de <i>creep</i> dinâmico e obtenção do FN.	54
Figura 2.28 - Resultados do ensaio de <i>creep</i> dinâmico para todas as misturas com agregados de origem basáltica.	55
Figura 2.29 - Distribuição volumétrica de deformação viscoplástica.	57
Figura 2.30 - Relação entre deformação permanente total acumulada e número de ciclos de carregamento. Ensaio confinado: (a) escala aritmética e (b) escala log-log.....	58
Figura 2.31 - Determinação das variáveis: (a) TDI_m , e (b) CDI e TDI.	62
Figura 2.32 - Média de valores das variáveis: (a) CDI e (b) TDI.....	63
Figura 2.33 - Correlação da deformação permanente no simulador francês após 30.000 ciclos com as variáveis: (a) CDI e (b) TDI.	64
Figura 2.34 - Conjunto de mesa compactadora e simulador de tráfego LCPC para ensaios de deformação permanente em laboratório.....	67
Figura 2.35 - Resultados dos ensaios de deformação permanente no equipamento francês, com dois ligantes asfálticos argentinos.....	68
Figura 2.36 - APA - <i>Asphalt Pavement Analyzer</i>	69
Figura 2.37 - Simulador de tráfego Hamburg - <i>Hamburg Wheel-Tracking Device</i>	70
Figura 3.1 - Localização da Pedreira MFT, Itaitinga/CE.	73
Figura 3.2 - Curvas granulométricas dos agregados - Mistura C1.	74
Figura 3.3 - Curva de projeto - Mistura C1.	77
Figura 3.4 - Curva de projeto - Mistura C2.	80
Figura 3.5 - Curva de projeto - Mistura C3.	82
Figura 3.6 - Curva de projeto - Mistura R1.	84
Figura 3.7 - Comparação entre as curvas granulométricas - misturas C1, C2, C3 e R1.	86
Figura 3.8 - Representação do ensaio triaxial de carga repetida: (a) configuração entre os LVDT's, disco e câmara de confinamento e (b) representação do CP na câmara de confinamento.....	88
Figura 3.9 - Diagrama esquemático do protocolo de ensaio: (a) ensaio de Referência e (b) ensaio <i>Multiple Stress Sweep</i>	91

Figura 3.10 - Exemplo de função de densidade acumulada da deformação permanente de acordo com a temperatura do revestimento em Angelica, NY.	92
Figura 3.11 - Realização dos ensaios TSS: (a) preparação do CP e montagem na câmara de confinamento e (b) fluxograma das etapas dos ensaios TSS.	95
Figura 3.12 - Calibração dos parâmetros através da função Solver no Excel.	101
Figura 3.13 - Resultados dos ensaios MSS (Mistura NY9.5B).	102
Figura 3.14 - Ensaio de <i>creep</i> dinâmico sem confinamento: (a) CP durante o ensaio e (b) captura de tela com CP apresentando ruptura, FN.	111
Figura 3.15 - Captura de tela do LVECD.	113
Figura 3.16 - Representação da estrutura do pavimento analisada no LVECD.	114
Figura 4.1 - Curvas do ensaio de Referência - misturas C1, C2, C3 e R1.	116
Figura 4.2 - Curva de referência e curva do <i>Shift Model</i> : (a) escala usual e (b) escala log-log - Mistura C1.	122
Figura 4.3 - Variações no coeficiente α . <i>Shift Model</i> : (a) $\alpha = 0,388$, (b) $\alpha = 1,0$ e (c) $\alpha = 1,5520$ - Mistura C1.	124
Figura 4.4 - Variações no coeficiente B . <i>Shift Model</i> : (a) $B = 0,0012$, (b) $B = 0,0048$ e (c) $B = 0,0$ - Mistura C1.	126
Figura 4.5 - Variações no coeficiente C . <i>Shift Model</i> : (a) $C = 22,904$, (b) $C = 0,0573$ e (c) $C = 0,0$ - Mistura C1.	128
Figura 4.6 - Curva de referência e curva do <i>Shift Model</i> : (a) escala usual e (b) e escala log-log - Mistura C2.	130
Figura 4.7 - Curva de referência e curva do <i>Shift Model</i> : (a) escala usual e (b) e escala log-log - Mistura C3.	132
Figura 4.8 - Curva de referência e curva do <i>Shift Model</i> : (a) escala usual e (b) e escala log-log - Mistura R1.	134
Figura 4.9 - Parâmetro α versus teor de CAP - misturas C1, C2, C3 e R1.	137
Figura 4.10 - Curvas dos ensaios MSS - Mistura C1.	138
Figura 4.11 - Curvas do ensaio de <i>creep</i> dinâmico: (a) misturas C1, C2, C3 e R1 e (b) misturas C2, C3 e R1.	141
Figura 4.12 - Curva mestra de $ E^* $ - Mistura C1.	144
Figura 4.13 - <i>Ranking</i> dos FN nos ensaios de Referência e <i>creep</i> dinâmico sem confinamento - misturas C2, C3 e R1.	145

Figura 4.14 - Níveis de deformação nos ensaios de Referência e <i>creep</i> dinâmico - misturas C1, C2, C3 e R1.....	146
Figura 4.15 - Curvas dos ensaios TSS - Mistura C1.	148
Figura 4.16 - Gráfico a_{total} versus ξ_p . <i>Shift Model</i> - Mistura C1.....	151
Figura 4.17 - Gráfico a_{ξ_p} versus ξ_p . <i>Shift Model</i> - Mistura C1.	153
Figura 4.18 - Gráfico a_{σ_v} versus tensão desvio. <i>Shift Model</i> - Mistura C1.....	156
Figura 4.19 - Deformações acumuladas na trilha de roda da camada asfáltica e nas camadas do pavimento. LVECD: (a) Região Sul e (b) Região Sudeste - Mistura C1.....	160
Figura 4.20 - Regiões Sul e Sudeste. LVECD: (a) deformações acumuladas na camada asfáltica e (b) deformações acumuladas nas camadas do pavimento - Mistura C1.	162
Figura 4.21 - Afundamentos na trilha de roda medidos versus simulados.....	164
Figura A.1 - Ajuste dos LVDT's para os ensaios confinados na UTM - 25.	180
Figura A.2 - Captura de tela do <i>software</i> para a execução do ensaio de Referência (TRLPD) na UTM - 25.	181
Figura A.3 - Dispositivo para pressurização na UTM - 25.	182
Figura A.4 - Captura de tela do ensaio de Referência na UTM - 25.	183
Figura B.1 - Valores de deformação permanente e número de ciclos nos ensaios TSS.....	184

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Modelos de deformação permanente para misturas asfálticas.	32
Tabela 2.2 - Condições para o ensaio TRLPD.	35
Tabela 2.3 - Configuração dos nove blocos para o ensaio CHC.	36
Tabela 2.4 - Descrição das misturas por trecho experimental.	43
Tabela 2.5 - Critérios de dosagem baseados nas variáveis de densificação CDI e TDI.	65
Tabela 2.6 - Condição de ensaio dos simuladores de tráfego: LCPC, APA e HWTD.	71
Tabela 3.1 - Características gerais do ligante modificado com o Polimul S-74.	73
Tabela 3.2 - Resultados da granulometria para os agregados - Mistura C1.	74
Tabela 3.3 - Faixas granulométricas para o concreto asfáltico.	75
Tabela 3.4 - Pontos de controle para TMN de 19,0mm.	76
Tabela 3.5 - Características da curva de projeto - Mistura C1.	76
Tabela 3.6 - Características de dosagem - Mistura C1.	78
Tabela 3.7 - Propriedades do CAP - Mistura C2.	79
Tabela 3.8 - Características da curva de projeto - Mistura C2.	79
Tabela 3.9 - Características de dosagem - Mistura C2.	80
Tabela 3.10 - Propriedades do CAP - Mistura C3.	81
Tabela 3.11 - Características da curva de projeto - Mistura C3.	82
Tabela 3.12 - Características de dosagem - Mistura C3.	83
Tabela 3.13 - Propriedades do CAP - Mistura R1.	83
Tabela 3.14 - Pontos de controle para TMN de 12,5mm.	84
Tabela 3.15 - Características de dosagem da Mistura R1.	85
Tabela 3.16 - Condições do protocolo de ensaio.	93
Tabela 3.17 - Procedimento para o protocolo de ensaio.	94
Tabela 3.18 - Configuração do protocolo de ensaio e ensaio de <i>creep</i> dinâmico em número de CP's para cada mistura.	96
Tabela 3.19 - Diferenças entre o ensaio de <i>creep</i> dinâmico e o ensaio de Referência.	97
Tabela 3.20 - Valores iniciais para o ajuste do <i>Shift Model</i>	99
Tabela 3.21 - Número de ciclos iniciais e finais para cada bloco de carregamento dos ensaios MSS.	102

Tabela 3.22 - Limites sugeridos para os parâmetros a_1 , a_2 e a_3	107
Tabela 3.23 - Limites sugeridos para os parâmetros b_1 , b_2 e b_3	109
Tabela 3.24 - Condições do ensaio de <i>creep</i> dinâmico.....	110
Tabela 4.1 - Resultados do FN e o respectivo valor de deformação para o ensaio de Referência - misturas C1, C2, C3 e R1.....	117
Tabela 4.2 - Parâmetros da curva do <i>Shift Model</i> - misturas C1 e NY9.5B.....	119
Tabela 4.3 - Parâmetros da curva do <i>Shift Model</i> e teor de CAP - misturas C1, C2, C3 e R1.....	135
Tabela 4.4 - Deformações no fim de cada bloco de carregamento - Mistura C1.....	138
Tabela 4.5 - Resultados do FN e seu respectivo valor de deformação para o ensaio de <i>creep</i> dinâmico sem confinamento.....	142
Tabela 4.6 - Resultados dos fatores de deslocamento - Mistura C1.....	143
Tabela 4.7 - Parâmetros de dosagem e resultados dos ensaios de Referência e <i>creep</i> dinâmico sem confinamento.....	147
Tabela 4.8 - Número de ciclos reduzido no início e no final de cada bloco de carregamento. <i>Shift Model</i> - Mistura C1.....	150
Tabela 4.9 - Valores do a_{total} . <i>Shift Model</i> - Mistura C1.....	150
Tabela 4.10 - Parâmetros do <i>Shift Model</i> - misturas C1 e NY9.5B.....	157
Tabela 4.11 - Valores do $ E^* $ e ângulo de fase - Mistura C1.....	158
Tabela 4.12 - Regiões Sul e Sudeste - deformações acumuladas na trilha de roda: camada asfáltica e camadas do pavimento. LVECD - Mistura C1.....	164
Tabela A.1 - Dados de deformação acumulada. LVECD - Mistura C1.....	191

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AFNOR	<i>Association Française de Normalisation</i>
ANP	Agência Nacional do Petróleo
APT	<i>Accelerated Pavement Test</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATR	Afundamento de Trilha de Roda
APA	<i>Asphalt Pavement Analyzer</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CDI	<i>Construction Densification Index</i>
CGS	Compactador Giratório Superpave
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo de Prova
CHC	Composto com Histórico de Carregamento
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
EVA	Etil Vinil Acetato
EICM	<i>Enhanced Integrated Climatic Model</i>
E*	Módulo dinâmico
FN	<i>Flow Number</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
G _{mm}	Massa Específica Máxima Medida
HWTD	<i>Hamburg Wheel-Tracking Device</i>
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MEPDG	Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide
MSS	<i>Multiple Stress Sweep</i>
MR	Módulo de Resiliência
NCAT	<i>National Center for Asphalt Technology</i>

NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
N _{LP}	Número de giros no <i>Locking Point</i>
OGFC	<i>Open-Graded Friction Course</i>
PG	<i>Performance Grade</i>
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
PPA	Ácido Polifosfórico
PA	Ponto de Amolecimento
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
SBS	Estireno Butadieno Estireno
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SNV	Sistema Nacional de Viação
TDI	<i>Traffic Densification Index</i>
TDI _m	<i>Traffic Densification Index</i> modificado
TFI	<i>Traffic Force Index</i>
TMN	Tamanho Máximo Nominal
TRLPD	<i>Triaxial Repeated Load Permanent Deformation</i>
TSS	<i>Triaxial Stress Sweep</i>
UTM	<i>Universal Testing Machine</i>
VAM	Vazios no Agregado Mineral
V _v	Volume de vazios
WMA	<i>Warm-Mix Asphalt</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Problema de pesquisa.....	3
1.2 Objetivo geral	4
1.3 Objetivos específicos	4
1.4 Estrutura da dissertação	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Deformação permanente em misturas asfálticas.....	6
2.2 Modelos viscoplásticos de deformação permanente para misturas asfálticas	11
2.3 Modelo de deformação permanente proposto por Choi (2013).....	30
2.4 Módulo dinâmico ($ E^* $)	44
2.5 <i>Creep</i> estático	46
2.6 <i>Creep</i> dinâmico.....	51
2.7 Ensaio <i>Triaxial Repeated Load Permanent Deformation</i>	55
2.8 Variáveis de densificação CDI, TDI e TDI_m	59
2.9 Ensaio por simuladores de tráfego	65
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	72
3.1 Misturas do tipo Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ).....	72
3.1.1 Mistura C1.....	72
3.1.2 Mistura C2.....	78
3.1.3 Mistura C3.....	81
3.1.4 Mistura R1.....	83
3.2 Protocolo de ensaio	86
3.2.1 Preparação das amostras	86
3.2.2 Configuração do ensaio.....	87
3.2.3 Pré-condicionamento.....	89
3.2.4 Ensaio confinados.....	89

3.2.5 Procedimento de ensaio.....	93
3.3 Aplicação e compreensão do <i>Shift Model</i>	97
3.3.1 Parâmetros <i>A</i> , <i>B</i> , <i>C</i> e α	99
3.3.2 Número de ciclos reduzido.....	101
3.3.3 <i>Shift factor</i> total.....	104
3.3.4 Tempo de carregamento reduzido.....	105
3.3.5 Parâmetros de regressão da função ajuste do tempo de carregamento reduzido ...	106
3.3.6 Parâmetros de regressão da função ajuste de tensão vertical.....	108
3.4. Ensaio de <i>creep</i> dinâmico	110
3.5. Utilização do programa <i>Layered Viscoelastic Continuum Damage</i> (LVECD).....	111
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	115
4.1 Ensaio mecânicos	115
4.1.1 Resultados do protocolo de ensaio	115
4.1.2 Resultados do ensaio de <i>creep</i> dinâmico	139
4.1.3 Resultado do ensaio de módulo dinâmico ($ E^* $).....	142
4.2 Comparação entre os resultados do ensaio de Referência e de <i>creep</i> dinâmico.....	144
4.3 Análise do <i>Shift Model</i>	147
4.3.1 Análise do <i>shift factor</i> total.....	149
4.3.2 Análise do princípio da superposição tempo-temperatura (t-TS)	152
4.3.3 Análise do princípio da superposição tempo-tensão (t-SS)	154
4.4 Análise das simulações de desempenho de pavimento no programa <i>Layered Viscoelastic Continuum Damage</i> (LVECD).....	157
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	165
REFERÊNCIAS	171
Apêndice A - Procedimento de configuração da UTM - 25 - Ensaio confinados	180
Apêndice B - Código em MATLAB para a obtenção dos parâmetros do <i>Shift Model</i>	184
Anexo A - Dados de deformação acumulada no LVECD para a Mistura C1.....	191

1 INTRODUÇÃO

Esta dissertação se enquadra na grande área de Infraestrutura de Transportes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da UFC, e está relacionada à linha de pesquisa Mecânica dos Pavimentos. Tem como objetivo analisar a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas por meio de um protocolo de ensaio que leva em consideração a pressão de confinamento e o subsequente uso dos resultados no *Shift Model*, o qual é um rigoroso modelo viscoplástico para análise de deformação permanente em misturas asfálticas.

No Brasil, o sistema logístico de escoamento da produção, assim como a circulação de pessoas, depende do modal rodoviário. Esse predomínio é observado pela distribuição da matriz de transportes, na qual 61,1% das cargas e 96,0% dos passageiros são transportadas por rodovias conforme a CNT (2013). Porém, a malha rodoviária é deficiente segundo os dados do último SNV - Sistema Nacional de Viação - publicado pelo DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - em agosto de 2013. No país existem hoje 1.713.885km de rodovias, dos quais apenas 202.589km são pavimentados, o que representa 11,8% da malha. Desse total, mais de 15 mil km são de rodovias concedidas.

A metodologia de dimensionamento de pavimentos asfálticos adotada no Brasil atualmente pelo DNIT (Manual de Pavimentação, 2006) possui caráter empírico e foi desenvolvida com base em parâmetros que são limitados para reproduzirem o comportamento mecânico destas estruturas em campo. Daí a necessidade de uma abordagem que leve também em consideração fatores como a resposta estrutural das camadas. Estas respostas estruturais podem ser utilizadas em modelos mecanístico-empíricos e são obtidas por meio de programas computacionais. Nos pavimentos asfálticos, os programas baseados na teoria elástica linear têm sido amplamente utilizados nos procedimentos relativos a análises e ao dimensionamento de pavimentos (Soares *et al.*, 2009).

Souza *et al.* (2009) avaliaram dois trechos (uma pista experimental e outro localizado entre as CE-453 e CE-352), ambos na CE-040. Esta avaliação foi feita pelo programa de análise estrutural KENLAYER, levando em consideração critérios como o módulo de elasticidade e o módulo de resiliência. A partir da comparação dos resultados obtidos pela análise do programa e os determinados em campo utilizando a viga Benkelman, constatou-se que os valores de deflexão máxima são bastante próximos. Assim, os autores concluem que as simulações computacionais fornecem ao engenheiro uma ferramenta importante na otimização de projetos de superestrutura de pavimentos flexíveis. As modelagens numéricas permitem

prever satisfatoriamente o comportamento da via, evitando problemas estruturais devido a um subdimensionamento e podendo reduzir custos ao evitar camadas superdimensionadas. O grau de precisão de programas tais como o utilizado por estes autores depende diretamente da correta caracterização dos materiais.

As misturas asfálticas são frequentemente utilizadas nos pavimentos como camadas de revestimento. Os mais severos defeitos que ocorrem na pavimentação asfáltica se refletem nesta camada final e permitem identificar dois modos distintos de solicitação mecânica: flexão repetida, responsável pela fadiga do material (associada ao trincamento do revestimento ou de camadas cimentadas) e a compressão simples, que conduz ao acúmulo de deformações permanentes (Pinto, 1991).

A deformação permanente em revestimentos pode ser definida como depressões longitudinais que aumentam com as cargas repetidas impostas pelo tráfego de veículos. No caso destas deformações serem oriundas somente do revestimento, há diversos ensaios de laboratório que buscam reduzir as chances de seu desenvolvimento, ainda que as condições de campo sejam difíceis de serem replicadas em laboratório. Em geral, estes ensaios servem para comparar misturas, e não propriamente para fazer qualquer previsão de deformação com o tempo ou ciclos associados ao tráfego.

Um dos ensaios de uso frequente, e que deve ser em breve normatizado no Brasil a partir da Comissão do Asfalto da ABNT/IBP, é o ensaio uniaxial de carga repetida para avaliar a deformação permanente, comumente chamado mesmo no Brasil de *creep* dinâmico. A partir deste ensaio se obtém o parâmetro denominado *flow number* (FN), que é o número de ciclos em que a taxa de deformação plástica é mínima e a partir do qual o Corpo de Prova (CP) atinge a ruptura (Nascimento, 2008). O ensaio de *creep* dinâmico também é utilizado para selecionar materiais, uma vez que esse ensaio é capaz de fornecer o parâmetro de ruptura na camada asfáltica, o FN. No entanto, o ensaio de *creep* dinâmico não fornece parâmetro para a modelagem quanto à deformação permanente em camadas asfálticas.

Outra forma de avaliação da deformação permanente em misturas asfálticas é por meio do uso de simuladores de tráfego. Ainda que estes equipamentos não repliquem aspectos como a estocasticidade das cargas ou o envelhecimento das misturas testadas, são tidos como capazes de simular mais proximamente a situação de campo por terem uma carga cíclica aplicada sobre a mistura, em geral por meio de pneumáticos.

Vários modelos para análise de defeitos em camadas de pavimento são encontrados na literatura e adotados em muitos países da Europa e da América do Norte, o que justifica o

estudo dos mesmos para os materiais de pavimentação nacional. Até porque o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) permite nos projetos viários a aplicação de métodos alternativos ao método empírico estabelecido, desde que plenamente justificado, e em caso de insucesso os responsáveis técnicos assumam a responsabilidade.

A utilização de um ensaio conhecido como *Triaxial Repeated Load Permanent Deformation Test* (TRLPD, ensaio triaxial de deformação permanente com carregamento repetido), vem sendo adotado em conjunto com modernos modelos mecânicos para análise da deformação permanente. Este ensaio permite avaliar a mistura a partir da condição de confinamento sob diferentes condições de carga, temperatura e tensão desvio, período de repouso e carregamento. Ou seja, as propriedades obtidas passam a representar de forma mais real os fenômenos que de fato ocorrem em campo, o que, em princípio, contribui para a formulação de projetos rodoviários menos empíricos, e mais mecanicistas.

É esperado, ao término deste trabalho, a utilização do *Shift Model* (o qual é derivado do modelo incremental viscoplástico) existente na literatura para a análise do comportamento de misturas asfálticas quanto à resistência à deformação permanente, a partir da aplicação de um protocolo de ensaio desenvolvido por Choi (2013). A ideia é fazer uso do TRLPD e, por conseguinte, dos resultados deste ensaio, como parâmetros de entrada do modelo escolhido.

1.1 Problema de pesquisa

Os problemas da pavimentação asfáltica no Brasil se devem principalmente ao acúmulo excessivo de deformações permanentes e ao trincamento por fadiga. Logo, a deformação permanente, que é um defeito muito frequente nas rodovias e vias urbanas, afeta diretamente a durabilidade do pavimento. Nesse contexto, diversas pesquisas têm, ao longo do tempo, desenvolvido uma variedade de ensaios para avaliar o comportamento do revestimento asfáltico quanto a este tipo de falha.

O Brasil, contudo, ainda não dispõe de um ensaio de laboratório normatizado para este fim, embora esteja previsto para um futuro breve o desenvolvimento da norma de ensaio uniaxial de carga repetida para obtenção do *flow number*. Tal parâmetro pode não ser o mais adequado a ser extraído deste ensaio, que pode inclusive ter uma variação com, por exemplo, o confinamento do CP. Estas questões vêm sendo debatidas na literatura internacional, inclusive com o uso de ensaios confinados e modelos mecânicos avançados como o modelo incremental viscoplástico, e merecem ser pesquisadas no Brasil com materiais e equipamentos locais.

1.2 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é utilizar o *Shift Model* para avaliar o comportamento viscoplástico de misturas asfálticas quanto à resistência à deformação permanente de acordo com os princípios de superposição tempo-temperatura e tempo-tensão e a partir dos ensaios TRLPD que consideram a condição de confinamento.

1.3 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Aplicar um protocolo de ensaio que tem como base ensaios triaxiais de carga repetida com confinamento (TRLPD) para a caracterização da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas;
- Compreender o comportamento de misturas asfálticas quanto à deformação permanente a partir da análise individual de cada parâmetro do *Shift Model*, a partir da acurácia desse modelo;
- Comparar os resultados de FN e os níveis de deformação permanente do ensaio TRLPD com os do ensaio de *creep* dinâmico; e
- Utilizar o programa LVECD (*Layered Viscoelastic Continuum Damage*) para a obtenção de curvas de desempenho de campo quanto à deformação permanente a partir da influência do clima, do tráfego e do tipo de carregamento veicular.

1.4 Estrutura da dissertação

- O Capítulo 1 (Introdução) aborda o tema em estudo e contextualiza a sua importância para o cenário da pavimentação asfáltica brasileira. O capítulo também descreve o problema de pesquisa, assim como os objetivos geral e específicos deste trabalho;

- O Capítulo 2 (Revisão Bibliográfica) trata de definir conceitos importantes dentro do tema em estudo. Este capítulo apresenta uma revisão sobre deformação permanente, tipos de critério quanto à sua caracterização levando em consideração os ensaios mais utilizados; também é mencionado a viscoplasticidade e alguns modelos utilizados incluindo em maior detalhe o modelo adotado no presente estudo;
- O Capítulo 3 (Materiais e Métodos) define os tipos de cada material (agregados e ligante asfáltico) empregados nesta pesquisa e apresenta os quatro tipos de misturas que foram investigadas no programa experimental. Também é explorada a metodologia da pesquisa que tem como base um protocolo de ensaio proposto por Choi (2013), assim como o seu modelo viscoplástico e sua forma de modelagem matemática para a obtenção dos parâmetros B , C e α . A utilização do ensaio TRLPD também é descrita e avaliada como uma importante etapa metodológica;
- O Capítulo 4 (Resultados e Discussões) mostra os resultados obtidos a partir dos ensaios TRLPD e *creep* dinâmico para as quatro misturas empregadas nessa dissertação. O capítulo conta com gráficos e curvas obtidos após a modelagem numérica do *Shift Model*. Além disso, são apresentados gráficos de curvas de desempenho de campo quanto à deformação permanente a partir do programa LVECD e discussões acerca dos resultados obtidos; e
- O Capítulo 5 (Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros) contém as conclusões a respeito dos resultados obtidos. O capítulo também conta com sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é feita inicialmente uma revisão bibliográfica sobre um dos maiores defeitos que atinge a estrutura dos pavimentos: a deformação permanente. Como o foco desta pesquisa é avaliar a deformação permanente em misturas asfálticas, são apresentados conceitos sobre este defeito específico e fatores que influenciam no seu desenvolvimento. Apresentam-se conceitos sobre viscoplasticidade e os mecanismos de alguns modelos viscoplásticos para a avaliação quanto à deformação permanente. Também é apresentado em detalhes o *Shift Model*, um modelo viscoplástico proposto por Choi (2013) e utilizado nesta pesquisa, assim como uma análise dos parâmetros envolvidos nesse modelo e a influência de cada um para a avaliação da deformação permanente. Há, também, uma revisão sobre os ensaios usados para a previsão deste defeito, desde os mais clássicos, como o *creep* estático, até o ensaio que visa avaliar a mistura asfáltica sob uma condição de carregamento triaxial. O capítulo também menciona as variáveis CDI, TDI e TDI_m que são parâmetros utilizados na caracterização de misturas com relação a resistência à deformação permanente ainda na fase de dosagem. A título de completude de revisão foi inserido um tópico sobre ensaios de simulação de tráfego em laboratório, que apesar de não ter sido utilizado nesse estudo é bastante disseminado e utilizado para a caracterização mecânica de misturas asfálticas na pavimentação nacional.

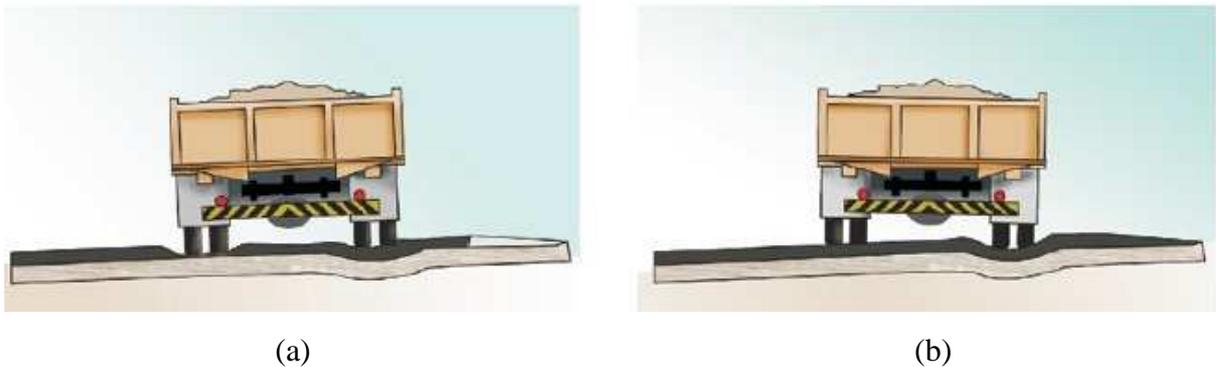
2.1 Deformação permanente em misturas asfálticas

Um defeito muito comum nos pavimentos brasileiros é a deformação permanente, também chamada afundamento de trilha de roda. Esta pode ser definida como depressões longitudinais que aumentam com as cargas repetidas impostas pelo tráfego de veículos (Mahmoud e Bahia, 2004). Trata-se de um defeito que surge na estrutura do pavimento, podendo ocorrer no revestimento e/ou nas subcamadas. Os afundamentos causados pela deformação permanente além de prejudicarem a serventia das vias, são também indesejáveis sob o aspecto de segurança, pois a água pode depositar-se nessas áreas e dificultar a dirigibilidade dos veículos.

Merighi e Fortes (2003) avaliam que o desenvolvimento da trilha de roda é baseado no aumento de aplicações da carga e é causado por uma combinação não somente das características da mistura asfáltica, mas também das condições climáticas e do tráfego (carga e número de solicitações). Pode ocorrer em qualquer camada de estrutura do pavimento. A Figura

2.1 (a) representa esquematicamente a situação onde ocorrem deformações permanentes no revestimento (trilha de roda esquerda), e a Figura 2.1 (b) está relacionada ao surgimento de deformações permanentes nas subcamadas.

Figura 2.1- Deformação permanente em pavimentos asfálticos.



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

A deformação permanente pode ocorrer em diversas circunstâncias como através de problemas no subleito, subbase e base com compactação precária, dosagem errônea da mistura asfáltica, entre outros. Na camada de revestimento é causada devido ao escorregamento de massa (deslocamento horizontal da massa asfáltica) ou ao agrupamento dos agregados, i.e., densificação (Yoder e Witczak, 1975).

A densificação e o fluxo de cisalhamento são conhecidos como fatores de influência para deformação permanente (Kandhal e Cooley, 2003). A densificação refere-se à mudança volumétrica, e o fluxo de cisalhamento causa deformação permanente sem alteração de volume. Considerando-se o fator de mudança de volume, Harvey e Popescu (2000) e Gokhale *et al.* (2006) quantificaram a contribuição da densificação no comportamento quanto à deformação permanente. Eles concluíram que o fluxo de cisalhamento tem um efeito significativo sobre a deformação permanente em pavimentos asfálticos, enquanto que a densificação é maior à medida que os vazios da mistura diminuem. Knappet e Craig (2012) reforçam que a densificação e o fluxo de cisalhamento induzem à deformação permanente e que esse fenômeno pode ser comparado como a ruptura por cisalhamento do solo sob uma fundação.

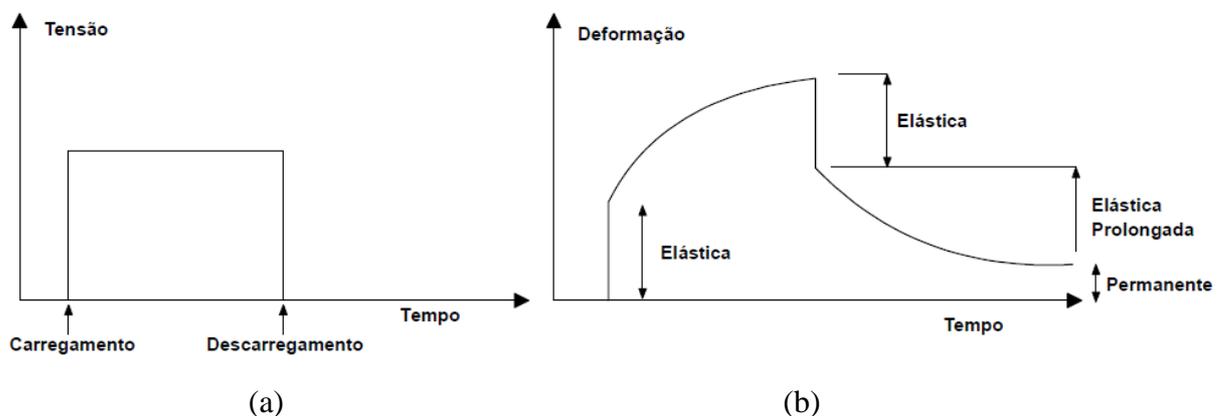
O deslocamento de massa asfáltica tende a ocorrer normalmente nos primeiros 10cm de profundidade do revestimento de um pavimento, podendo ocorrer em maiores profundidades caso materiais de baixa qualidade sejam usados. O escorregamento de massa usualmente surge gradativamente com o aumento das aplicações de carga, mostrando-se na

maioria das vezes como depressões nas trilhas de roda, algumas vezes acompanhadas por pequenas elevações nas margens externas (Brown *et al.*, 2001).

A deformação permanente em misturas asfálticas ocorre principalmente em temperaturas em torno de 60°C, na qual é observada a redução da rigidez do ligante asfáltico no revestimento em serviço. Com o ligante menos rígido, a mistura asfáltica perde parte da sua capacidade estrutural, sofrendo deformações. Ainda que a rigidez do ligante tenha grande efeito na resistência à deformação permanente, o intertravamento dos agregados e suas características (forma, angularidade e textura) são frequentemente apontados como os maiores responsáveis por essa resistência (Onofre, 2012).

De maneira geral, a proporção de qualquer deformação ocorrida no revestimento, aumenta com o período de carregamento. Tal fato pode ser verificado na Figura 2.2 (a) e (b). A Figura 2.2 (a) apresenta a aplicação de uma carga estática. Nota-se na Figura 2.2 (b) que a deformação resultante mostra uma resposta elástica instantânea, seguida por um aumento gradual na deformação com o tempo, até o carregamento ser removido. A alteração gradual na deformação ocorre devido às propriedades viscoelásticas do ligante. Com a remoção da carga, a deformação elástica é recuperada instantaneamente e a parte viscosa se recupera com o passar do tempo. Nota-se também que parte da deformação é mantida, embora num material viscoelástico eventualmente o retorno é total (Whiteoak, 1990), ainda que haja modelos viscoelásticos que possibilitem o aparecimento de deformações permanentes.

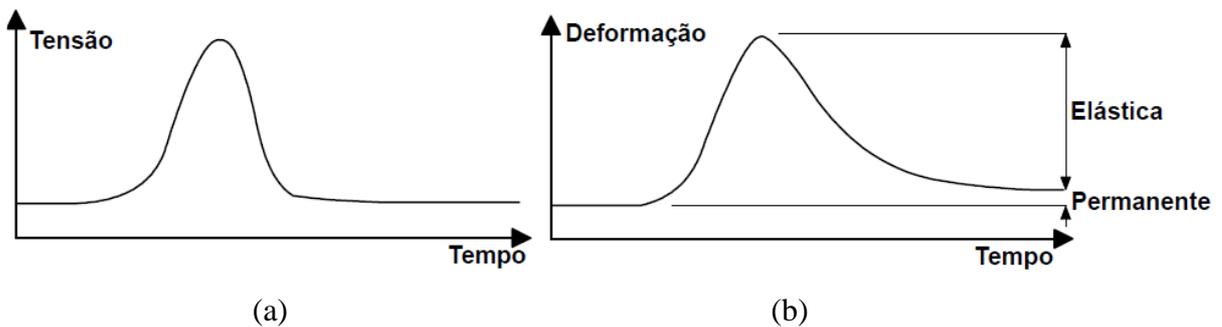
Figura 2.2 - Deformação devido à aplicação de carga estática.



Fonte: Adaptada de Whiteoak (1990).

A resposta da deformação do pavimento devido a um carregamento pulsante, Figura 2.3 (a), e.g., veículo em movimento, encontra-se de forma ilustrativa na Figura 2.3 (b). Nota-se que ao fim do carregamento houve uma deformação não recuperável, que por menor que possa parecer para um único pulso, pode aumentar com milhões de aplicações de carga num pavimento.

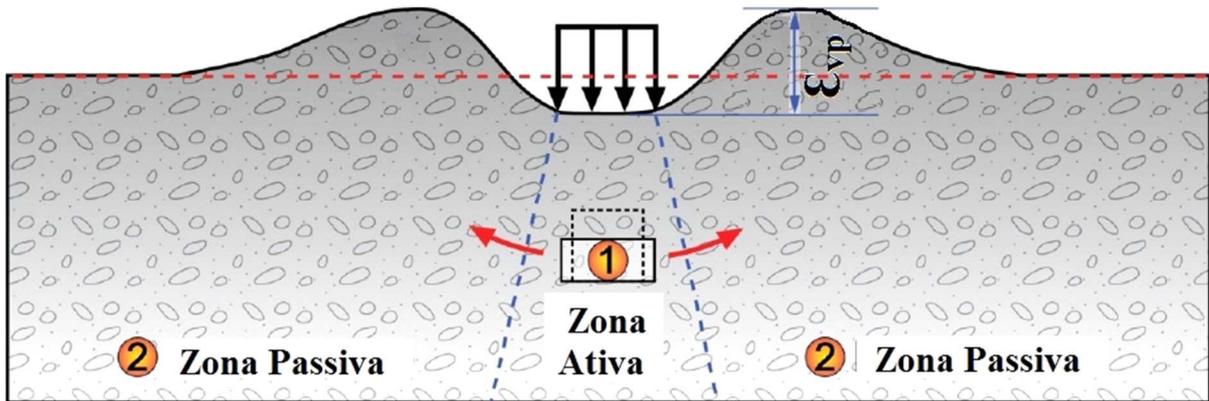
Figura 2.3 - Deformação devido à aplicação de carga dinâmica.



Fonte: Adaptada de Whiteoak (1990).

As deformações permanentes apresentam depressões longitudinais como mostra a Figura 2.4, a qual descreve a configuração geral do desenvolvimento destas depressões de acordo com o ciclo de aplicação de cargas no pavimento. A deformação permanente é causada pela carga de tráfego aplicada no percurso da roda. A área da trilha de roda sobre o revestimento está sob tensão de compressão na direção vertical. Esta zona é referida como a zona ativa. De cada lado da zona ativa existem as zonas passivas, como mostrado na Figura 2.4. A deformação da zona passiva é originada a partir da deformação da zona ativa, no entanto, a zona passiva também tem um efeito sobre a zona ativa. Este efeito está associado ao confinamento provocado pelas zonas passivas que circunscrevem a zona ativa.

Figura 2.4 - Diagrama esquemático do mecanismo de formação de deformação permanente.

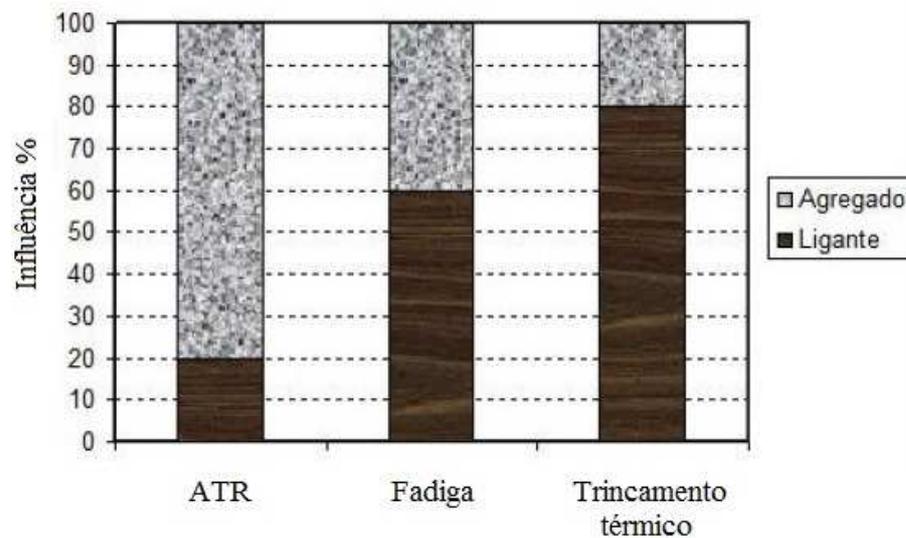


Fonte: Adaptada de Choi (2013).

Observa-se que quando uma carga veicular é aplicada ao pavimento, a zona ativa deforma verticalmente, e a deformação lateral ocorre devido ao efeito Poisson. Ao mesmo tempo ocorre uma resposta horizontal, que se traduz em uma pressão de confinamento contra a zona ativa. A deformação permanente, ϵ_{vp} , acumulada ao longo do tempo está diretamente associada às cargas impostas pelo tráfego.

Há referências que indicam que os agregados exercem maior influência na resistência à deformação permanente se comparados ao ligante asfáltico. A FHWA (*Federal Highway Administration*) cita que os agregados respondem por 80% da responsabilidade de prevenir este tipo de defeito, Afundamento de Trilha de Roda (ATR), representado pela Figura 2.5. Isso mostra a importância de se ter um esqueleto mineral bem dimensionado na mistura asfáltica e a importância de se estudar as propriedades dos agregados (Onofre, 2012).

Figura 2.5 - Influência do agregado e do ligante no comportamento de misturas asfálticas.



Fonte: Adaptada de FHWA (2002).

A influência dos agregados na mistura asfáltica quanto à deformação permanente não está associada apenas à origem mineralógica dos mesmos. A resistência do esqueleto pétreo também está relacionada à angularidade, à forma e à textura dos agregados. Bessa (2012) estudou três tipos de agregados com propriedades similares em relação à angularidade, à forma e à textura. Apesar da diferença entre as origens mineralógicas (fonolito, gnaisse e granito), os resultados dos ensaios de rigidez, resistência à tração e à deformação permanente mostram misturas com comportamento mecânico similares, com diferença apenas no comportamento em relação à resistência à fadiga por tensão controlada. O autor concluiu que para agregados do estado do Ceará as propriedades de angularidade, de forma e de textura foram mais determinantes no comportamento mecânico de misturas asfálticas do que as características mineralógicas, uma vez que esses agregados possuem origens mineralógicas próximas.

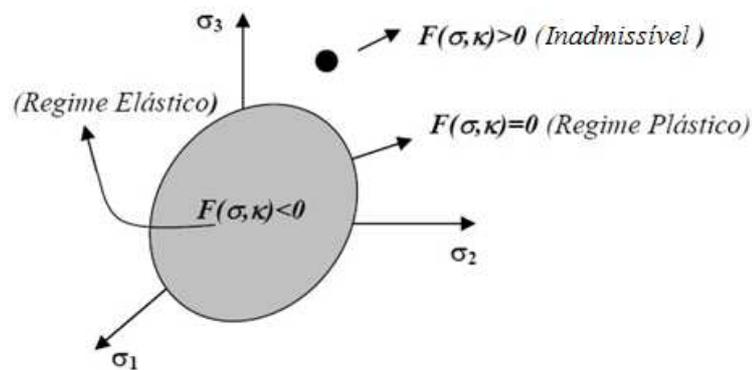
2.2 Modelos viscoplásticos de deformação permanente para misturas asfálticas

A viscoplasticidade é caracterizada por um critério plástico, abaixo do qual o material não deforma permanentemente, e acima do qual as deformações irreversíveis ocorrerem. O fluxo dessas deformações obedece relações constitutivas (Mitsoulis, 2007). Um material apresenta comportamento viscoplástico ao exibir pequena ou nenhuma deformação quando sujeito a um nível de tensão inferior ao limite de escoamento (Santos, 2010). O

comportamento viscoplástico apresenta simultaneamente um limite de tensão e um tempo característico de relaxação. A viscoplasticidade depende da taxa de deformação, do tempo e da viscosidade do material, diferentemente da plasticidade que possui uma região denominada de domínio elástico, onde existe uma função de fluência que delimita uma região fechada através de uma superfície de fluência que separa, no espaço de tensões, as combinações de tensões que descrevem os comportamentos plásticos ou elásticos. Na viscoplasticidade é permitido que determinado estado de tensão esteja fora do domínio elástico, no entanto, a tensão retorna ao limite (zero) em um tempo característico, chamado de tempo de relaxação (Maugin, 1992; Simo e Hughes, 1998).

Gomes (2006) avalia que se a função fluência for menor do que zero, as deformações plásticas não ocorrem, pois o regime é elástico, e se a função for igual a zero então existe um fluxo plástico. Caso a função fluência exceda a zero, então o estado de tensões não será permitido, pois estará na região das tensões plasticamente inadmissíveis, como mostra a Figura 2.6.

Figura 2.6 - Critério de plastificação - espaço de tensões admissíveis.



Fonte: Gomes (2006).

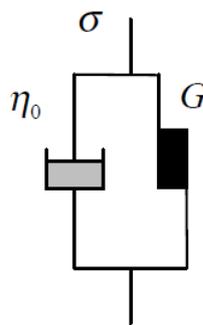
onde $F(\sigma, k)$: função de fluência;
 σ : estado de tensão; e
 k : parâmetro de estado do material.

Os modelos de deformação permanente podem ser classificados em dois tipos: modelos mecânicos rigorosos e do tipo lei de potência (Choi, 2013). Modelos mecânicos

rigorosos empregam a lei de fluxo plástico. Estes modelos são complexos, de difícil compreensão e ainda requerem altos custos para sua calibração, pois necessitam de inúmeros ensaios de laboratório utilizando equipamentos sofisticados, além de programas matemáticos para manipulação dos dados e calibrações em campo para validação e ajuste.

A lei de fluxo para as deformações viscoplásticas pode ser representada por um análogo mecânico o qual combina um amortecedor e um elemento deslizante em paralelo. Este modelo foi desenvolvido por Perzyna (1963), conforme indicado na Figura 2.7.

Figura 2.7 - Análogo mecânico para o modelo geral viscoplástico.



Fonte: Perzyna (1963).

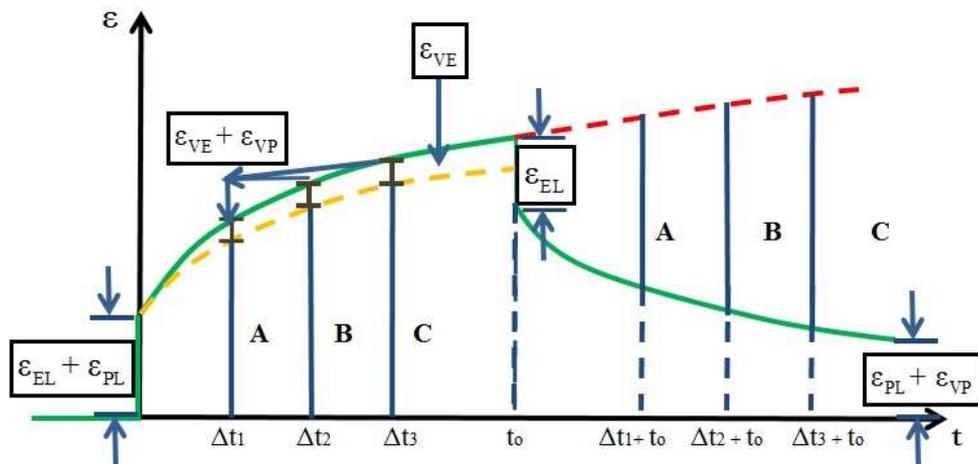
onde σ : tensão aplicada;
 G : superfície de escoamento; e
 η_0 : viscosidade do material.

Um dos ensaios muito utilizado para a avaliação do comportamento quanto à deformação permanente em misturas asfálticas é o *creep and recovery*, pelo qual é possível observar a presença de parcelas elásticas, viscoelásticas, plásticas e viscoplásticas. Até o instante t_0 de aplicação da carga o corpo sofre deformação e relaxa ao ser descomprimido, logo surgem deformações plásticas e viscoplásticas. Na Figura 2.8 é possível observar o efeito da superposição entre os gráficos tensão e deformação após a aplicação do ensaio.

A primeira parcela de deformação obtida no ensaio é possível após o descarregamento no material. Como observa-se na Figura 2.8, trata-se da parcela elástica, ϵ_{EL} (em t_0). A partir desta parcela obtida após o descarregamento, percebendo no gráfico a parcela de deformação plástica e elástica ($\epsilon_{PL} + \epsilon_{EL}$) ocorridas no começo do ensaio, nota-se que é possível determinar a parcela de deformação plástica (ϵ_{PL}), substituindo-se o valor da

deformação elástica obtida no passo anterior. Pode-se então encontrar a deformação viscoplástica (ϵ_{VP}), uma vez que esta surge combinada com a deformação plástica no final do ciclo de descanso do material ($\epsilon_{PL} + \epsilon_{VP}$), bastando subtrair-se o valor da deformação plástica determinada no passo anterior. Em resumo: primeiro encontra-se a deformação elástica (ϵ_{EL}), em seguida a plástica (ϵ_{PL}), e, por fim, determina-se a deformação viscoplástica (ϵ_{VP}).

Figura 2.8 - Representação esquemática do ensaio de *creep and recovery*.



Fonte: Autor deste trabalho.

onde ϵ_{VE} : deformação viscoelástica;
 ϵ_{VP} : deformação viscoplástica;
 ϵ_{EL} : deformação elástica; e
 ϵ_{PL} : deformação plástica.

Monismith, Ogawa e Freeme (1975) introduziram o modelo mais comum para a previsão da deformação permanente de misturas asfálticas, encontrado em diversas fontes (Svenson, 1980; Cardoso, 1987; Medina e Motta, 2005; Santos, 1998; Franco, 2000; Lekarp *et al.*, 2000b). Ele relaciona o número de repetições de carga com a deformação permanente, e está representado na Equação 2.1, sendo aplicado em ensaios de *creep and recovery*.

$$\epsilon_{vp} = a.N^b \quad (2.1)$$

onde ϵ_{vp} : deformação permanente;

a e b : parâmetros a serem determinados para as condições do ensaio; e
 N : número de repetições de carga em laboratório.

Uzan (1996) e Schapery (1999) sugeriram um modelo simples baseado no carregamento uniaxial para caracterização do comportamento quanto à deformação permanente conforme a Equação 2.2. Este modelo foi desenvolvido para o ensaio de *creep and recovery*.

$$\dot{\varepsilon}_{vp} = \frac{g(\sigma)}{h_{\varepsilon_{vp}}} \quad (2.2)$$

onde $\dot{\varepsilon}_{vp}$: taxa de variação da deformação permanente; e
 g e h : funções da tensão, σ .

Gibson *et al.* (2003) assumiram valores para as funções h e g conforme as Equações 2.3 e 2.4, respectivamente.

$$h(\varepsilon_{vp}) = A\varepsilon_{vp}^p \quad (2.3)$$

$$g(\sigma) = B\sigma^q \quad (2.4)$$

onde A , B , p e q são parâmetros do modelo.

O modelo proposto por Gibson *et al.* (2003) segue a Equação 2.5.

$$\dot{\varepsilon}_{vp} = k(\sigma, \varepsilon_{vp}) \quad (2.5)$$

onde k : é uma função de tensão e deformação.

Subramanian (2011) afirma que modelos apresentados conforme a Equação 2.5, apesar de serem bastante usados em carregamentos axiais, não descrevem bem o comportamento da região secundária no ensaio de *creep and recovery*. Ou seja, tais modelos

podem não ser adequados para representar o comportamento da mistura asfáltica sob um número de ciclos elevado.

O comportamento quanto à deformação permanente em misturas asfálticas tem sido tradicionalmente tratado usando teorias viscoplásticas para comportamento de metais e polímeros. Um dos primeiros modelos a serem empregados em misturas asfálticas foi o de Perzyna (1966), no qual a taxa de deformação viscoplástica é tipicamente avaliada conforme a Equação 2.6.

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \Gamma \langle f \rangle \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.6)$$

onde $\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}$: tensor da taxa de deformação viscoplástica;
 f : função limite de deformação que está relacionada à superfície de área;
 F : função de potência viscoplástica que é usada para dar a direção do incremento do tensor de deformação viscoplástica; e
 $\langle \cdot \rangle$: colchete de Macaulay.

O colchete de Macaulay é definido como: $\langle h \rangle = h$ para $h > 0$ e $\langle h \rangle = 0$ para $h \leq 0$.

Neste modelo proposto por Perzyna, a deformação viscoplástica segue as condições propostas por Macaulay. A variável f é uma medida de distância do ponto de tensão aplicada até a superfície de escoamento. Quando as tensões aplicadas encontram-se dentro ou sobre a superfície de escoamento não ocorre nenhuma deformação viscoplástica. As funções f e F podem ser tipicamente funções de um ou mais dos seguintes parâmetros: tensão, σ ; deformação, ε ; e histórico de tensões e/ou deformações mensuradas. O endurecimento do material sob carregamento pode ser modelado usando a expansão da superfície de escoamento (endurecimento isotrópico) ou translação da superfície de escoamento (endurecimento cinemático). Ou seja, a diferença física entre eles está na forma do endurecimento. Diferentes modelos são obtidos a partir das variações em f e F . Os modelos de viscoplasticidade desenvolvidos por Perzyna têm sido aplicados com sucesso em metais e problemas de plasticidade em solos, e são os modelos mais clássicos de viscoplasticidade na pavimentação asfáltica (Subramanian, 2011). A partir deste modelo proposto por Perzyna, vários outros foram desenvolvidos para descrever o comportamento viscoplástico de materiais asfálticos.

Gibson (2006) propôs um modelo viscoplástico tridimensional para misturas asfálticas utilizando o modelo de Perzyna. Este modelo foi calibrado a partir um conjunto de configurações do ensaio de *creep and recovery* e validado por meio de outra configuração do mesmo ensaio (variação do período de repouso). O modelo é apresentado conforme a Equação 2.7.

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \Gamma \langle f(\mathbf{F}) \rangle \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (2.7)$$

$$F = J_2 - \left(\gamma (I_1 + R(\xi))^2 - \alpha(\xi) (I_1 + R(\xi))^n \right),$$

$$J_2 = \frac{1}{6} \left((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right),$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3,$$

$$R(\xi) = R_0 + R_A \xi^{K_2},$$

$$\alpha(\xi) = \alpha_0 \exp(\xi k_1),$$

$$\xi = \int d\varepsilon_1^{vp} + \int d\varepsilon_2^{vp} + \int d\varepsilon_3^{vp},$$

$$f = A \left(\frac{G(\mathbf{F})}{G_0(\mathbf{F})} - 1 \right)^n$$

onde $\gamma, n, k_1, k_2, R_0, R_A, \alpha_0$ e n : parâmetros do modelo;
 F : superfície de escoamento com endurecimento;
 ξ : trajetória de deformação permanente;

$G(F)$:	distância do ponto de tensão aplicada $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ no eixo principal do espaço para a linha hidrostática junto à direção $\frac{\partial F}{\partial \sigma_i}$;
$G_0(F)$:	distância da superfície de fluxo, F , no eixo principal do espaço para a linha hidrostática junto à direção $\frac{\partial F}{\partial \sigma_i}$;
I_1 :	primeiro invariante de tensão desvio; e
J_2 :	segundo invariante de tensão desvio.

Dessouky *et al.* (2006) desenvolveram um modelo viscoplástico baseado em Perzyna com um critério de plasticidade de Drucker-Prager estendido para tensão e compressão da mistura asfáltica. Este modelo também leva em consideração o efeito da microestrutura do agregado e a progressão do dano no comportamento do material. Este modelo foi calibrado com um ensaio monotônico de tensão e compressão, e é representado pela Equação 2.8.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \Gamma \langle \phi(f) \rangle \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (2.8)$$

$$\Phi(f) = f^n,$$

$$f = \tau(\sigma_{ij}, \bar{\epsilon}_{vp}) - \alpha I(\sigma_{ij}, \bar{\epsilon}_{vp}, d, \Delta) - k(\bar{\epsilon}_{vp}),$$

$$g = \tau(\sigma_{ij}, \bar{\epsilon}_{vp}) - \beta I(\sigma_{ij}, \bar{\epsilon}_{vp}, d, \Delta),$$

$$\dot{\bar{\epsilon}}_{vp} = \mu(\beta) \sqrt{\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} \dot{\epsilon}_{ij}^{vp}}$$

onde n, d, Δ, α e β : parâmetros do modelo; e

$\bar{\epsilon}_{vp}$: deformação permanente efetiva.

Yun (2008) estabeleceu um modelo baseado nos princípios de Perzyna com a finalidade de avaliar a função endurecimento que tem forte dependência sobre o histórico de carregamento. Este modelo leva em consideração o carregamento uniaxial e é representado conforme a Equação 2.9.

$$\dot{\varepsilon}_{vp} = \left\langle \frac{\sigma - G}{D} \right\rangle^m \text{sgn}(\sigma - G), \quad (2.9)$$

$$\dot{G} = g(\dot{\sigma}, \sigma, G)$$

onde D e m : são parâmetros do modelo;
 G : critério de plasticidade usado para capturar o efeito do amolecimento e do endurecimento; e
 $\text{sgn}(\sigma - G)$: função de $(\sigma - G)$ no intervalo $[-1:1]$.

A função $\text{sgn}(\sigma - G)$ obedece as seguintes condições:

$$\text{sgn}(\sigma - G) = \begin{cases} 1, & \text{se } \sigma - G > 0, \\ 0, & \text{se } \sigma - G = 0, \\ -1, & \text{se } \sigma - G < 0. \end{cases}$$

O modelo de Yun (2008) considera que o material é suavizado no período de descanso e endurecido no ciclo de carregamento. O modelo foi ajustado para o ensaio de *creep and recovery* de formato quadrático com várias centenas de ciclos de carregamento. Porém, o modelo não avalia com acurácia os resultados dos ensaios de *creep and recovery* com formato de carregamento semi-senoidal. Subramanian (2011) comenta que de todos os modelos derivados do modelo de Perzyna este é o que melhor representa o comportamento viscoplástico em misturas asfálticas, pois leva em consideração o endurecimento isotrópico do material e o endurecimento.

Levenberg (2009) também propôs um modelo viscoplástico para análises tridimensionais baseado nos princípios de Perzyna. A desvantagem deste modelo é sua limitação para previsão de deformação permanente por meio do ensaio de *creep and recovery*,

pois são obtidos baixos números de ciclos e baixos níveis de deformação permanente (até 1.000 *microstrains*). Subramanian (2011) afirma que testou várias misturas e encontrou como nível máximo de deformação o valor de 0,06%, ou seja, $\varepsilon = 600 \times 10^{-6}$. Dadas essas desvantagens, tal modelo não apresenta confiabilidade para números de ciclos elevados, o que não representa de forma consistente o comportamento da mistura asfáltica. A versão uniaxial do modelo é representada conforme a Equação 2.10.

$$\dot{\varepsilon}_{vp} = \left\langle \frac{f}{k} \right\rangle^n \frac{\text{sgn}(\sigma)}{t_*}, \quad (2.10)$$

$$f = (\sigma - x)\sigma,$$

$$\dot{x} = H \left(1 + \frac{x}{D} \right) \dot{\varepsilon}_{vp}$$

onde k , n , H e D : parâmetros do modelo;
 t_* : tempo de referência que mantém consistência dimensional;
 x : quantidade de parcela de tensão que controla o endurecimento; e
 $\text{sgn}(\sigma)$: função de (σ) no intervalo $[-1:1]$.

Conforme indicado anteriormente, a função $\text{sgn}(\sigma)$ obedece as seguintes condições:

$$\text{sgn}(\sigma) = \begin{cases} 1, & \text{se } \sigma > 0, \\ 0, & \text{se } \sigma = 0, \\ -1, & \text{se } \sigma < 0. \end{cases}$$

Nunes (2006) aplicou um modelo com dano desenvolvido por Tashman (2003) e verificou que as respostas das misturas asfálticas estão relacionadas às componentes elásticas recuperáveis e às componentes irre recuperáveis viscoplásticas a altas temperaturas (temperaturas de serviço dos pavimentos da área de estudo) associadas com a deformação permanente. A taxa de deformação total, Equação 2.11, é expressa por:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ij}^e + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ij}^{vp} \quad (2.11)$$

onde $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$: taxa de deformação total;
 $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ij}^e$: tensor da taxa de deformação elástica; e
 $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ij}^{vp}$: tensor da taxa de deformação viscoplástica.

O Guia de Projeto da AASHTO (NCHRP, 2004) desenvolveu um modelo para a análise de deformação permanente em misturas asfálticas, o qual é uma relação constitutiva baseada em dados de ensaios triaxiais de carga repetida, realizados em misturas asfálticas, e calibrados com dados de observações de campo analisados estatisticamente. O referido modelo foi utilizado por Franco (2007) que propôs um método de dimensionamento para o Brasil, a partir da avaliação individual dos danos causados no pavimento por diversos tipos de eixos, e que elimina a consideração do carregamento equivalente a um eixo padrão. O modelo escolhido pelo Guia, apresentado na Equação 2.12, foi baseado na extensa pesquisa conduzida por Leahy (1989) e Ayres (1997) e foi parcialmente calibrado com dados de campo obtidos de 88 seções pertencentes ao programa LTPP (*Long Term Pavement Performance*) de instrumentação e acompanhamento de diversas seções de rodovias norte-americanas que produziu um banco de dados amplo de informações sobre as propriedades e desempenho dos pavimentos.

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = k_1 \cdot 10^{3,51108} T^{1,5606} N^{0,479244} \quad (2.12)$$

onde ε_p : deformação permanente na n-ésima repetição de carga;
 ε_r : deformação específica resiliente como função das propriedades da mistura, da temperatura e da frequência de carregamento;
 T : temperatura do pavimento (°F);
 N : número de repetições de carga; e
 k_1 : função da espessura da camada asfáltica e da profundidade do ponto de análise, conforme indicado adiante.

A deformação específica resiliente pode ser determinada em laboratório no Brasil pela especificação norte-americana ASTM D4123-82 (1995) - *Standard Test Method for*

Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures. O fator k_1 foi introduzido para promover uma previsão mais acurada possível do afundamento de trilha de roda. A sua determinação foi obtida por meio de ensaios realizados em trincheiras em seções da pesquisa de acompanhamento de trechos de pavimentos do Departamento de Transportes do Estado de Minnesota (MnRoad).

$$k_1 = (C_1 + C_2 \cdot z) 0,328196^z;$$

$$C_1 = -0,1039 H_{ac}^2 + 2,4868 H_{ac} - 17,342; \text{ e}$$

$$C_2 = 0,0172 H_{ac}^2 - 1,7331 H_{ac} + 27,428$$

onde z : profundidade em polegadas;
 C_1 e C_2 : constantes; e
 H_{ac} : espessura da camada asfáltica em polegada.

Subramanian (2011) desenvolveu o modelo de taxa que é um modelo mecânico para prever a deformação permanente com variação do tempo de carregamento e da tensão desvio. A partir deste modelo o referido autor desenvolveu o modelo incremental o qual é uma versão simplificada sob determinados pressupostos, sendo estes: (i) assumir como constantes as integrais de convolução associadas ao endurecimento e aos níveis de deformações viscoplásticas do material ($\sigma_{b,H}$ é a tensão que está associada ao endurecimento do material, e $\sigma_{b,vp}$ está associada com a evolução da deformação viscoplástica) (ii) considerar o coeficiente α como um parâmetro que governa o efeito do endurecimento na evolução da deformação permanente.

Modelo da taxa

O modelo da taxa proposto por Subramanian (2011) é expresso pelas Equações 2.13 e 2.14.

$$H(t) = (t_{ini}) + \left\langle \int_{t_{ini}}^t D_2(t - \tau) \frac{d\sigma_{b,H}(\tau)}{d\tau} d\tau \right\rangle \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_{vp}(t) = \varepsilon_{vp}(t_{ini}) + \left\langle \int_{t_{ini}}^t D_1(t - \tau) \frac{d\sigma_{b,vp}(\tau)}{d\tau} d\tau \right\rangle \quad (2.14)$$

Durante o carregamento:

$$\sigma(t)_{b,H} = H_1 \sigma(t)^q \quad (2.15)$$

$$\sigma(t)_{b,vp} = \frac{(G_1 \sigma(t)^{p_1}) + (G_2 \sigma(t)^{p_2})}{H(t)^\alpha} \quad (2.16)$$

onde τ : variável da integral no tempo;
 $H(t)$: variável de estado relacionada ao endurecimento no material;
 t_{ini} : tempo a partir do qual começa a previsão do modelo;
 $H(t_{ini})$: valor inicial para H no t_{ini} ;
 $\sigma_{b,H}$ e $\sigma_{b,vp}$: tensão efetiva relacionada ao endurecimento e à evolução da deformação permanente;
 $\varepsilon_{vp}(t_{ini})$: parâmetro de deformação viscoplástica inicial no t_{ini} ;
 α : parâmetro do modelo que governa a evolução do endurecimento;
 $D_1(t)$ e $D_2(t)$: *creep compliances* relacionadas à deformação viscoplástica e ao endurecimento do material, respectivamente; e
 G_1 , G_2 , p_1 e p_2 : parâmetros do modelo dependente da tensão relacionados à evolução da deformação permanente.

O colchete de Macaulay, no contexto do modelo, é definido pelas Equações 2.17(a) e (b).

$$\langle f \rangle = f, \dot{f} > 0, \quad (2.17(a))$$

$$\langle f \rangle = 0, \dot{f} \leq 0. \quad (2.17(b))$$

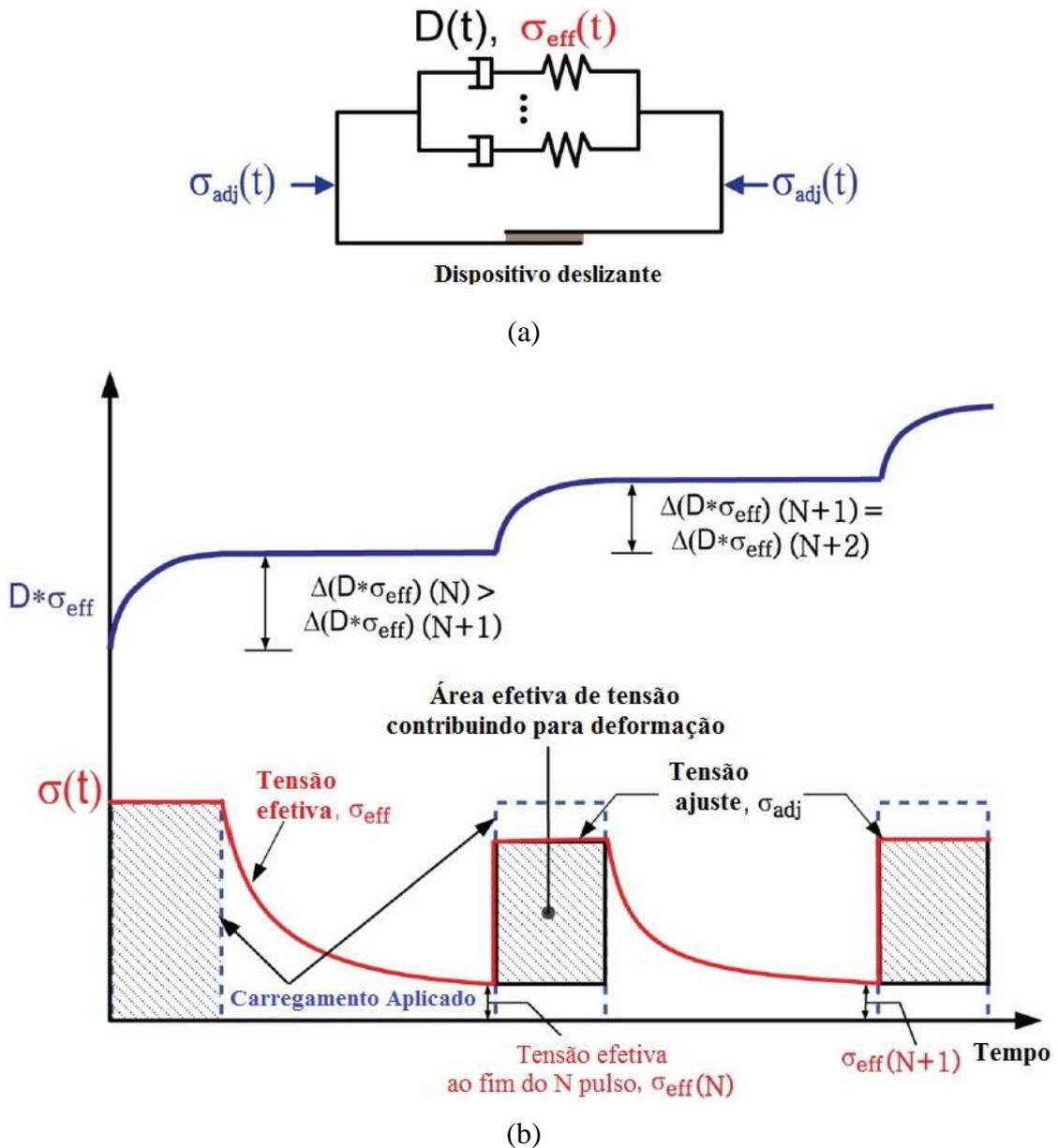
A Figura 2.9 (a) mostra o modelo análogo ao modelo de taxa. A integral de convolução na Equação 2.18 funciona de acordo com o deslizamento do dispositivo, que é acoplado em paralelo ao modelo viscoelástico com uma função fluência, $D(t)$, que está em paralelo com o dispositivo deslizante. A integral de convolução é expressa por:

$$\int_{-\infty}^t D(t - \tau) \frac{d\sigma_{eff}}{d\tau} d\tau = D * \sigma_{eff} \quad (2.18)$$

A tensão efetiva, σ_{eff} , é a tensão no elemento viscoelástico do análogo mecânico e é igual à tensão aplicada, σ , quando o material é carregado e $D * \sigma_{eff}$ está aumentando. Quando ocorre o descarregamento, $D * \sigma_{eff}$ tende a diminuir, contudo o elemento deslizante do modelo fecha-se e mantém $D * \sigma_{eff}$ constante, permitindo a relaxação do elemento viscoelástico. Quando um novo carregamento é aplicado, $D * \sigma_{eff}$ volta a aumentar. Observa-se na Figura 2.9(b) que ao fim do primeiro ciclo a tensão efetiva, σ_{eff} , não foi totalmente relaxada. Esta última observação leva à conclusão que, experimentalmente, uma parte da contribuição da tensão efetiva, σ_{eff} , para a deformação é reduzida. O incremento na deformação permanente resultante do próximo ciclo é então menor do que o do ciclo anterior, havendo dessa forma uma contribuição para o endurecimento (Subramanian *et al.*, 2013).

A Figura 2.9 (a) mostra que as tensões são aplicadas a partir de fora do modelo análogo representativo. A Figura 2.9 (b) resume o comportamento de $D * \sigma_{eff}$ abaixo da deformação e recuperação a partir da *creep compliance*, $D(t)$.

Figura 2.9 - Diagrama esquemático do modelo da taxa: (a) modelo análogo e (b) conceito de tensão efetiva.



Fonte: Adaptada de Subramanian (2011).

Choi (2013) afirma que a tensão efetiva torna-se igual a tensão de ajuste (σ_{adj}) durante o carregamento, quando o incremento é crescente. A tensão de ajuste é um tipo de tensão aplicada, mas difere fisicamente da tensão aplicada na amostra durante o ensaio. A tensão de ajuste é uma tensão modificada que se destina a capturar os efeitos não lineares da tensão sobre a evolução da deformação permanente. É possível verificar a tensão de ajuste atuando durante o ensaio após alguns ciclos de carga, Figura 2.9 (a) e (b).

Pode-se observar que para tempos suficientemente longos de descanso toda a tensão efetiva contribuirá para a deformação nos pulsos subseqüentes. Mas se o período de descanso for inferior ao mínimo necessário à relaxação, apenas uma parte da tensão aplicada contribuirá para a deformação permanente.

Para determinadas funções de *creep compliance*, $D(t)$, a aplicação cíclica de um carregamento de formato constante e mesmo período de descanso levará a amostra ao chamado *steady state* ou estado estacionário. No estado estacionário o crescimento incremental em $D^*\sigma_{\text{eff}}$ torna-se constante a cada pulso e a tensão efetiva no fim de cada período de descanso torna-se a mesma nos pulsos seguintes. O número de pulsos necessários para o estabelecimento deste estado está ligado apenas ao formato do carregamento, ao tempo de descanso e à natureza do material. Uma vez alcançado o estado estacionário, a integral de convolução $D^*\sigma_{\text{eff}}$, reduz-se a uma constante e o incremento de deformação passará a crescer linearmente.

Modelo incremental

Sob a condição de estado estacionário, o incremento da integral de convolução se torna constante. Portanto, para fluências repetidas e testes de recuperação, a integral torna-se o produto dos incrementos da integral e do número de ciclos. Isto é, se for atingido o estado estacionário, então a forma de taxa pode ser simplificada e um modelo incremental pode ser criado para avaliar as deformações (Subramanian, 2011).

Considere o modelo de taxa, sem termos dependentes de tensão:

$$H(t) = (t_{ini}) + \left\langle \int_{t_{ini}}^t D_2(t - \tau) \frac{d\sigma_{b,H}(\tau)}{d\tau} d\tau \right\rangle \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_{vp}(t) = \varepsilon_{vp}(t_{ini}) + \left\langle \int_{t_{ini}}^t D_1(t - \tau) \frac{d\sigma_{b,vp}(\tau)}{d\tau} d\tau \right\rangle \quad (2.14)$$

Durante o carregamento:

$$\sigma(t)_{b,H} = \sigma(t) \quad (2.19)$$

$$\sigma(t)_{b,vp} = \frac{\sigma(t)}{H(t)^\alpha} \quad (2.20)$$

Subramanian (2011) avalia que a simplificação deste modelo não é trivial, devido à presença das integrais de convolução associado dentro do modelo viscoplástico usado para calcular as deformações permanentes. Assim, no estado estacionário, a aproximação é feita em primeiro lugar para que as integrais de endurecimento (D_2) e as deformações viscoplásticas (D_1) saiam do modelo, o que conduz ao seguinte:

$$H(t) = (t_{ini}) + \left\langle \int_{t_{ini}}^t D_2(t - \tau) \frac{d\sigma_{b,H}(\tau)}{d\tau} d\tau \right\rangle \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_{vp}(t) = \frac{\varepsilon_{vp}(t_{ini}) + \left\langle \int_{t_{ini}}^t D_1(t - \tau) \frac{d\sigma_{b,vp}(\tau)}{d\tau} d\tau \right\rangle}{H^\alpha(t)} \quad (2.21)$$

Durante o carregamento:

$$\sigma(t)_{b,H} = \sigma(t) \quad (2.22)$$

$$\sigma(t)_{b,vp} = \sigma(t) \quad (2.19)$$

As integrais assumem valores constantes considerando a condição de estado estacionário. O incremento depende, principalmente, do período de aplicação da carga, do nível de tensão e do período de repouso. Portanto, as integrais de convolução podem ser representadas pelas Equação 2.23 e 2.24.

$$\langle D_1(t) * \sigma_b \rangle \equiv I_{vp}(t_l, t_r, \sigma_d) \quad (2.23)$$

$$\langle D_2(t) * \sigma_b \rangle \equiv I_H(t_l, t_r, \sigma_d) \quad (2.24)$$

onde $I_{vp}(t_l, t_r, \sigma_d)$: incremento de deformação permanente devido a um ciclo de carga;
 $I_H(t_l, t_r, \sigma_d)$: incremento de endurecimento devido a um ciclo de carga;
 t_l : tempo de carregamento;
 t_r : período de repouso; e
 σ_d : tensão desvio.

Por meio da combinação entre as Equações 2.19 e 2.24 é possível obter o modelo incremental, conforme a Equação 2.26.

$$H(N) = H(N_{ini}) + (N - N_{ini}) I_H(t_l, t_r, \sigma_0) \quad (2.25)$$

$$\varepsilon_{vp}(N) = \frac{\varepsilon_{vp}^0(N_{ini}) + (N - N_{ini}) I_{vp}(t_l, t_r, \sigma_0)}{H^\alpha} \quad (2.26)$$

onde N_{ini} : número de carregamento onde a integral começa a atingir a condição de estado estacionário;
 N : número de ciclos de carregamento na análise;
 $\varepsilon_{vp}^0(N_{ini})$: deformação permanente no N_{ini} ; e
 $H(N_{ini})$: estado de endurecimento no N_{ini} ;

Um longo período de descanso faz a tensão efetiva ir para zero no final do período de descanso. Portanto, a condição de estado estacionário é satisfeita para o primeiro pulso. Então $N_{ini} = 0$ na Equação 2.26.

A forma final do modelo incremental que pode incluir o histórico de todo o carregamento é então obtida pela Equação 2.27 para qualquer tipo de ensaio de carga repetida.

$$\varepsilon_{vp} = \frac{A + BN}{(C + N)^\alpha} \quad (2.27)$$

Assim, os parâmetros do modelo incremental são definidos como:

$$A = \frac{\varepsilon_{vp,ini}^0}{[I_H(t_l, t_r, \sigma_d)]^\alpha} \quad (2.28)$$

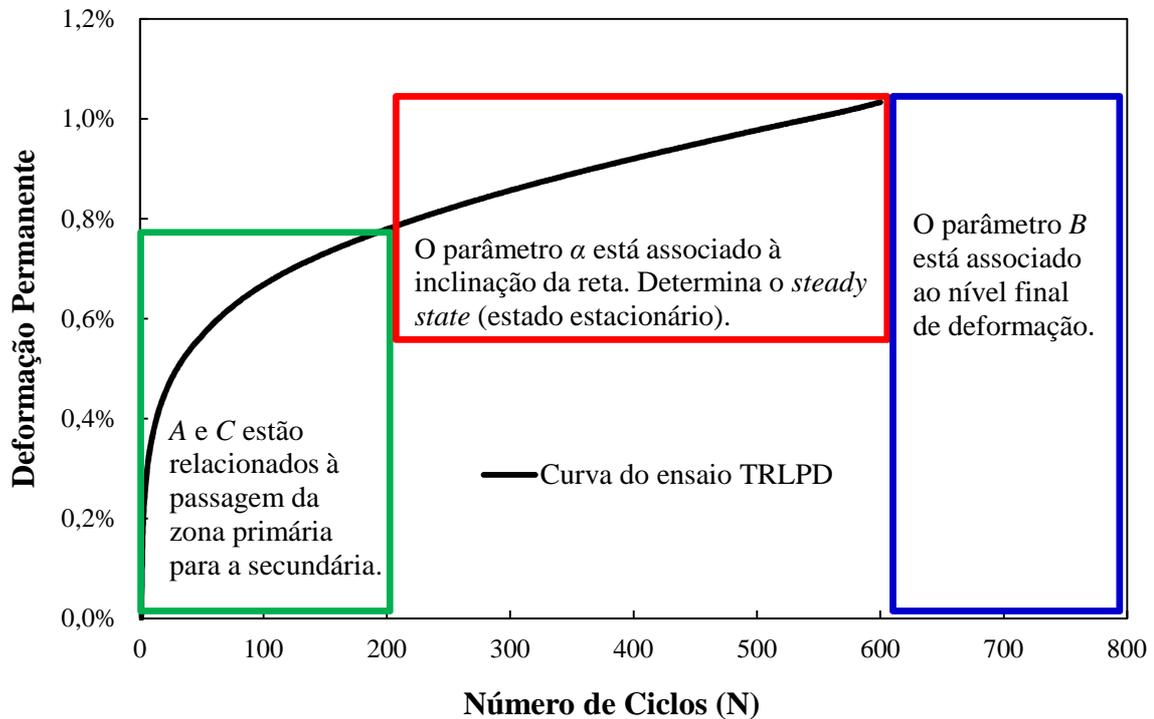
$$B = \frac{I_{vp}(t_l, t_r, \sigma_d)}{[I_H(t_l, t_r, \sigma_d)]^\alpha} \quad (2.29)$$

$$C = \frac{H_{ini}}{I_H(t_l, t_r, \sigma_d)} \quad (2.30)$$

A e C contém os parâmetros relacionados com o comportamento inicial da deformação permanente, isto é, o endurecimento inicial do corpo, e α (alfa) é o parâmetro evolutivo de endurecimento. A está relacionado à deformação permanente, enquanto que C está relacionado ao *status* de encruamento e ao incremento de encruamento do corpo no início do ensaio. Ou seja, os parâmetros A e C estão associados à deformação permanente inicial da mistura asfáltica. O parâmetro B é expresso como a relação entre a taxa de incremento de deformação e o incremento de endurecimento no estado permanente. A , B e C também podem ser expressos em função do tempo de carregamento, pela tensão desvio e pelo período de repouso. A Figura 2.10 representa como cada parâmetro está relacionado com a curva de deformação permanente obtida de um ensaio do tipo TRLPD.

Como já mencionado, o α está relacionado ao *status* de endurecimento e ao incremento de endurecimento do corpo no início do ensaio, e é uma característica de cada material. Subramanian (2011) comenta mais sobre esse coeficiente e apresenta um valor de referência igual a 0,85 para misturas asfálticas avaliadas em sua pesquisa, uma vez que um α igual 0,85 possibilitou que a curva do modelo representasse bem as curvas de deformação permanente obtidas por meio dos ensaios triaxiais de carga repetida.

Figura 2.10 - Representação dos parâmetros A , B , C e α na curva de deformação permanente do ensaio TRLPD.



Fonte: Autor deste trabalho.

2.3 Modelo de deformação permanente proposto por Choi (2013)

O modelo que Choi (2013) propôs, denominado *Shift Model*, tem como principal objetivo representar tanto a região da zona primária quanto a zona secundária, como uma função do número de ciclos de carregamento, tempo de carregamento, tensão desvio, e temperatura. O autor propôs este modelo a partir do modelo incremental, o qual é derivado do modelo da taxa de Subramanian (2011).

Choi *et al.* (2012) afirmam que em alguns casos, embora os modelos representem a região primária até certo ponto, os parâmetros do modelo (parâmetros de regressão) não apresentam adequadamente as características físicas que fornecem o comportamento adequado quanto à deformação permanente. Os altos custos de otimização podem ser outro fator quando uma forma de modelo é complexa, por exemplo, no que diz respeito ao produto da potência ou a função exponencial, ou ambos. Por causa da fragilidade existente nesses modelos, um modelo incremental é sugerido. Este modelo incremental é verificado por sua aplicação a várias condições de carregamento.

O modelo de Choi (2013) tem como base a seguinte forma indicada na Equação 2.27, repetida abaixo. Vale lembrar que essa não é a forma final do modelo deste autor, visto que a sua modificação e calibração será vista com mais riqueza de detalhe no Capítulo 3 desta dissertação.

$$\varepsilon_{vp} = \frac{A + BN}{(C + N)^\alpha} \quad (2.27)$$

Como já visto, os modelos a partir da lei de potência têm sido usados para prever o comportamento quanto à deformação permanente de material submetido ao ensaio de *creep and recovery*. Estes modelos são considerados simples e exigem menos esforços para calibração quando comparados a modelos mecânicos mais rigorosos. Choi (2013) apresentou de forma resumida alguns destes modelos e suas respectivas variáveis. A deformação permanente aumenta linearmente no espaço log-log com o aumento do número de ciclos. O comportamento linear sobre a escala log-log representa a forma de potência na escala aritmética. Esta região é chamada tipicamente de região secundária. A área na qual a deformação aumenta dramaticamente antes de alcançar a região secundária é conhecida como região primária. Os modelos apresentados na Tabela 2.1 não representam muito bem a zona primária, exceto o de Francken (1977) e do Tseng e Lytton (1989).

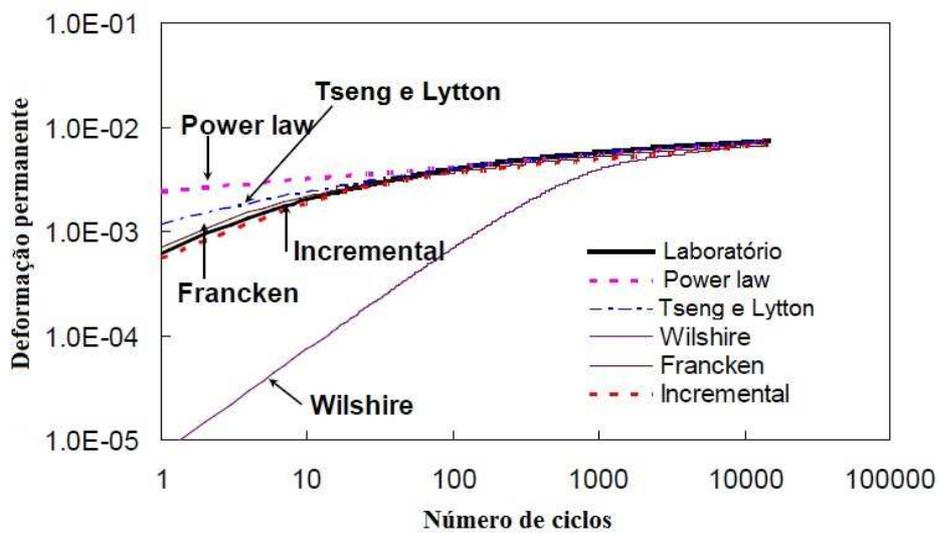
Tabela 2.1 - Modelos de deformação permanente para misturas asfálticas.

Modelo	Forma do modelo	Variáveis
Potência Simples	$\varepsilon_p = aN^b$	N : número de ciclos de carregamento a e b : coeficientes de regressão
Brown e Bell (1977)	$\varepsilon_p = (q/a)^b N$	ε_p : parâmetro de deformação por cisalhamento q : tensão desvio a e b : coeficientes N : número de ciclos de carregamento
Francken (1977)	$\varepsilon_p = AN^B + C(e^{DN} - 1)$	A, B, C e D : coeficientes N : número de ciclos de carregamento
Khedr (1986)	$\varepsilon_p / N = AaN^{-m}$	A e a : propriedades do material, função do módulo de resiliência e tensão aplicada m : parâmetro do material N = número de ciclos de carregamento
Tseng e Lytton (1989)	$\varepsilon_p = \varepsilon_0 \exp(-(\rho/N)^b)$	ε_0, ρ e b : coeficientes de regressão N = número de ciclos de carregamento
Monismith <i>et al.</i> (1994)	$\varepsilon_p = \delta(T) N^\alpha \sigma^{n-1} [\sigma_z - 0.5(\sigma_x + \sigma_y)]$	$\delta(T)$: função de temperatura α : coeficiente N : número de ciclos de carregamento T : carregamento total σ : tensão equivalente definida como uma função de tensão principal n : parâmetro de regressão $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: tensão transversal, tensão longitudinal, e tensão vertical
Wilshire e Evans (1994)	$\varepsilon_p = \theta_1(1 - e^{\theta_2 N}) + \theta_3(e^{-\theta_4 N} N - 1)$	ε_p : deformação por fluência θ_1, θ_3 : deformação primária e terciária θ_2, θ_4 : parâmetros de taxa quantificando a curvatura dos estágios primários e terciários N : número de ciclos de carregamento
MEPDG (2004)	$\varepsilon_p / \varepsilon_r = 10^{k_1} T^{k_2} N^{k_3}$	ε_p : deformação permanente ε_r : deformação resiliente N : número de ciclos de carregamento T : temperatura k_1, k_2, k_3 : coeficientes de regressão

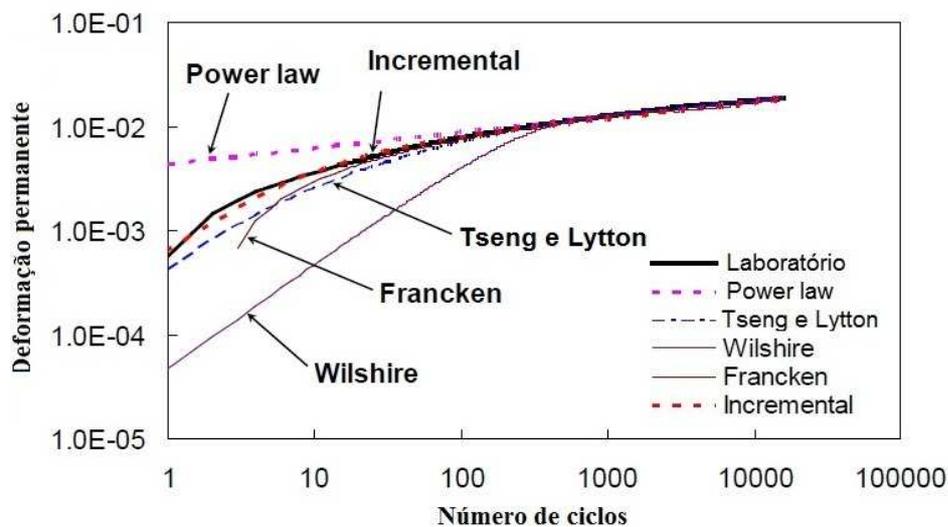
Fonte: Choi (2013).

Como já mencionado, os modelos apresentados na Tabela 2.1 representam bem a região secundária, no entanto, a região primária não é bem representada. Os modelos baseados na lei de potência estão associados apenas à representação da região secundária. Porém, como mostra a Figura 2.11 (a) e (b), os modelos propostos por Tseng e Lytton (1989) e por Francken (1977) mostram de forma razoável a zona primária quando comparados aos outros modelos.

Figura 2.11 - Resultados ajustados de modelos de deformação permanente com ensaio TRLPD (0,1s de tempo de carregamento e 0,9s de tempo de repouso com pressão confinante de 138kPa (20psi): (a) 621kPa (90psi) e (b) 1.035kPa (150psi) de tensão desvio.



(a)



(b)

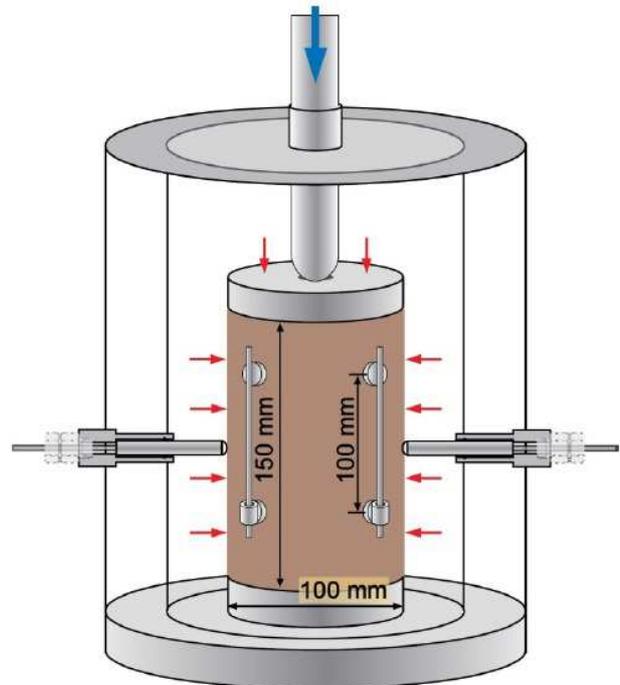
Fonte: Adaptada de Choi (2013).

O modelo foi desenvolvido, verificado e calibrado a partir de dois tipos de misturas: uma denominada FHWA (*Federal Highway Administration*) e também chamada de mistura de controle; e outra mistura chamada de NY9.5B em referência ao Departamento de Transportes de Nova York (*New York Department of Transportation - NYDOT*). A Figura 2.12 (a) mostra um CP envolto pela membrana. Para medir a deformação axial foram instalados em cada quadrante da amostra quatro LVDT's de 100mm concêntricos à altura do CP. A medição da expansão radial também é feita por quatro LVDT's do tipo *spring* atuando perpendicularmente ao CP. A Figura 2.12 (b) exemplifica a forma de colocação dos LVDT's para o ensaio confinado.

Figura 2.12 - Montagem da amostra na célula triaxial: (a) montagem do conjunto e (b) esquema do conjunto montado para o ensaio com confinamento.



(a)



(b)

Fonte: Choi (2013).

Para o desenvolvimento do *Shift Model* foram realizados ensaios TRLPD, ou seja, foi considerada a pressão de confinamento, conforme indicado na Tabela 2.2. Choi (2013) também desenvolveu um protocolo de ensaio para validar e calibrar o seu modelo. Este protocolo avalia os efeitos da tensão, do tempo reduzido, da temperatura e do período de

repouso. Para cada um desses efeitos são calculados fatores de ajuste para a calibração do *Shift Model*.

Tabela 2.2 - Condições para o ensaio TRLPD.

Condição de Ensaio	Mistura FHWA	Mistura DOT - NY9.5B
Tempo de carregamento (s)	0,1; 0,4 e 1,6 (40 e 54°C)	0,1; 0,4 e 1,0 (37°C) 0,1; 0,4 e 1,6 (47°C)
Tensão desvio (kPa)	621; 828 e 1.035 (90; 120 e 150psi)	483; 690 e 897 (70; 100 e 130psi)
Pressão de confinamento (kPa)	138 (20psi)	69 (10psi)
Temperatura (°C)	40 e 54	17; 37 e 47
Período de repouso (s)	0,9 ⁽¹⁾ e 100	100
Forma de carregamento	Semi-senoidal	Semi-senoidal

⁽¹⁾ Período de repouso de 0,9s testado somente a 54°C.

Fonte: Choi (2013).

A calibração e a validação do modelo foram realizadas pelos ensaios Compostos com Histórico de Carregamento (CHC) e os ensaios Aleatórios com Histórico de Carregamento (AHC). O ensaio CHC tem por objetivo representar um TRLPD completo a partir de um único bloco de carregamento. O ensaio AHC consiste em simular as condições de campo onde veículos passam aleatoriamente no pavimento com diferentes velocidades e pesos. Além disso, os ensaios CHC não são suficientes para validação do modelo, pois o bloco de carregamento está incluído na calibração. Se o modelo é capaz de prever os resultados de um teste aleatório de carregamento, é provável que o modelo esteja verificado e pronto para avaliar o desempenho em campo do pavimento.

Um histórico com carregamento aleatório é composto de uma distribuição aleatória de períodos de carga e valores de tensão desvio. O uso das condições propostas por Choi (2013) gerou uma configuração representada por um quadro de combinações dos tempos de

carregamento e níveis de tensão desvio, conforme a Tabela 2.2. Esta configuração consiste em um histórico com carregamento aleatório, e este histórico é selecionado aleatoriamente usando a função “RAND” no MATLAB. As misturas usadas na calibração do modelo, apresentadas na Tabela 2.2, foram provenientes de uma seção teste de pavimentos perpétuos pertencentes ao NYDOT, situada na rodovia interestadual 86 nos Estados Unidos. As amostras dessa mistura foram moldadas na execução do trecho e levadas ao laboratório para realização dos ensaios.

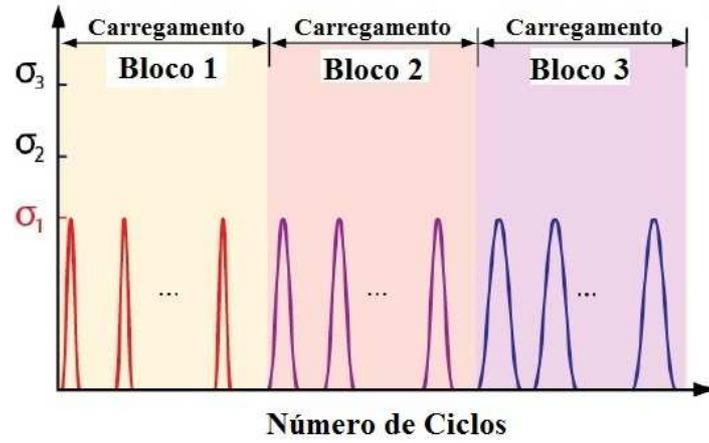
O ensaio CHC envolve alguns blocos de carregamento com mudança nos níveis de tensão desvio e tempo de carregamento. Cada bloco de carregamento é composto por em média centenas de ciclos com a mesma tensão desvio e o mesmo tempo de carregamento. Em seguida, a tensão desvio e o tempo de carregamento são mudados no bloco de carregamento subsequente. Para os três níveis de tensão desvio (620, 837 e 1.034kPa) e os tempos de carregamento 0,1; 0,4 e 1,6s (a 54°C) avaliados, há um total de nove blocos para cada CP. A Tabela 2.3 mostra a configuração da sequência dos nove blocos de carregamento no ensaio CHC, e as Figuras 2.12 (a), (b) e (c) ilustram a condição para as tensões desvios ($\sigma_1 = 621\text{kPa}$, $\sigma_2=828\text{kPa}$ e $\sigma_3 = 1.035\text{kPa}$) para os tempos de carregamentos de 0,1; 0,4 e 1,6s (a 54°C).

Tabela 2.3 - Configuração dos nove blocos para o ensaio CHC.

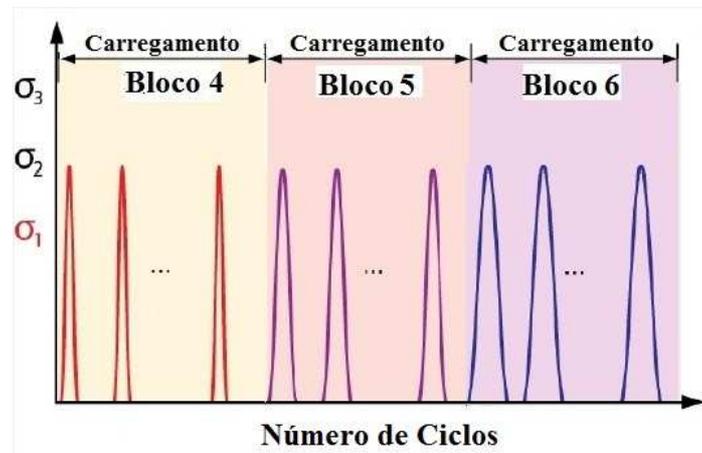
Sequência de carregamento (Bloco)	Tensão desvio (kPa)	Tempo de carregamento (s)	Número de ciclos		
			1° Grupo	2° Grupo	3° Grupo
1	621 (90psi)	0,1	200	300	100
2		0,4	200	300	100
3		1,6	200	300	100
4	828 (120psi)	0,1	200	300	100
5		0,4	200	300	100
6		1,6	200	300	100
7	1.035 (150psi)	0,1	200	300	100
8		0,4	200	300	100
9		1,6	200	300	100

Fonte: Adaptada de Choi (2013).

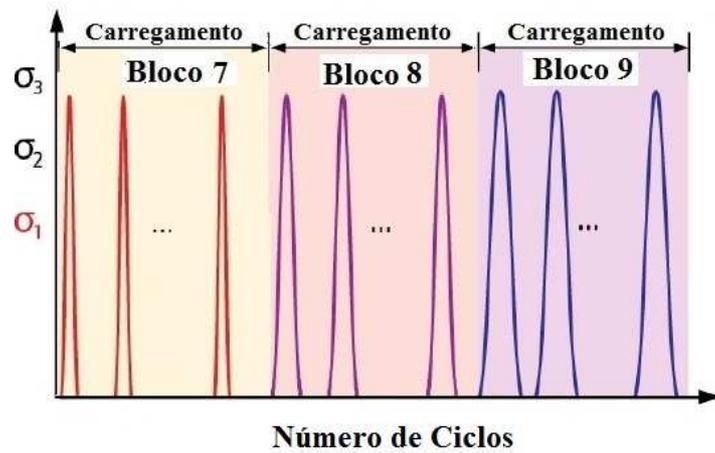
Figura 2.13 - Diagrama esquemático do ensaio CHC.



(a)



(b)

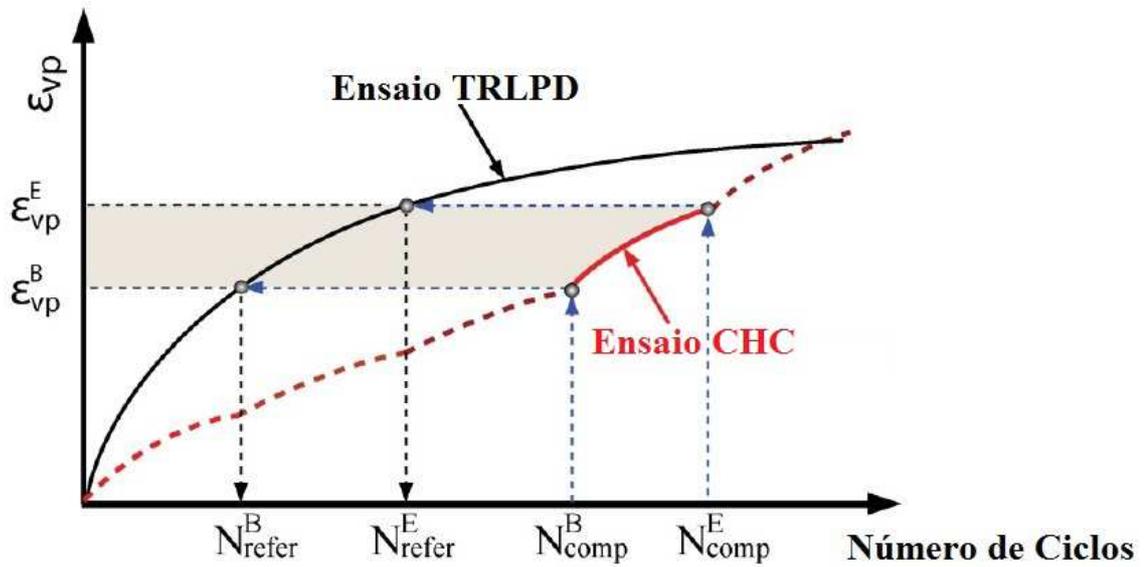


(c)

Fonte: Autor deste trabalho.

O ajuste do modelo é feito entre o ensaio TRLPD e o ensaio CHC, sendo este último capaz de representar um ensaio TRLPD em um bloco de carregamento como já visto. A Figura 2.14 mostra um esquema de equivalência entre o ensaio TRLPD e o CHC. A partir do gráfico representado na Figura 3.8 é possível determinar o parâmetro de ajuste entre os ensaios. Este ajuste pode ser denominado de parâmetro de ajuste do modelo, a_{total} , e é determinado pela Equação 2.31.

Figura 2.14 - Esquema de comparação entre o ensaio TRLPD e o ensaio CHC.



Fonte: Adaptada de Choi (2013).

$$a_{total} = \log \left(\frac{\Delta N_{refer}}{\Delta N_{comp}} \right) \quad (2.31)$$

$$\Delta N_{ref} = N_{refer}^E - N_{refer}^B \quad (2.32)$$

$$\Delta N_{comp} = N_{comp}^E - N_{comp}^B \quad (2.33)$$

onde ϵ_{vp}^B : deformação correspondente ao número inicial de ciclo no ensaio CHC para a mesma tensão desvio e tempo de carregamento;

- ε_{vp}^E : deformação correspondente ao número final de ciclos no ensaio CHC para a mesma tensão desvio e tempo de carregamento;
- N_{refer}^B : número de ciclos inicial do ensaio TRLPD correspondente ao ε_{vp}^B ;
- N_{refer}^E : número de ciclos final do ensaio TRLPD correspondente ao ε_{vp}^E ;
- N_{comp}^B : número de ciclos inicial do ensaio CHC correspondente ao ε_{vp}^B ;
- N_{comp}^E : número de ciclos final no ensaio CHC correspondente ao ε_{vp}^E ;
- a_{total} : parâmetro de ajuste do modelo;
- ΔN_{refer} : número incremental de ciclos à curva de Referência; e
- ΔN_{comp} : número incremental de ciclos para o ensaio CHC.

Logo o número de ciclos reduzidos, N_{red} , pode ser expresso pela Equação 2.34.

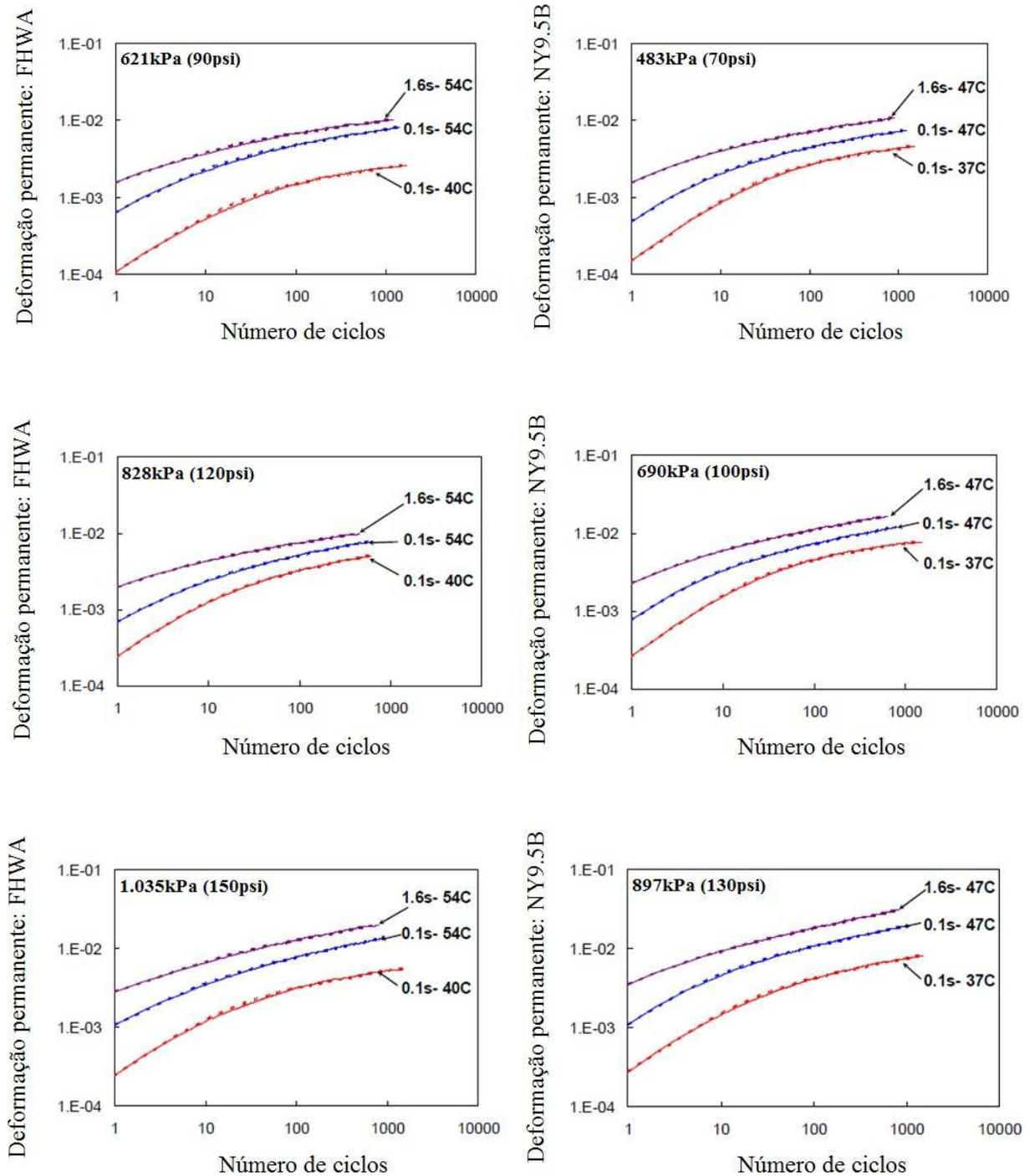
$$N_{red} = N \cdot 10^{a_{total}} \quad (2.34)$$

A partir do ajuste do modelo, a Equação 2.27 toma a forma da Equação 2.35.

$$\varepsilon_{vp} = \frac{A + BN_{red}}{(C + N_{red})^\alpha} \quad (2.35)$$

Após a realização dos ensaios, a calibração e a validação do modelo, obteve-se os resultados que constam na Figura 2.15. Note que cada gráfico apresenta uma condição de carregamento. Este modelo leva em consideração a combinação de cada condição de ensaio a fim de melhor representar as características do material quanto à deformação permanente. É possível observar que a curva tracejada (curva do *Shift Model*) coincide com aquela formada pela linha (curva do ensaio TRLPD), ou seja, o modelo possui acurácia satisfatória nos seus resultados.

Figura 2.15 - Resultados ajustados do *Shift Model*.



Fonte: Adaptada de Choi (2013).

Choi (2013) comenta que o principal objetivo do seu modelo e protocolo de ensaio é prever a deformação permanente nas camadas de pavimento asfáltico. O *Shift Model* foi implementado no programa LVECD (*Layered Viscoelastic Continuum Damage*), desenvolvido na Universidade Estadual da Carolina do Norte (NCSU), Estados Unidos. O LVECD avalia o

comportamento estrutural do pavimento por meio de elementos finitos. Este programa leva em consideração vários tipos de carregamento por eixo e mudanças climáticas. As entradas para análise são semelhantes as do MEPDG.

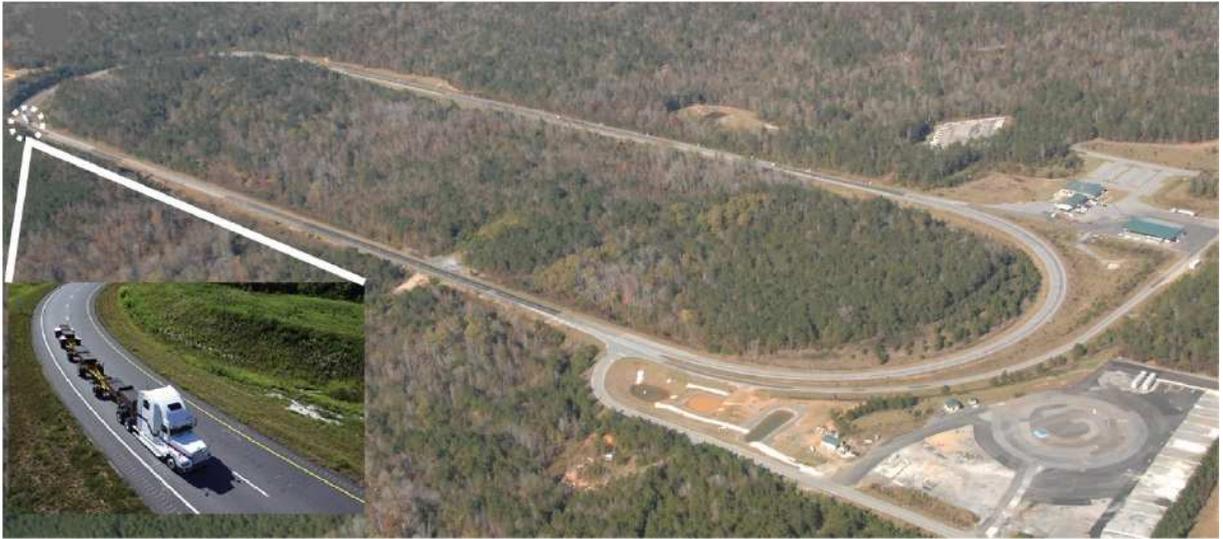
O *Shift Model* é capaz de prever o acúmulo de deformação permanente em camadas asfálticas, porém o efeito do fluxo de cisalhamento ocorrido em campo é pouco simulado nos ensaios TRLPD. Assim, para previsões melhores quanto à deformação permanente, o autor propôs a utilização de um fator de correção (ou também conhecido como função de transferência), o qual é utilizado para correlacionar resultados de laboratório com os medidos em campo para uma mesma mistura. Se o fator de correção for maior do que 1 (um) indica que a deformação permanente foi acelerada devido ao fluxo de cisalhamento excessivo, e para valores menores do que 1 (um) indica que a deformação permanente foi superestimada. A Equação 2.36 define o fator de correção (Choi, 2013).

$$\text{Fator de Correção} = \frac{AC\ Rut\ Depth|_{medido}}{AC\ Rut\ Depth|_{previsto}} \quad (2.36)$$

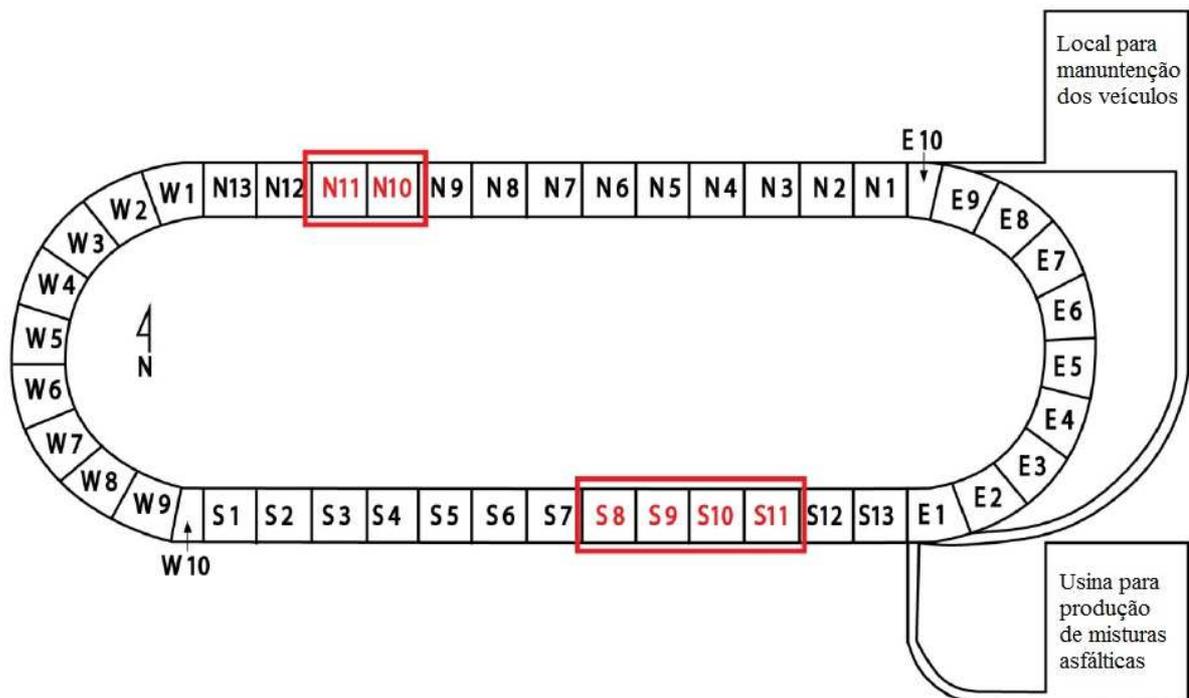
onde $AC\ Ruth\ Depth|_{medido}$: deformação permanente medida em campo; e
 $AC\ Ruth\ Depth|_{previsto}$: deformação permanente obtida em laboratório.

Em sua análise, Choi (2013) comparou resultados obtidos a partir do programa LVECD com aqueles medidos em campo. As misturas utilizadas fazem parte da pista de teste do NCAT (*National Center for Asphalt Technology*), localizada próximo à Universidade de Auburn em Opelika, Alabama, Estados Unidos. Este circuito de teste tem formato oval e possui 1,7 milhas (2.736km), sendo composto por 46 trechos experimentais cada um com 60m de comprimento. Dentre as 46 sessões da NCAT, o grupo de pavimentação da NCSU tem 6 (seis) trechos (N10, N11, S8, S9, S10, e S11). A Figura 2.16 (a) mostra a vista aérea e a (b) representa o esquema de divisão por trecho. Os trechos ressaltados são referentes às misturas estudadas pela NCSU. As misturas analisadas pertencem ao grupo de pavimentação da NCSU e estão representadas na Tabela 2.4.

Figura 2.16 - Pista de teste do NCAT: (a) vista aérea e (b) divisão da pista por trechos experimentais.



(a)



(b)

Fonte: Adaptada de Choi (2013).

Tabela 2.4 - Descrição das misturas por trecho experimental.

Código	Descrição	Número da seção
O	Mistura controle	S9
C	Superfície OGFC ⁽¹⁾ com Mistura controle	S8
FW	Mistura controle usando asfalto espuma	S10
AW	Mistura controle usando aditivo Advera	S11
R	Mistura com 50% de RAP ⁽²⁾	N10
RW	Mistura com 50% de RAP usando asfalto espuma	N11

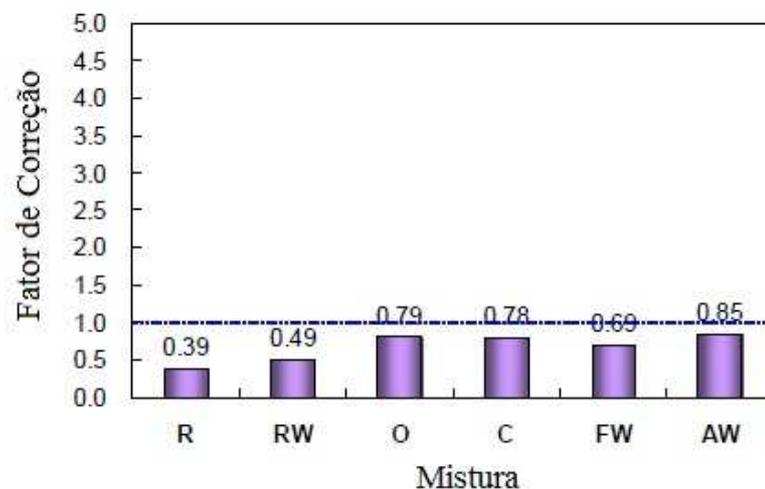
⁽¹⁾ *Open-graded friction course.*

⁽²⁾ *Reclaimed Asphalt Pavement.*

Fonte: LaCroix (2013).

Choi (2013) conclui que a utilização do *Shift Model* no programa LVECD é capaz de gerar valores de previsão quanto à deformação permanente em camadas asfálticas próximos aos valores medidos em campo, mesmo não considerando o efeito do fluxo de cisalhamento. Esta conclusão é fundamentada pelo autor a partir da comparação entre resultados de campo de e laboratório. A Figura 2.17 mostra os valores dos fatores de correção para as misturas descritas na Tabela 2.4, e pode-se observar que, em todos os casos, os valores de deformação permanente previstas são maiores do que os valores mensurados (fatores de correção < 1).

Figura 2.17 - Fatores de correção das misturas por trecho experimental.



Fonte: Adaptada de Choi (2013).

2.4 Módulo dinâmico ($|E^*|$)

O módulo dinâmico, ou valor absoluto do módulo complexo ($|E^*|$), é um parâmetro bastante utilizado para a avaliação da viscoelasticidade em misturas asfálticas. O ensaio para determinação do $|E^*|$ é normatizado entre outras pela especificação norte-americana ASTM D 3497 - 1979 (2003) - *Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Concrete Mixtures* - e pela francesa AFNOR NF P 98-260-2 (1992). Desde a década de 1960 este parâmetro vem sendo pesquisado como uma alternativa ao módulo de resiliência na caracterização de misturas asfálticas (Bernucci *et al.*, 2010).

No Brasil, a norma AASHTO T 342 - 11 (2011) - *Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)* - é a mais utilizada para obtenção do $|E^*|$, pois possibilita a construção de uma curva mestra mais suave, uma vez que estabelece um procedimento de ensaio com frequências que variam de 0,1; 0,5; 1,0; 5,0; 10 e 25Hz em temperaturas de -10; 4; 21; 37 e 54°C, enquanto que a norma da ASTM estabelece apenas três temperaturas de ensaio (5°C, 25°C e 40°C) e três frequências de carregamento (1Hz, 4Hz e 16Hz), tornando imprecisa a construção das curvas.

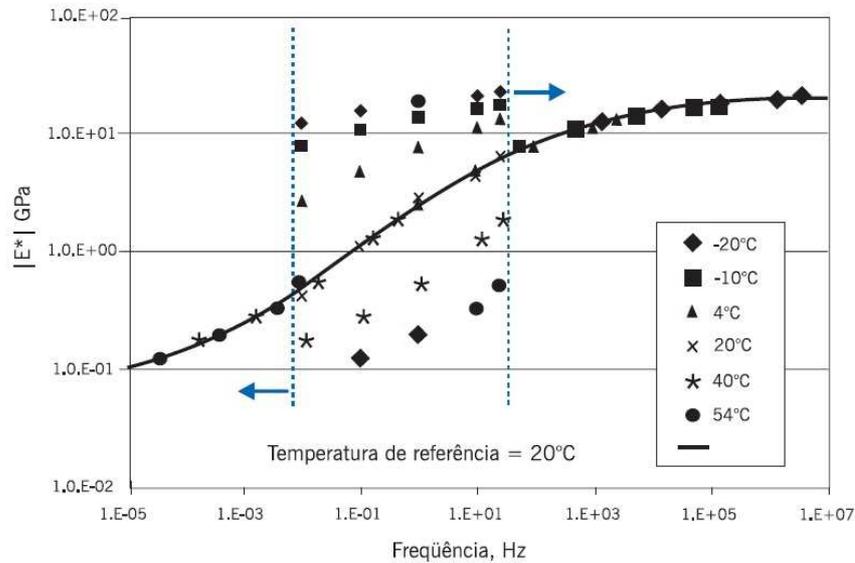
Matematicamente o $|E^*|$ pode ser definido conforme a Equação 2.37.

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (2.37)$$

onde σ_0 : amplitude máxima da tensão cíclica aplicada;
 ε_0 : deformação axial recuperável máxima.

A análise dos dados provenientes do ensaio de $|E^*|$ envolve a geração de curvas mestras. A curva mestra de uma mistura asfáltica permite que comparações sejam feitas sobre uma faixa de frequências e temperaturas, pois é construída utilizando-se o princípio da superposição tempo-temperatura. Este princípio permite que os dados coletados a diferentes temperaturas sejam deslocados horizontalmente relativamente a uma temperatura de referência como mostra a Figura 2.18 (Ferry, 1980).

Figura 2.18 - Curva mestra do módulo dinâmico.



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

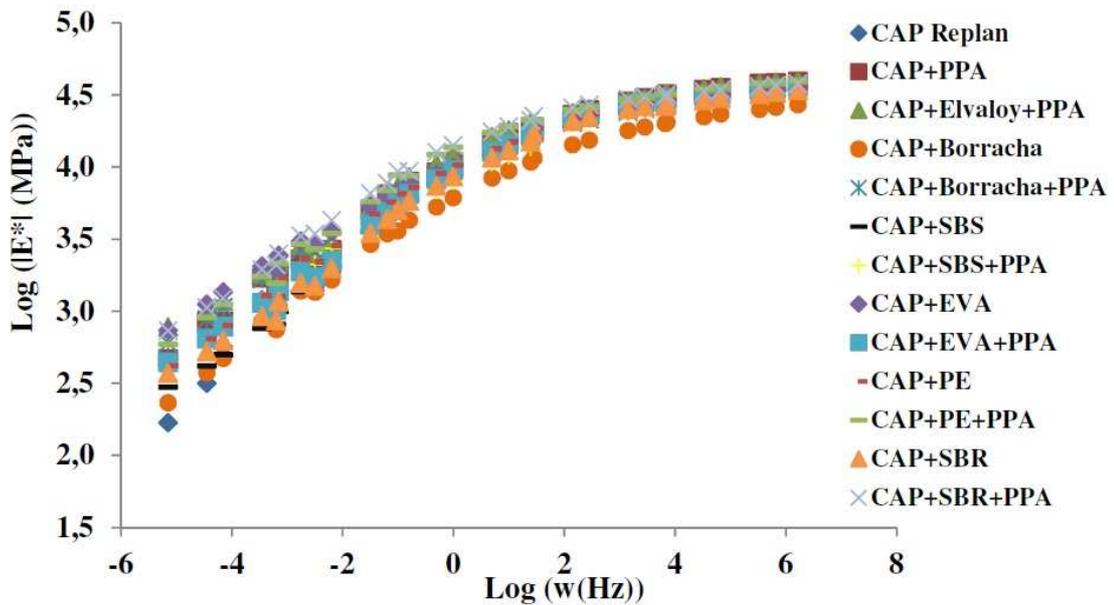
A importância de se considerar a viscoelasticidade das misturas, bem como a possibilidade de contabilizar os efeitos de diferentes temperaturas e frequências de carregamento, faz com que o $|E^*|$, venha sendo usado preferencialmente no exterior quando comparado a outros parâmetros de rigidez. O ensaio pode ser usado para determinar tanto as características elásticas quanto as propriedades viscoelásticas lineares do material (Christensen, 1982).

Babadopulos (2013) apresentou uma formulação simples para representação do comportamento viscoelástico linear de materiais asfálticos por meio de séries de Prony. No referido estudo foram avaliadas 26 misturas asfálticas levando em consideração o módulo dinâmico e o ângulo de fase das mesmas. O autor também apresentou uma maneira prática de estimar o ângulo de fase a partir de dados de $|E^*|$ em diferentes frequências, utilizando as aproximações sugeridas por Booij e Thoone (1982) (relações de Kramers-Kronig).

Onofre (2012) avaliou o comportamento de misturas asfálticas quanto à deformação permanente a partir dos ensaios de $|E^*|$. A fim de verificar a variação do comportamento destas variáveis para cada mistura, o autor utilizou dois tipos de agregados e dois diferentes ligantes modificados por sete tipos de polímeros, totalizando 17 misturas. A Figura 2.19 mostra o comportamento de curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura asfáltica contendo agregados de origem basáltica. PPA (ácido polifosfórico), SBS (Estireno Butadieno Estireno),

EVA (Etil Vinil Acetato), PE (polietileno), e SBR (Borracha de Butadieno Estireno) foram usados como modificadores dos ligantes.

Figura 2.19 - Curvas mestras do ensaio de módulo dinâmico para misturas com agregados de origem basáltica.



Fonte: Onofre (2012).

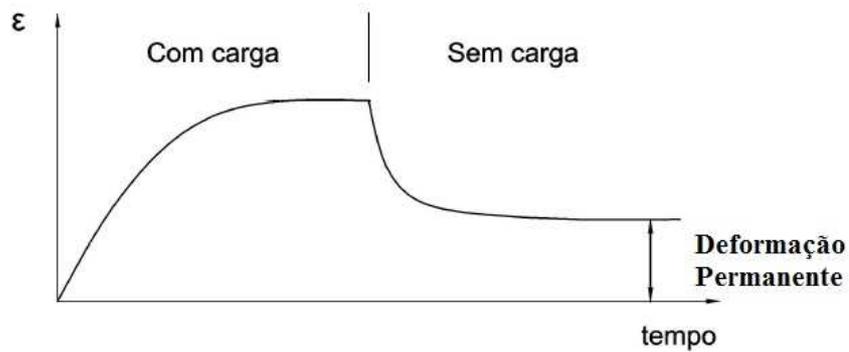
Conforme mencionado, o ensaio de $|E^*|$ é tradicionalmente usado para a caracterização da rigidez de misturas asfálticas. Contudo, o valor do $|E^*|$ relativo à temperatura de 54,4°C e à frequência de 5Hz pode ser utilizado para caracterizar misturas com relação à resistência à deformação permanente das mesmas (Witczak *et al.*, 2002). No referido trabalho o autor verificou que o $|E^*|$ se correlacionou bem com resultados de ATR (Afundamento de Trilha de Roda) de 16 trechos experimentais.

2.5 Creep estático

O ensaio de *creep* estático, ou simplesmente *creep*, passou a ser empregado em materiais asfálticos nos anos 70 pela Shell, e teve bastante aceitação devido à praticidade de preparação dos CP's e de condução do ensaio (Hill, 1973). O ensaio é realizado sob aplicação de carga estática e o resultado é descrito por uma curva de deformação permanente axial *versus*

o tempo de ensaio (Roberts *et al.*,1996). A Figura 2.20 mostra uma curva típica do ensaio de *creep* estático, incluindo a parte após o descarregamento.

Figura 2.20 - Curva típica de um ensaio de *creep* estático com recuperação.



Fonte: Adaptada de Roberts *et al.* (1996).

O ensaio pode ser conduzido de três maneiras diferentes em CP's cilíndricos, por exemplo, obtidos a partir das dimensões de CP Marshall, com diâmetro de 101,6mm (4") e espessura aproximada de 63,5mm (2,5"):

- a) aplicação de carga axialmente em CP sem confinamento;
- b) aplicação de carga axialmente em CP confinado; e
- c) aplicação de carga diametralmente por compressão diametral.

A Figura 2.21 ilustra a montagem de um equipamento para ensaio de *creep* com aplicação de carga axial no CP com dimensões Marshall. O ensaio de *creep* realizado nestas condições é normatizado pela ASTM D 2990 (2009) - *Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep - Rupture of Plastics*.

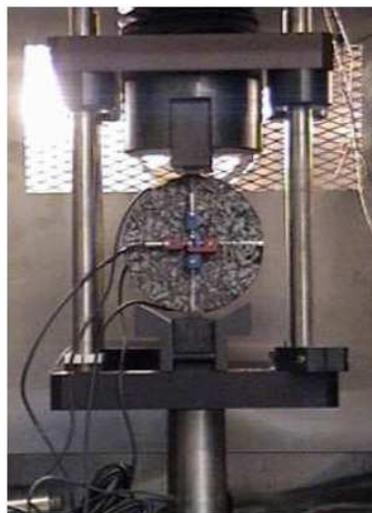
Figura 2.21 - Ensaio de *creep* com carregamento axial.



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

O ensaio de *creep* conduzido à tração por compressão diametral, ou simplificado chamado de *creep* estático por tração indireta é preconizado pela AASHTO T 322-07 (2011) - *Standard Method of Test for Determining the Creep Compliance and Strength of Hot-Mix Asphalt (HMA) Using the Indirect Tensile Test Device*. O ensaio de *creep* estático por tração indireta normalmente é aplicado para avaliar o potencial de trinca em misturas asfálticas para baixas temperaturas. A Figura 2.22 representa a configuração deste ensaio, no qual os LVDT's são locados no centro do CP que são moldados com diâmetro de $150 \pm 9\text{mm}$ e espessura entre 38 e 50mm.

Figura 2.22 - Ensaio de *creep* por tração indireta.



Fonte: Moura (2010).

Os ensaios de *creep* com carregamento axial em CP's confinados ou não confinados, sendo este último mais empregado, são aplicados para avaliar o potencial quanto à deformação permanente em misturas asfálticas (Roberts *et al.*, 1996). O ensaio de *creep* estático fornece o parâmetro de histórico de deformação ao longo do período de ensaio, ou seja, $\mathcal{E}(t)$. A partir deste parâmetro obtém-se a denominada função fluência (*creep compliance*), dada pela expressão 2.38.

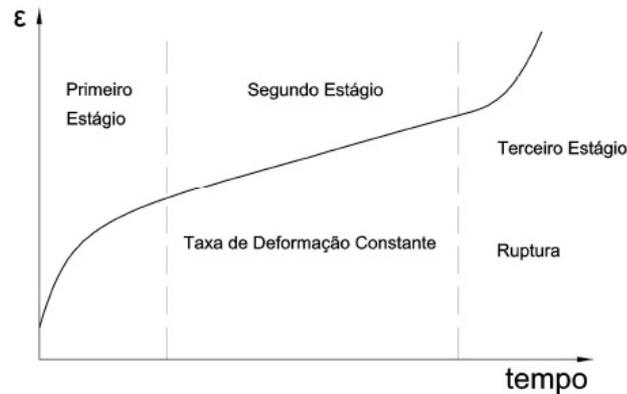
$$D(t) = \frac{\mathcal{E}(t)}{\sigma_0} \quad (2.38)$$

onde $D(t)$: função fluência; e
 σ_0 : tensão constante aplicada.

O comportamento quanto à função fluência no ensaio de *creep* estático é representado a partir de três estágios, conforme Figura 2.23 (Little *et al.*, 1993). No primeiro estágio é registrada uma velocidade de deformação elevada; no segundo estágio a taxa de deformação tende a ser constante e no terceiro estágio ocorre a falha. No último estágio a velocidade de deformação cresce rapidamente (Moura, 2010).

Little *et al.* (1993) e Nascimento (2008) comentam que o ponto inicial de deformação terciária é definido como *Flow Time* ou Tempo de Fluência, o qual tem sido um parâmetro significativo na avaliação do desempenho de misturas asfálticas em termos de deformação permanente. Tal tempo também é visto como o ponto mínimo da taxa de variação da fluência ao longo do ensaio e pode ser definido como o tempo em que o cisalhamento se dá a volume constante.

Figura 2.23 - Ensaio de *creep* estático com os três estágios de deformação por fluência.

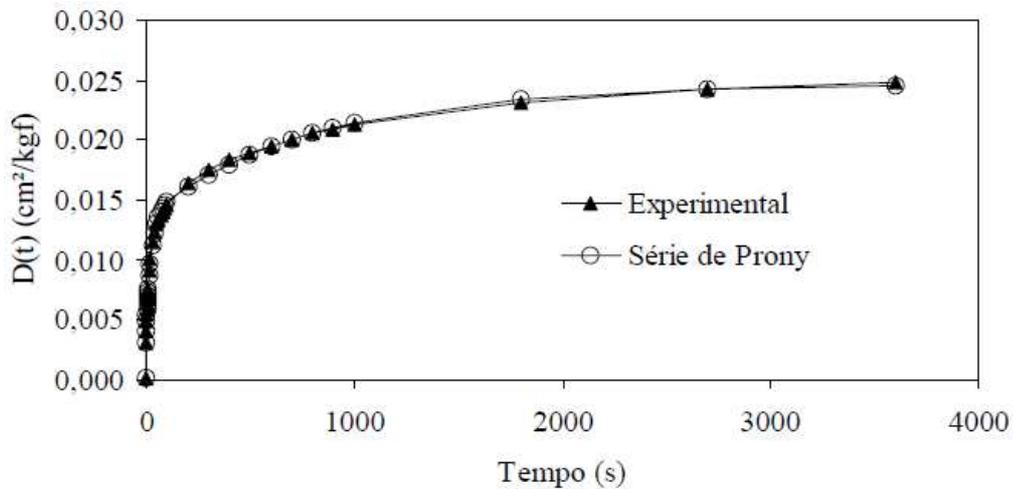


Fonte: Adaptada de Little *et al.* (1993).

Christensen (1982) comenta que na caracterização de materiais viscoelásticos, como as misturas asfálticas, é bastante conveniente utilizar a função fluência, $D(t)$, para análises que envolvem a relação tensão-deformação, visto que a resposta do material não depende apenas da carga, ou do deslocamento, aplicada no instante considerado, mas sim de todo o histórico da carga, ou de deslocamento. A função fluência é a recíproca do módulo em materiais elásticos. A principal vantagem do uso desta função na teoria da viscoelasticidade - viscoplasticidade é que este parâmetro permite a separação entre a parcela da deformação dependente do tempo daquela independente.

Souza e Soares (2002) avaliaram o comportamento viscoelástico em misturas asfálticas com base na teoria da viscoelasticidade linear sob condições isotérmicas a partir do ensaio de *creep* estático. Na Figura 2.24, nota-se que a curva experimental pode ser perfeitamente ajustada por uma série de Prony, que é uma série matemática muito utilizada para representar a função fluência de materiais viscoelásticos. Vale ressaltar que o *flow time* é parâmetro de análise para a deformação permanente, e a função fluência avalia o comportamento viscoelástico do material.

Figura 2.24 - Função fluência e respectivo ajuste para a série de Prony.



Fonte: Souza e Soares (2002).

Daniel e Kim (2002) apresentaram em detalhes um modelo para previsão de fadiga que utiliza parâmetros de regressão, onde séries de Prony, transformadas de Laplace, entre outros recursos matemáticos são utilizados para representar a função fluência de maneira mais complexa, tanto em carregamentos estáticos quanto em dinâmicos.

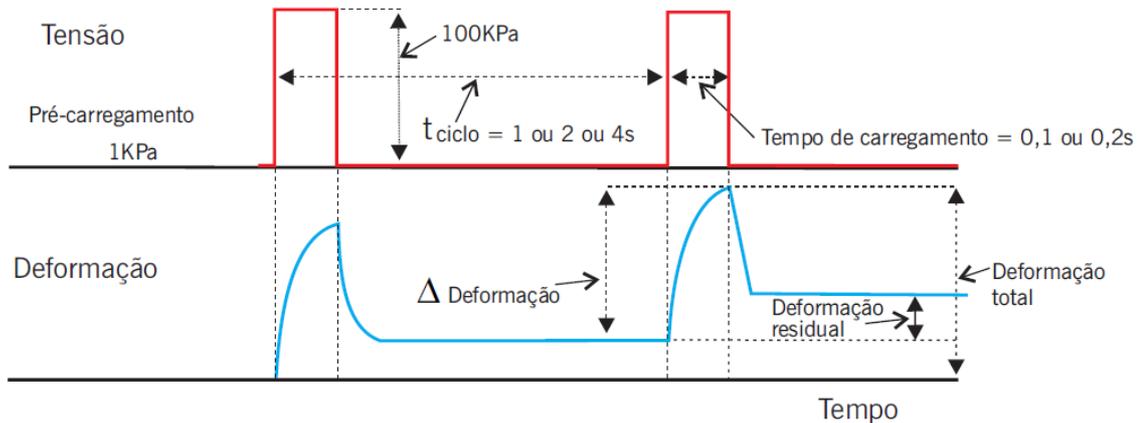
Sousa e Soares (2007) aplicaram e descreveram o método numérico da colocação aplicado aos ensaios de *creep* estático para obtenção de uma curva de ajuste, ou série de Prony, compatíveis com dados experimentais de caracterização viscoelástica. Os autores comentam que apesar da simplicidade, o método da colocação mostra resultados cujas correlações atingem valores muito próximos de um, ou seja, o método apresenta um bom ajuste e uma adequada representação do fenômeno físico. No referido trabalho é concluído que a utilização da Série de Prony é um vantajoso recurso para a compreensão do comportamento viscoelástico das misturas asfálticas e/ou ligantes asfálticos.

2.6 Creep dinâmico

O ensaio de *creep* dinâmico sem confinamento, também conhecido como ensaio uniaxial de carga repetida, consiste na aplicação de pulsos de carga ao CP, a uma determinada frequência, tempo de aplicação de carga e intervalo entre as aplicações da carga, a uma temperatura especificada. A Figura 2.25 mostra um exemplo de carregamento empregado no

ensaio em questão. Este ensaio tem como objetivo a medição da deformação permanente acumulada (Bernucci *et al.*, 2010).

Figura 2.25 - Carregamento e deformação no ensaio de *creep* dinâmico.



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

Durante a realização do ensaio, o CP é submetido à aplicação de uma carga de compressão axial transiente. Em geral, a seguinte combinação tem sido mais empregada: cada carregamento geralmente tem uma duração de 0,10 segundo e os intervalos entre as aplicações de carga são de 0,90 segundo, aplicados a uma frequência de 1Hz. O ensaio é realizado à temperatura de 60°C, e os CP's utilizados no ensaio devem ter $15\text{cm} \pm 0,25\text{cm}$ de altura e 10cm de diâmetro. A tensão aplicada em cada ciclo é de 204kPa.

O ensaio de *creep* dinâmico fornece o deslocamento permanente relativo ou a deformação relativa que é dada pela Equação 2.39.

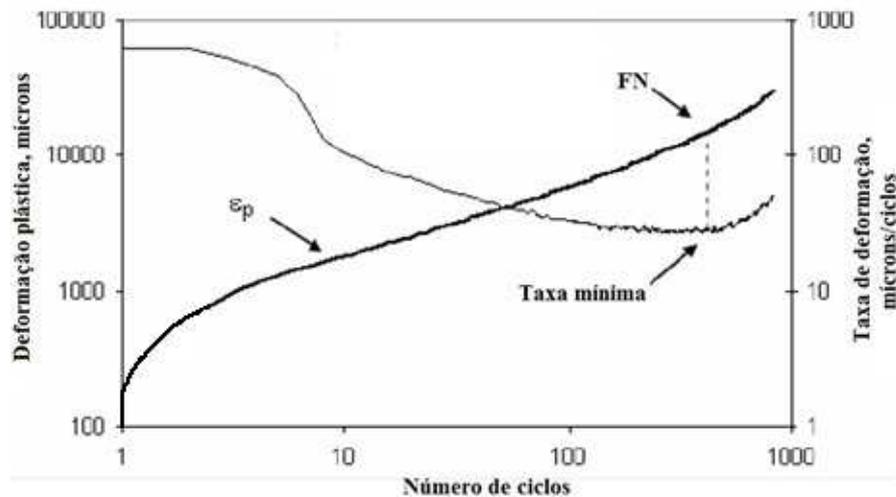
$$E_C(t) = \frac{\sigma}{\varepsilon_{rel}(t)} \quad (2.39)$$

onde $E_C(t)$: módulo de *creep* dinâmico;
 σ : amplitude da tensão aplicada; e
 $\varepsilon_{rel}(t)$: deslocamento relativo.

Durante o ensaio as amostras recebem um carregamento cíclico (semi-senoidal) mesmo durante o período de repouso, ou seja, a amostra continua recebendo uma compressão

de 5% do total da carga. A carga total de compressão é de 204kPa, e no período de repouso de 0,9s a carga cíclica atinge o valor de 5,2kPa. O ensaio é realizado a 60°C. O chamado FN, determinado nesse ensaio, é o número do ciclo em que a taxa de deformação plástica é mínima e a partir do qual o CP atinge a ruptura, conforme indicado na Figura 2.26 (Nascimento, 2008). O ensaio é finalizado em três situações: (i) quando o *flow number* é atingido, (ii) quando o ciclo de número 10.000 é atingido ou (iii) quando a mistura alcança 5% de deformação (Dongre *et al.*, 2009).

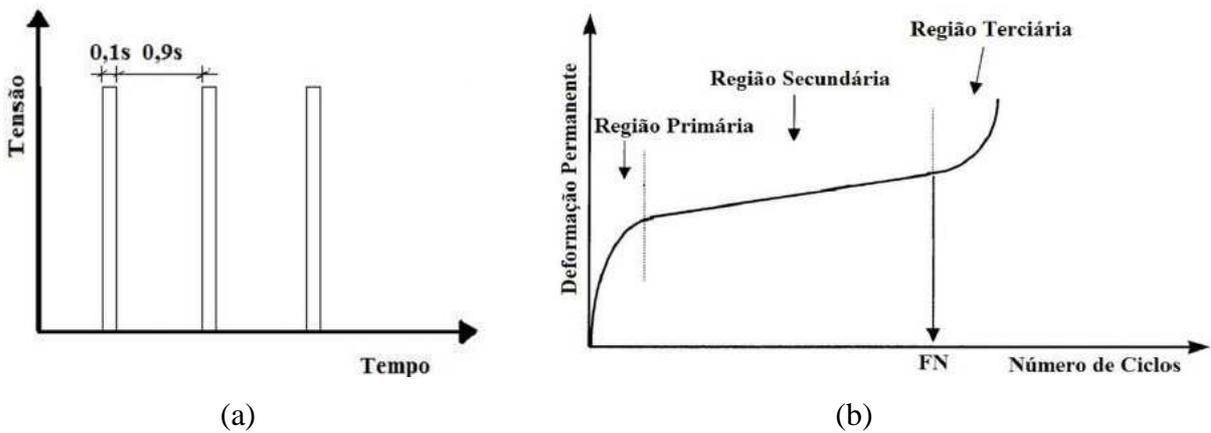
Figura 2.26 - Gráfico com a deformação plástica e a taxa de deformação plástica ao longo do ensaio de *creep* dinâmico, com a identificação do FN.



Fonte: Nascimento (2008).

O ensaio de *creep* dinâmico apresenta curva característica semelhante à curva de ensaio do *creep* estático, diferenciando-se quanto ao surgimento do FN. A Figura 2.27 (a) mostra a aplicação do carregamento durante o ensaio e a Figura 2.27 (b) o ponto em que o FN é atingido. Observa-se na Figura 2.27 (b) que há três regiões de deformação durante o ensaio: (i) região primária, em que a densificação da amostra ensaiada ocorre a uma taxa elevada, (ii) região secundária, em que a taxa de deformação é praticamente constante e (iii) região terciária, que é a região em que a amostra rompe. A partir do ciclo onde o FN é identificado, na fronteira entre as regiões secundária e terciária, a deformação ocorre a volume constante e a taxa de deformação volta a crescer, visto que a amostra não oferece mais tanta resistência ao carregamento (Onofre, 2012).

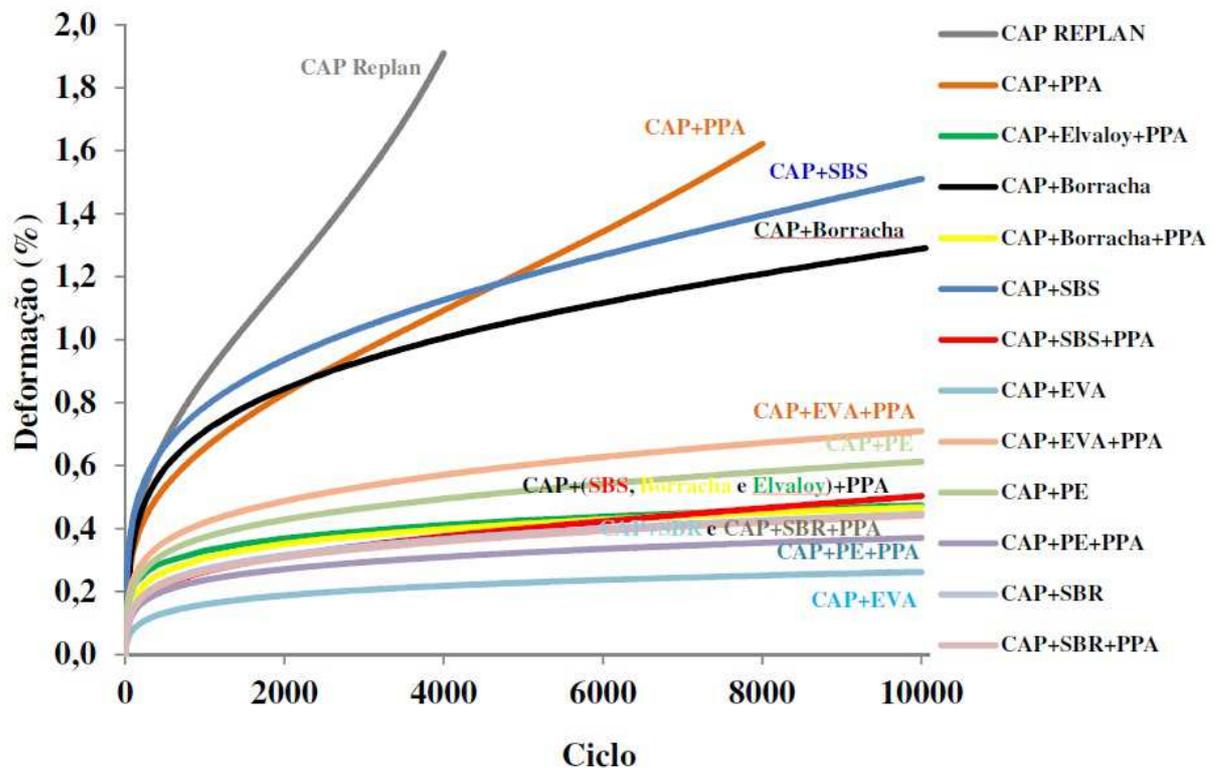
Figura 2.27 - (a) Aplicação de tensão durante o ensaio uniaxial de carga repetida e (b) deformação permanente durante o ensaio de *creep* dinâmico e obtenção do FN.



Fonte: Onofre (2012).

Onofre (2012) concluiu que das 17 misturas asfálticas contendo agregados de origem basáltica, as que tinham ligantes asfálticos modificados proporcionaram aumento da resistência à deformação permanente quando comparadas às misturas preparadas com o CAP Replan, todas as misturas foram avaliadas pelo ensaio de *creep* dinâmico (Figura 2.28). Dentre as misturas confeccionadas com agregados basálticos, aquelas contendo os ligantes CAP Replan e CAP + PPA foram as únicas a atingir o FN antes dos 10.000 ciclos de ensaio. Isto significa que estas são as misturas menos resistentes à deformação permanente dentre todas as avaliadas.

Figura 2.28 - Resultados do ensaio de *creep* dinâmico para todas as misturas com agregados de origem basáltica.



Fonte: Onofre (2012).

2.7 Ensaio *Triaxial Repeated Load Permanent Deformation*

O TRLPD (*Triaxial Repeated Load Permanent Deformation Test*) é definido como um ensaio de compressão cíclica sob pressão confinante constante que emprega um pulso de carga semi-senoidal seguido por um período de repouso. Os resultados (deformação permanente e número de ciclos) do referido ensaio são usados como *input* em vários modelos de deformação permanente (Gibson, 2006; Yun, 2008; Subramanian, 2011; Choi, 2013). A fim de obter as deformações permanentes, a mistura passa por 100 segundos de período de repouso, e então as deformações são medidas. O ensaio geralmente mantém uma amplitude constante da carga cíclica, porém as condições como período de repouso e tensão desvio podem sofrer variações (Choi, 2013).

O ensaio em questão tem como objetivo correlacionar o desempenho da mistura em campo com o seu comportamento em laboratório. Portanto, fornece características como tensão e condições ambientais encontradas em campo: condições climáticas (temperatura), nível de tráfego (número de repetições de carga e taxa de carregamento), e os níveis de deformação.

Estes fatores devem ser considerados para qualquer ensaio de desempenho com o objetivo de simular ou se aproximar das condições de campo (Kaloush, 2001).

Witczak *et al.* (2002), por meio do protocolo NCHRP *Report* 465, apresentaram o procedimento de aplicação das condições do ensaio com a finalidade de avaliar o potencial quanto à deformação permanente das misturas asfálticas. De acordo com este protocolo, uma temperatura efetiva (que é um índice experimental do grau de sensação térmica dos indivíduos quando expostos a diferentes combinações de temperatura, umidade e movimento do ar) do pavimento cobre uma faixa entre 25° a 60°C, aproximadamente. O nível de tensão desvio (que é a tensão que atua axialmente no CP) está entre 69 a 207kPa (10 a 30psi) para o ensaio não confinado e entre 483 a 276kPa (70 a 40psi) para o ensaio confinado. A pressão de confinamento assume valores entre 35 a 207kPa (5 a 30psi).

De Beer *et al.* (1997) comentam que em condições de tráfego livre e assumindo um carregamento de 18kN, a distribuição da pressão de contato assume valores de 60psi (414kPa) a 120psi (828kPa). Choi (2013) afirma que a tensão desvio está relacionada diretamente a pressão de contato entre o pneu e o pavimento. Esta pressão depende de muitos fatores, tais como o tipo de pneu, a estrutura do pneu, e as condições de carregamento, o autor também avalia que níveis de tensão menores do que 70psi (483kPa) produzem valores muito baixos de deformação permanente.

Gibson *et al.* (2009) apresentaram um método para avaliar a presença da pressão de confinamento e tensão desvio nas estruturas do pavimento. O método consiste em duas etapas de análise numérica. Na primeira etapa é realizada uma análise elástica das camadas por meio do *software* KENLAYER para calcular a distribuição elástica de tensões em uma estrutura simples do pavimento. Na segunda etapa, esta distribuição de tensão é combinada com um avançado modelo viscoplástico tridimensional, para prever a distribuição de deformação volumétrica para estruturas de pavimento. Este modelo viscoplástico tridimensional foi desenvolvido por Gibson e Schwartz (2006), e é representado pela Equação 2.40. O local crítico para deformação permanente está identificado pela localização da região volumétrica de maior deformação viscoplástica. A Figura 2.29 mostra a área crítica encontrada no limite exterior do carregamento da roda, e a uma profundidade aproximadamente igual à zona do bulbo de cisalhamento da estrutura. Na área crítica o estado de tensão encontrado corresponde a uma pressão de confinamento de 69kPa (10psi) e uma tensão desvio de 518kPa (75psi).

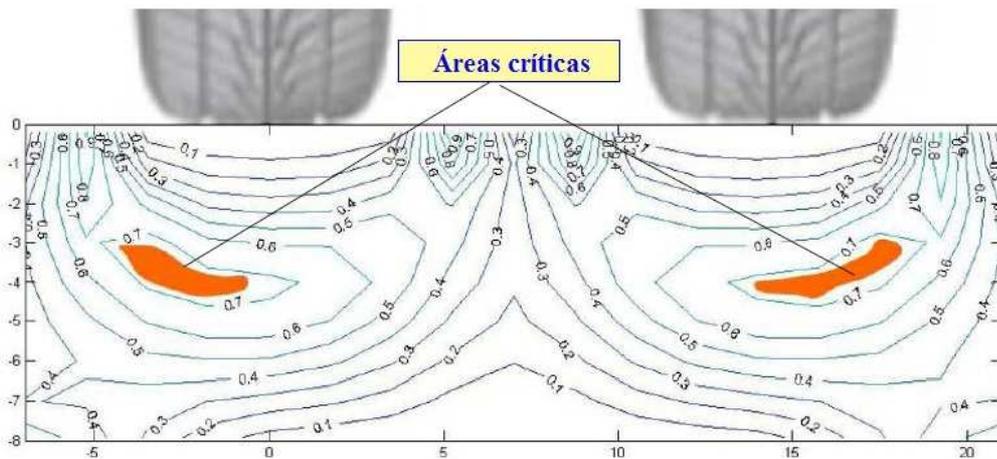
$$\mathcal{E}_{VPvolumetric} = \mathcal{E}_{1VP}(t) + \mathcal{E}_{2VP}(t) + \mathcal{E}_{3VP}(t), \quad (2.40)$$

$(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3),$

$\mathcal{E}_{1VP}(t), \mathcal{E}_{2VP}(t), \mathcal{E}_{3VP}(t)$

onde $\mathcal{E}_{VPvolumetric}$: deformação viscoplástica volumétrica;
 $\mathcal{E}_{1VP}(t)$: deformação viscoplástica no eixo x;
 $\mathcal{E}_{2VP}(t)$: deformação viscoplástica no eixo y; e
 $\mathcal{E}_{3VP}(t)$: deformação viscoplástica no eixo z.

Figura 2.29 - Distribuição volumétrica de deformação viscoplástica.

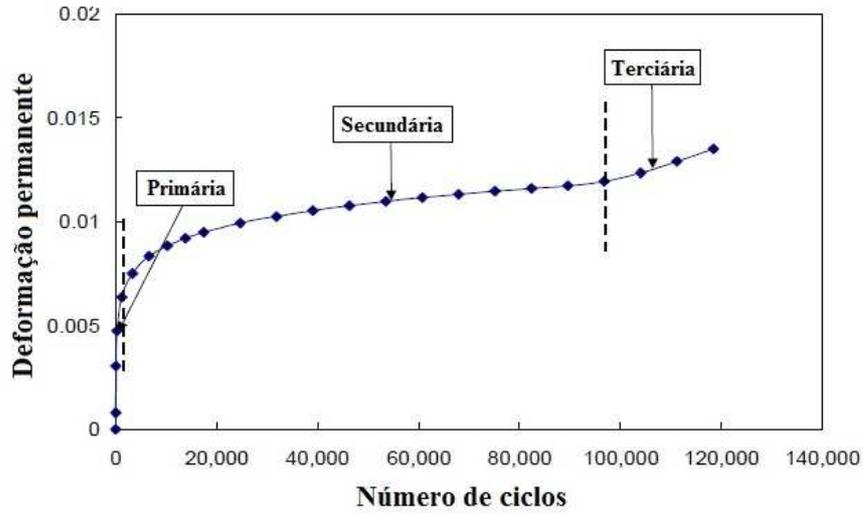


Fonte: Adaptada de Gibson *et al.* (2009).

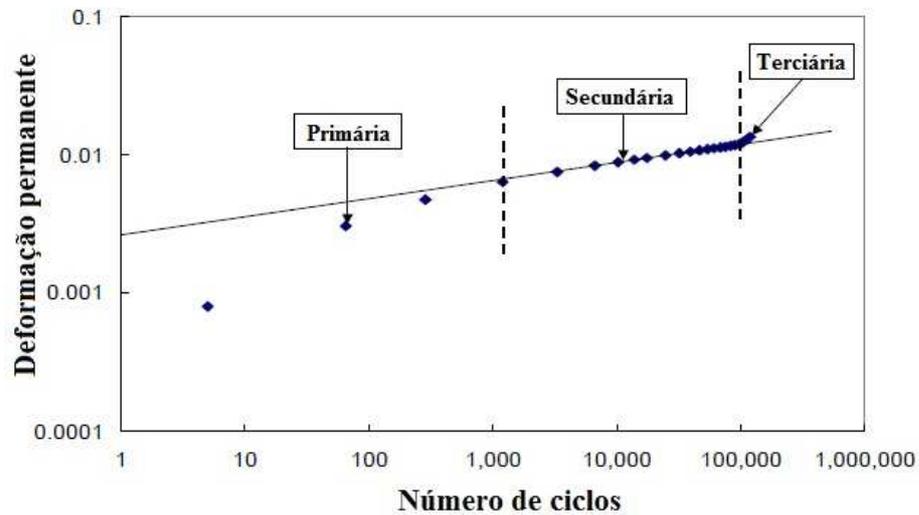
A Figura 2.30 mostra a típica relação entre a deformação permanente total acumulada e o número total de ciclos de um ensaio confinado (pressão de confinamento de 69kPa ou 10psi) em escala normal, 2.30 (a), e logarítmica, 2.30 (b), respectivamente. Na Figura 2.30 (a) existem três zonas - primária, secundária e terciária - que são delineadas ao longo da curva de deformação permanente acumulada. Na primeira zona, a deformação é acumulada rapidamente, e na zona secundária o incremento de deformação permanente cresce em valor constante. E, por fim, na zona terciária cresce o incremento de deformação permanente, e as deformações se acumulam rapidamente. Ou seja, a curva do resultado não muda, em forma,

com relação a um ensaio de *creep* dinâmico, conforme indicado na Figura 2.27 (b), ou ao *creep* estático, de acordo com a Figura 2.23.

Figura 2.30 - Relação entre deformação permanente total acumulada e número de ciclos de carregamento. Ensaio confinado: (a) escala aritmética e (b) escala log-log.



(a)



(b)

Fonte: Adaptada de Lee (2007).

Como já mencionado, o número de ciclos no qual a zona terciária é iniciada é conhecido como FN. É importante observar que a estabilidade do número de ciclos na zona secundária sob condições padrão de carregamento axial reflete um bom indicador de resistência

quanto à deformação permanente. O termo *flow number* também é usado para indicar este número de ciclos no ensaio confinado (TRLPD).

Lee (2007) mostra que na Figura 2.29(b) o trecho linear no meio da curva pode ser expresso por um modelo de potência do tipo $\varepsilon_p = aN^b$, onde a e b são parâmetros de regressão. O intercepto a representa a deformação permanente a $N = 1$, e a inclinação b representa uma taxa de mudança em $\log(\varepsilon_p)$ como sendo função de mudança em $\log(N)$.

2.8 Variáveis de densificação CDI, TDI e TDI_m

O *Strategic Highway Research Program* (SHRP) foi um dos principais colaboradores para o uso do Compactador Giratório Superpave (CGS), por meio do seu programa de dosagem Superpave - *Superior Performing Asphalt Pavements*, criado em 1987 (Dantas, 2013). O CGS, desenvolvido no início dos anos 90 como parte do programa SHRP, é a soma do compactador desenvolvido no estado do Texas em 1946 e do equipamento giratório do LCPC (*Laboratoire Central des Pontes et Chaussées*) francês desenvolvido em 1968. A avaliação da compactação de misturas asfálticas com o CGS envolve parâmetros volumétricos como: densidade, volume de vazios, vazios dos agregados minerais, relação betume vazios e vazios com betume. O equipamento fixa três parâmetros: ângulo de compactação de 1,25°; pressão de compactação de 0,6MPa e velocidade de giro de 30RPM (Leahy e McGennis, 1999).

O CGS foi idealizado com o objetivo de simular melhor a compactação em campo, assim como a degradação dos agregados causada pela produção, compactação e carregamento do tráfego ao longo dos anos (Harman *et al.*, 2002). Por estas razões, e principalmente pelo histórico de sucesso, o CGS tornou-se a maneira mais eficiente de compactar misturas asfálticas nos Estados Unidos, e vem sendo utilizado com sucesso também no Brasil por universidades e centros de pesquisa, além de concessionárias. A utilização do CGS é regulamentada pelas especificações AASHTO T 312 (2012) - *Standard Method of Test for Preparing and Determining the Density of Hot-Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor*, e pela ASTM D6925 (2009) - *Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor*.

Diferente da metodologia de dosagem Marshall adotada no Brasil, a metodologia Superpave recomenda uma zona de restrição por onde as curvas granulométricas não devem

passar, reduzindo assim o percentual de material fino, o que ajuda a combater o efeito da deformação permanente nas misturas asfálticas. Chowdhury *et al.* (2001) estudaram quatro tipos de agregados com origens mineralógicas distintas (granito, calcário, cascalho siliceous e areia natural), e todos com Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 19,0mm. Os autores avaliaram três diferentes curvas granulométricas: acima, através e abaixo da zona de restrição. Os resultados foram obtidos por meio do PURWheel que é um simulador de tráfego em escala de laboratório, desenvolvido na Universidade de Purdue, Estados Unidos, e também utilizaram o APT (*Accelerated Pavement Test*), um simulador de tráfego em escala de campo. Os pesquisadores concluíram que agregados britados não apresentam misturas susceptíveis à deformação permanente, mesmo que a graduação atravesse a zona de restrição, e recomendam que esta zona possa ser removida da metodologia Superpave.

Aragão *et al.* (2007) estudaram misturas cujas curvas granulométricas passavam acima, abaixo e pela zona de restrição. Na referida pesquisa os autores avaliaram a previsão quanto à deformação permanente a partir do simulador do tipo APA e das variáveis de densificação CDI (*Compaction Densification Index*) e TDI (*Traffic Densification Index*). As misturas que passaram acima e abaixo apresentaram comportamento melhor e pior respectivamente, quando comparadas às misturas que passaram por esta zona. No referido estudo não ficou especificado o motivo desse comportamento.

Mahmoud e Bahia (2004) avaliam que o CGS passou a ser o principal componente da metodologia de dosagem do Superpave, e que seu uso atual é amplamente entendido. Logo, acredita-se que uma correta interpretação dos dados oriundos da compactação giratória possa levar ao estabelecimento de parâmetros mecânicos que possam servir de suplemento à atual dosagem puramente volumétrica. Assim, foram propostos alguns índices obtidos das curvas de compactação giratória, entre eles o *Compaction Densification Index* (CDI), *Traffic Densification Index* (TDI), *Compaction Force Index* (CFI) e o *Traffic Force Index* (TFI).

Nascimento (2008) conceitua a seguir os índices CDI, TDI e TDI_m:

- a) CDI - é definido como a área a partir do oitavo giro (N=8) até 92% da G_{mm} (Massa Específica Máxima Medida) na curva de densificação obtida com o CGS. Em teoria, esta área seria proporcional ao trabalho aplicado pelo rolos compactadores para as misturas atingirem a densidade requerida durante a construção;

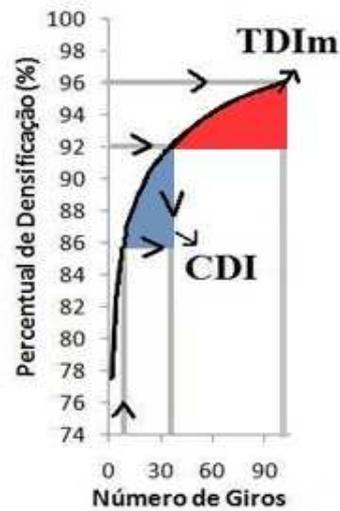
O número de 8 giros é selecionado para simular o esforço aplicado por uma vibroacabadora típica durante o processo de espalhamento do material em pista, enquanto que 92% da G_{mm} refere-se à densidade da mistura ao final do processo de construção, quando a mesma é aberta ao tráfego de veículos, de acordo com as especificações do *Wisconsin Department of Transportation* (WisDOT). Assim, misturas com valores ideais de CDI (no máximo 250, 300 e 400 respectivamente para tráfego leve, médio e pesado) têm melhor compactabilidade - o que é desejável; enquanto que misturas com valores de CDI baixos têm problemas de estabilidade e devem ser evitadas (Nascimento, 2008).

- b) TDI - é definido como sendo a área sob a curva de densificação a partir de 92% da G_{mm} até 98% da mesma. Baseia-se no princípio de que o pavimento após aberto ao tráfego, em princípio com 92% da G_{mm} , continua a densificar-se em função das cargas impostas pelos veículos; e
- c) TDI_m - parâmetro desenvolvido por Nascimento (2008), e definido como sendo o valor da área sob a curva de densificação entre N_{LP} (número de giros no *Locking Point*, definido a seguir) e 96% da G_{mm} . Esse parâmetro foi desenvolvido para que os CP's produzidos não fossem descartados devido ao alto percentual de densificação que ocorre para a obtenção do TDI.

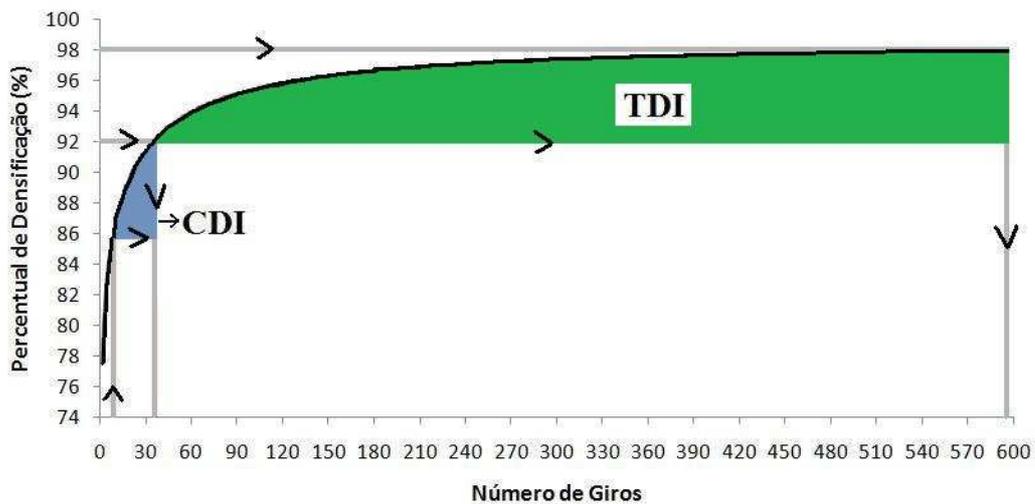
Nascimento (2008) define o N_{LP} como sendo o giro em que o esqueleto pétreo intertrava-se, a partir do qual o processo de compactação resulta na degradação dos agregados e pouca densificação adicional, estando correlacionado com o processo construtivo de campo. Esse conceito foi desenvolvido a partir da comparação de dados de misturas Marshall e Superpave com as observações das respectivas compactações em campo, coletados durante 3 anos.

A Figura 2.31 (a) representa graficamente a determinação do índice TDM_m , e a Figura 2.31 (b) representa a determinação dos índices CDI e TDI, a partir da curva de compactação Superpave.

Figura 2.31 - Determinação das variáveis: (a) TDI_m , e (b) CDI e TDI.



(a)

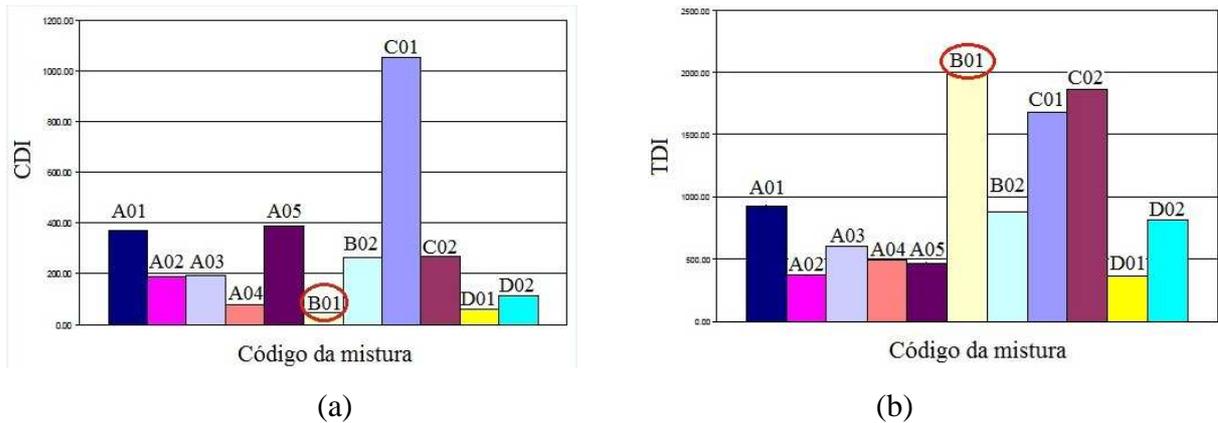


(b)

Fonte: Autor deste trabalho.

Mahmoud e Bahia (2004) realizaram um estudo estatístico para comparar os valores das variáveis de densificação CDI e TDI com os resultados de FN. Os autores obtiveram um R^2 da ordem de 0,80, concluindo que a variável TDI apresenta potencial para diferenciar misturas quanto à resistência à deformação permanente. Assim, quanto maior o FN, maior deve ser o valor do TDI. As Figuras 2.32 (a) e (b) mostram respectivamente alguns valores de CDI e TDI encontrados pelos referidos pesquisadores.

Figura 2.32 - Média de valores das variáveis: (a) CDI e (b) TDI.



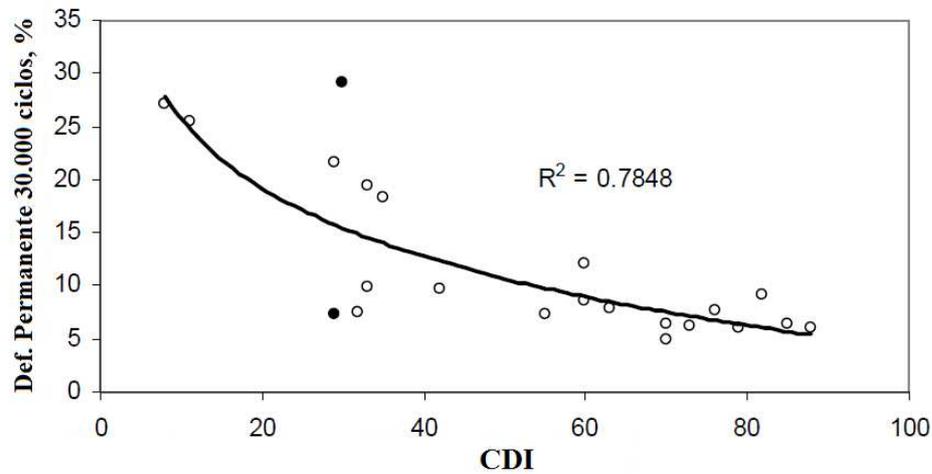
Fonte: Adaptada de Mahmoud e Bahia (2004).

A mistura B01, destacada na Figura 2.32, apresenta os melhores resultados em relação à deformação permanente e à compactação, pois possui o maior valor de TDI e baixo valor de CDI. Misturas com altos valores de TDI tendem a possuir forte resistência à deformação permanente impostas pelo tráfego, o que dificulta o processo de deformação permanente no revestimento asfáltico, enquanto que misturas com baixos valores de CDI apresentam facilidade de execução em campo devido à necessidade de uma baixa energia de compactação.

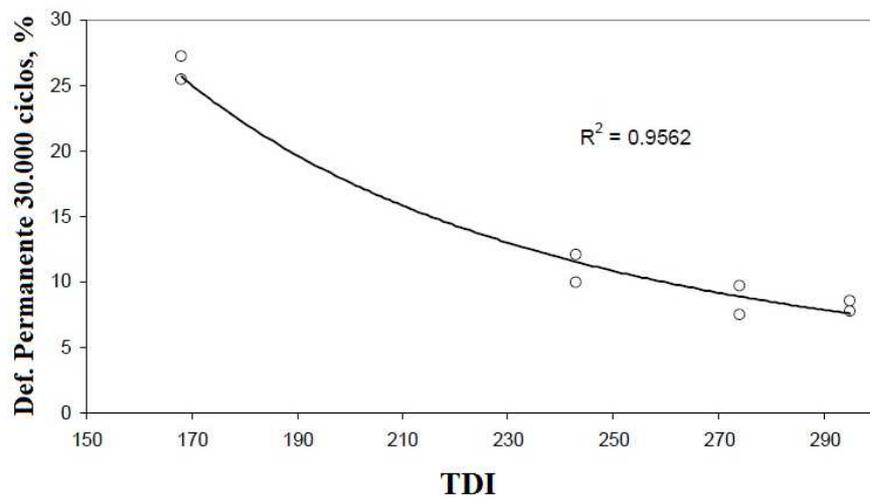
Onofre (2012) comenta que um baixo valor de CDI pode não ser vantajoso, pois pode ser um indicador de agregados com baixa angularidade e textura lisa, o que é um fator negativo na determinação da resistência à deformação permanente. Assim como um alto valor de TDI pode estar associado ao intertravamento, à textura, à forma, ou à angularidade dos agregados.

Nascimento (2008) correlacionou os valores de CDI e TDI com os resultados do ensaio do simulador de tráfego francês do tipo LCPC a 30.000 ciclos, e observou que misturas com baixos valores de CDI (menores do que 50) podem possuir também baixa resistência à deformação permanente e recomenda valores para TDI maiores do que 250 para tráfego médio e maiores do que 400 para tráfego pesado, conforme a Figura 2.33 (a) e (b).

Figura 2.33 - Correlação da deformação permanente no simulador francês após 30.000 ciclos com as variáveis: (a) CDI e (b) TDI.



(a)



(b)

Fonte: Nascimento (2008).

Bahia e Faheem (2007) sugeriram critérios para as variáveis de densificação TDI e CDI. Com base nesses critérios é possível extrair, não só informações relativas à volumetria das misturas, mas também relativas à estabilidade mecânica e à trabalhabilidade das mesmas. Foram propostos limites para os valores de TDI e de CDI para serem adotados na dosagem de misturas asfálticas, conforme Tabela 2.5. Estes valores foram obtidos em laboratório, o que torna a validação em campo necessária.

Tabela 2.5 - Critérios de dosagem baseados nas variáveis de densificação CDI e TDI.

Tráfego	Trabalhabilidade	Resistência à deformação permanente
	CDI máximo	TDI mínimo
Leve ($N < 3,0 \times 10^6$)	100	400
Médio ($3,0 \times 10^6 < N < 1,0 \times 10^7$)	200	800
Médio a pesado ($1,0 \times 10^7 < N < 3,0 \times 10^7$)	300	1200

Fonte: Bahia e Faheem (2007).

Onofre (2012) avaliou as variáveis de densificação CDI e TDI_m para 13 misturas asfálticas contendo agregados de origem basáltica, e observou que todas as misturas avaliadas possuem a mesma tendência, ou seja, o valor de CDI ser inferior ao valor de TDI_m . Além disso, o valor de CDI de cada mistura se aproximou do seu respectivo valor de TDI_m . Logo, é provável que se uma mistura é muito trabalhável (baixo CDI), esta também terá baixa resistência à deformação permanente (baixo TDI_m) e vice-versa. Também comprovou que, para as misturas avaliadas, não há uma mistura ideal, que possua ao mesmo tempo um baixo valor de CDI e um alto valor de TDI_m . As misturas com os teores mais baixos de ligante (CAP Replan com 4,4% e CAP + PPA com 4,7%) são as que apresentam maiores valores de CDI e que a mistura com o maior teor de ligante (CAP + Borracha com 5,5%) é a que apresenta o menor valor de CDI. No referido trabalho, o autor também concluiu que mistura com menor teor de ligante torna-se mais difícil de ser compactada, já que possui uma trabalhabilidade reduzida em função desse baixo teor. Analogamente, uma mistura com um teor maior de ligante possui maior facilidade para ser compactada devido a maior trabalhabilidade conferida a mesma por essa quantidade de ligante.

2.9 Ensaio por simuladores de tráfego

Outra forma para determinação e avaliação da deformação permanente em laboratório é por meio do uso de equipamentos simuladores de tráfego. Por questões de completude de revisão os mesmos são incluídos brevemente nesta seção.

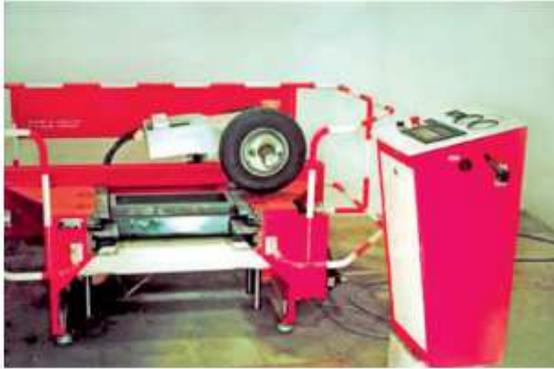
Existem diversos tipos de simuladores tanto em laboratório como em escala real, os quais são representados por veículos. Os simuladores são equipamentos que permitem uma investigação mais próxima da realidade, no entanto, em geral acarretam a necessidade do uso de fatores laboratório-campo para previsões de deformação permanente *in situ* ou do estabelecimento de limites de deformação permanente em laboratório por análises empíricas de resultados em campo (Bernucci *et al.*, 2010).

O Brasil possuía até pouco tempo quatro simuladores de laboratório em operação: dois franceses desenvolvidos pelo LCPC - um no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da USP e outro no Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Petrobras - Cenpes; um equipamento similar ao do LCPC desenvolvido pelo Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da UFC em parceria com a iniciativa privada, denominado SISTRAN; e um norte-americano, APA (*Asphalt Pavement Analyzer*), em operação no Laboratório Central da Petrobras Distribuidora (Nascimento *et al.*, 2008; Bernucci *et al.*, 2010). Hoje, já se conta ainda com o equipamento *Hamburg Wheel Test* em empresas privadas ligadas a concessionárias. Esses diversos equipamentos são brevemente descritos a seguir. Mais recentemente foi desenvolvido o simulador CS-CDT (Compactador - Simulador do Centro de Desenvolvimento Tecnológico) pelo grupo ARTERIS em 2014

Simulador francês do tipo LCPC

O ensaio de simulação de tráfego do tipo LCPC é normatizado pelas especificações francesas NF EN 12697-22 (AFNOR, 2004) e NF EN 12697-33 (AFNOR, 2004). No conjunto de equipamentos francês do LCPC, a mistura asfáltica tem forma de placa com 50cm de comprimento, 18cm de largura e 50 ou 100mm de espessura. Uma pneu com pressão de 600kPa \pm 30 aplica uma força regulável de 5.000N \pm 50 entre 5.000 e 30.000 ciclos. A temperatura no ensaio é de 60°C. O conjunto do equipamento LCPC é indicado na Figura 2.34, onde: (a) representa a mesa compactadora LCPC de placas de misturas asfálticas; (b) mostra uma placa de misturas asfálticas compactada; (c) representa o simulador de tráfego do tipo LCPC, e (d) apresenta uma placa após ensaio de deformação permanente.

Figura 2.34 - Conjunto de mesa compactadora e simulador de tráfego LCPC para ensaios de deformação permanente em laboratório.



(a)



(b)



(c)

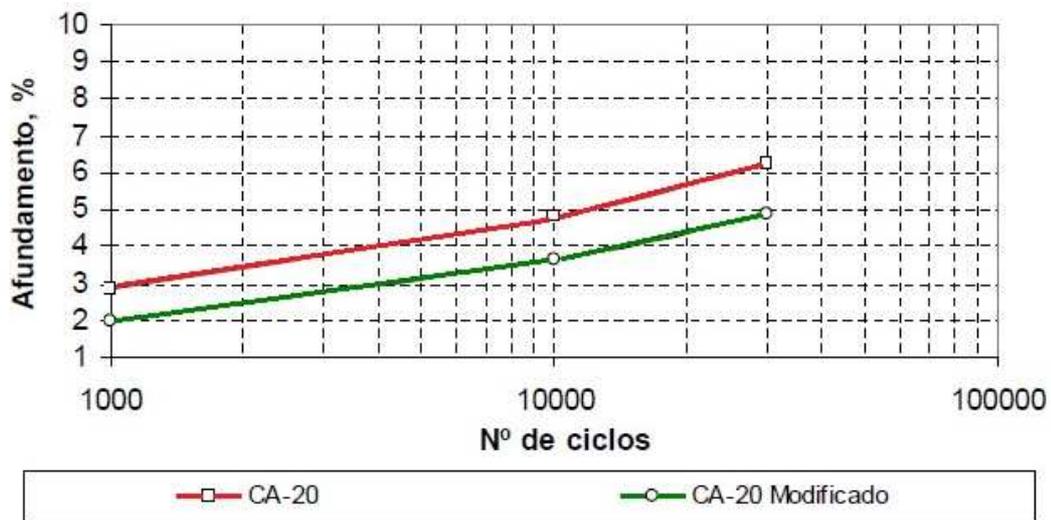


(d)

Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

A Figura 2.35 apresenta curvas de ensaio para duas misturas asfálticas de mesma granulometria, densa com TMN de 12,5mm, porém com diferentes ligantes asfálticos: um CA-20 puro e o outro modificado por aditivo químico, ambos oriundos da Petrobras Argentina (PESA). Logo a mistura que foi modificada por polímero apresentou, para o mesmo número de ciclos, um valor de deformação inferior aquele encontrado para a mistura não modificada.

Figura 2.35 - Resultados dos ensaios de deformação permanente no equipamento francês, com dois ligantes asfálticos argentinos.



Fonte: Nascimento (2008).

Simulador do tipo APA

Roberts *et al.* (1996) afirmam que no desenvolvimento da metodologia Superpave de dosagem de misturas asfálticas, era necessário um mecanismo de avaliação do desempenho quanto à formação da trilha de roda. Entretanto, na concepção do método este mecanismo não foi desenvolvido, e dentre todos os simuladores testados o mais promissor para atender a esta necessidade foi o *Asphalt Pavement Analyzer - APA*. O ensaio no simulador APA é regulamentado pela AASHTO T 340 (2010) - *Determining Rutting Susceptibility of Hot Mix Asphalt Using the Asphalt Pavement Analyzer*.

Cooley *et al.* (2000) mostram que no APA é possível ensaiar dois tipos de CP, um em forma de placa com dimensões de 12,5cm × 30cm e 7,5cm de espessura e CP's cilíndricos com dimensões de 15cm de diâmetro e 7,5cm de espessura. Os CP's são compactados por amassamento com Vv (volume de vazios) entre 4% e 7%. Os CP's cilíndricos podem ser também obtidos com o CGS. Uma roda metálica aplica uma carga de 445N sobre a superfície do CP através de uma mangueira inflada a uma pressão de 690MPa que repousa sobre esta superfície. A temperatura de ensaio varia entre 35°C e 60°C. O ensaio é conduzido a 8.000 ciclos e com o auxílio de um micrômetro determina-se o afundamento. Permite ainda o ensaio em CP's imersos em água. A Figura 2.36 mostra como é possível o ensaio de seis CP's no aparelho APA.

Figura 2.36 - APA - *Asphalt Pavement Analyzer*



Fonte: <http://www.kutri.ku.edu/research/project/moisture-sensitivity-of-hot-mix-asphalt-mixtures/index.html>

Simulador do tipo HWTD

O *Hamburg Wheel-Tracking Device* (HWTD) é regulamentado pela norma AASHTO T 324-11 - *Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot-Mix*. Este simulador também baseia-se em princípios similares aos dos equipamentos já descritos. Foi desenvolvido em Hamburgo na Alemanha e é usado como requerimento para muitas das estradas mais movimentadas neste país. Conforme a Figura 2.37, os ensaios são realizados em placas de 260mm × 320mm de área e, normalmente, 40mm de espessura. As placas são moldadas buscando-se 7±1% de vazios e são compactadas por meio de um compactador linear de amassamento. Pode-se ainda, ensaiar CP's cilíndricos, moldados pelo CGS. A carga é aplicada à mistura compactada por meio de rodas de aço que realizam movimento de ida e vinda ao longo da placa (Coutinho *et al.*, 2010a).

Figura 2.37 - Simulador de tráfego Hamburg - *Hamburg Wheel-Tracking Device*.



Fonte: Stuart e Youtcheff (2001).

A Tabela 2.6 reúne as condições de ensaio dos simuladores do tipo LCPC, APA e HWTD.

Tabela 2.6 - Condição de ensaio dos simuladores de tráfego: LCPC, APA e HWTD.

Condições de ensaio	Simulador		
	LCPC	APA	HWTD
Modo de compactação	Amassamento	Amassamento	Amassamento
Dimensões do corpo de prova (cm) (L: largura; C: comprimento; E: espessura; e D: diâmetro)	L×C×E = 18 × 50 × 5 ou 10	L×C×E = 12,5 × 30 × 7,5 D×E = 15 × 7,5	L×C×E = 26 × 32×4
Volume de vazios (%)	3 - 12	4 - 7	6 - 8
Número de ciclos (2 passadas)	5.000 a 30.000	8.000	20.000
Carga de ensaio (N)	5000 ± 50	445	705
Condição da placa	Imerso	Seca ou imerso em água	Seco ou imerso em água
Tipo de roda	Pneu	Mangueira inflada	Metálica
Temperatura de ensaio (°C)	60	35 - 60	20 - 70
Limite admissível	5% de deformação	7,6mm	4,0mm

Fonte: Autor deste trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os materiais utilizados na composição de cada mistura investigada na presente pesquisa, assim como suas origens e algumas propriedades. No total foram utilizadas quatro misturas, três provenientes do estado do Ceará e uma proveniente do estado do Rio de Janeiro. Este programa contempla um protocolo de ensaio que é dividido em duas etapas: a primeira é a realização dos ensaios confinados, os quais são realizados em variadas condições de carregamento, temperatura, tempo de aplicação de carga e período de repouso, e a segunda se destina à aplicação do *Shift Model*.

3.1 Misturas do tipo Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ)

Esta dissertação teve por objetivo avaliar misturas aplicadas em obras de rodovias federais do estado do Ceará e obras presentes na cidade de Fortaleza/CE e do Rio de Janeiro/RJ. Todas estas misturas foram sujeitas à aplicação do protocolo de ensaio, assim como o ensaio de *creep* dinâmico, para posterior comparação dos níveis de deformação e FN, o que contribuiu para o maior entendimento do comportamento laboratorial quanto à deformação permanente.

3.1.1 Mistura C1

A Mistura C1 é proveniente do estado do Ceará e foi idealizada no LMP/UFC. A fim de se buscar uma mistura com alta resistência à deformação permanente foi adicionado o polímero Polimul S-74 ao ligante asfáltico (CAP 50/70 cedido pela Petrobras/Lubnor em Fortaleza). Este ligante modificado com polímero foi fornecido pela Asfaltos Nordeste.

Conforme informações do fornecedor, o Polimul S-74, devido às suas características físico-químicas, melhora as propriedades reológicas e a recuperação elástica dos asfaltos, promove o aumento do momento polar dos asfaltos, enquanto mantém a estabilidade térmica do asfalto durante altas temperaturas de processamento das massas asfálticas. O alto teor de éster acrílico leva à uma alta flexibilidade (baixa cristalinidade) e capacidade de absorção de impactos mecânicos durante as operações de usinagem, o que otimiza a espessura da película asfáltica dos agregados minerais. O Polimul S-74 foi adicionado em 2% em peso ao ligante asfáltico. Este teor é justificado pela fornecedora, pois garantiu que as propriedades como penetração, ponto de amolecimento e recuperação elástica apresentassem resultados conforme

estabelecidos pelas normas rodoviárias do DNIT. Assim, o teor de 2% é um teor que assegura as propriedades do ligante modificado e mantém o custo de produção o mínimo necessário quanto à adição deste polímero. O ligante modificado foi submetido aos ensaios preconizados pela norma DNIT 129/2011 - EM - Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico - Especificação de material. Os resultados de ensaio do ligante modificado com o Polimul S-74 estão presentes na Tabela 3.1.

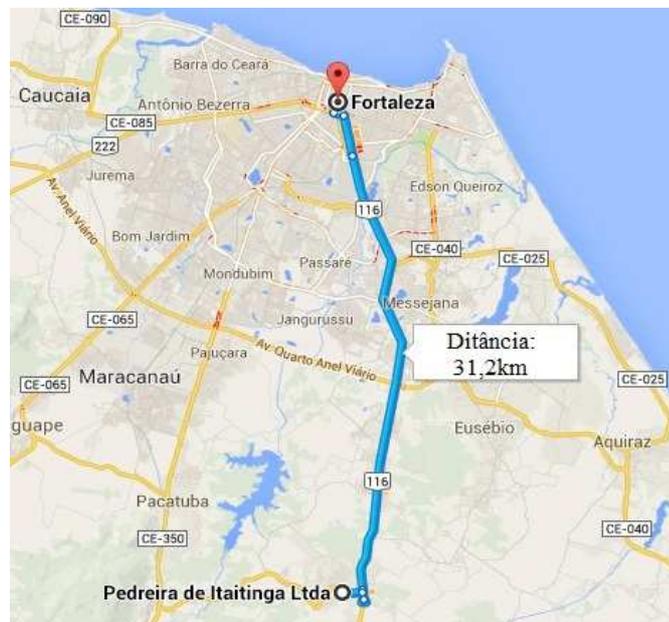
Tabela 3.1 - Características gerais do ligante modificado com o Polimul S-74.

Característica	Unidade	Resultado	Limite da Especificação
Penetração 25°C, 5s, 100g	0,1mm	55	45 - 70
Ponto de Amolecimento	°C	58	≥ 55
Recuperação Elástica a 25°C, 20 cm	%	75	≥ 75

Fonte: Asfaltos Nordeste.

Os agregados da Mistura C1 são de origem granítica e provém da Pedreira de MFT, localizada no município de Itaitinga, distante 31,2 km de Fortaleza, Figura 3.1.

Figura 3.1 - Localização da Pedreira MFT, Itaitinga/CE.



Fonte: Google Maps (2014).

Os agregados foram classificados de acordo com o método de ensaio para normas rodoviárias do DNIT (DNER - ME 083/98 - Agregados - análise granulométrica) e os seus resultados quanto à granulometria estão apresentados na Tabela 3.2.

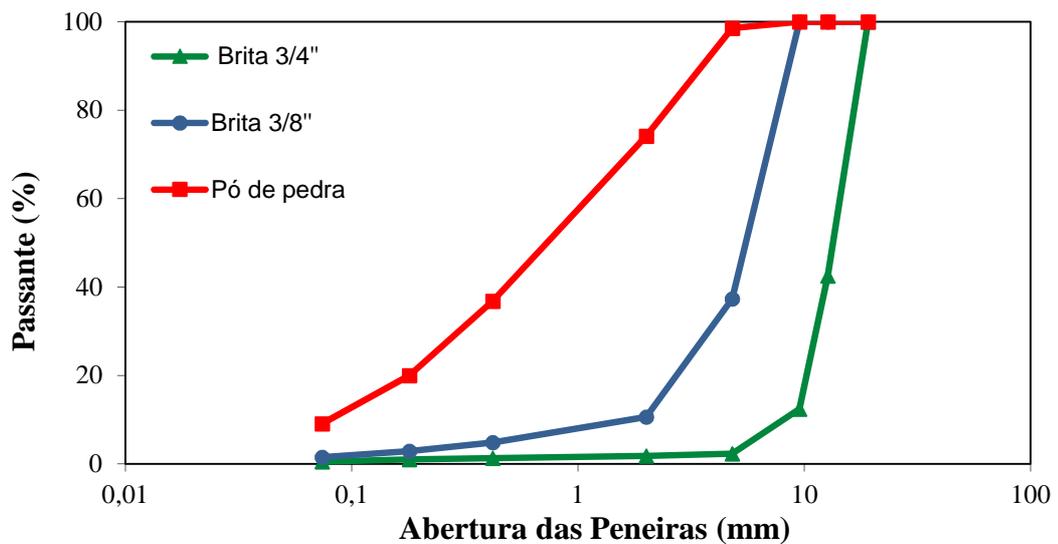
Tabela 3.2 - Resultados da granulometria para os agregados - Mistura C1.

Série ASTM	Peneiras (mm)	% Passante		
		Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de pedra
3/4"	19,0	100	100	100
1/2"	12,5	42,5	100	100
3/8"	9,5	12,4	100	100
Nº 4	4,8	2,3	37,3	98,6
Nº 10	2,0	1,8	10,6	74,2
Nº 40	0,42	1,3	4,8	36,8
Nº 80	0,18	1	2,9	20
Nº 200	0,075	0,5	1,5	9,1

Fonte: Autor deste trabalho.

As curvas granulométricas dos agregados utilizados na Mistura C1 são indicadas na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Curvas granulométricas dos agregados - Mistura C1.



Fonte: Autor deste trabalho.

As faixas granulométricas recomendadas pelo DNIT para o uso em concretos asfálticos estão representadas pela Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Faixas granulométricas para o concreto asfáltico.

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 1/2"	38,1	95 - 100	100	-	± 7%
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	-	± 7%
3/4"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	± 7%
1/2"	12,7	-	-	80 - 100	± 7%
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	± 7%
Nº 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
Nº 10	2,0	20 - 40	20 - 45	22 - 50	± 5%
Nº 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	± 5%
Nº 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	± 3%
Nº 200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	± 2%
Asfalto solúvel no CS2(+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	± 0,3%

Fonte: DNIT 031 (2006).

A especificação norte-americana AASHTO M 323-13 (2013) - *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design* determina que a curva granulométrica obedeça aos pontos de controle, conforme o TMN do agregado (Tamanho Máximo Nominal, i.e., peneira na qual no máximo 10% em peso do material fica retido) do agregado. Os pontos de controle para agregados de TMN de 19,0mm estão representados pela Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Pontos de controle para TMN de 19,0mm.

Série ASTM	Abertura (mm)	Pontos de controle	
		Limite Inferior	Limite Superior
1"	25,0	100	-
3/4"	19,0	90	100
1/2"	12,5	-	90
3/8"	9,5	-	-
Nº 4	4,75	-	-
Nº 8	2,36	23	49
Nº 16	1,18	-	-
Nº 200	0,075	2	8

Fonte: AASHTO M 323-13 (2013).

A Faixa C é destinada à camada de rolamento, e o DNIT utiliza uma peneira de corte para a classificação de agregado graúdo e miúdo. Todo material retido na peneira Nº 10 (2mm) é considerado graúdo e o material passante é definido como agregado miúdo. A Tabela 3.5 apresenta as frações de agregados graúdos, miúdos e fíler usados na Mistura C1.

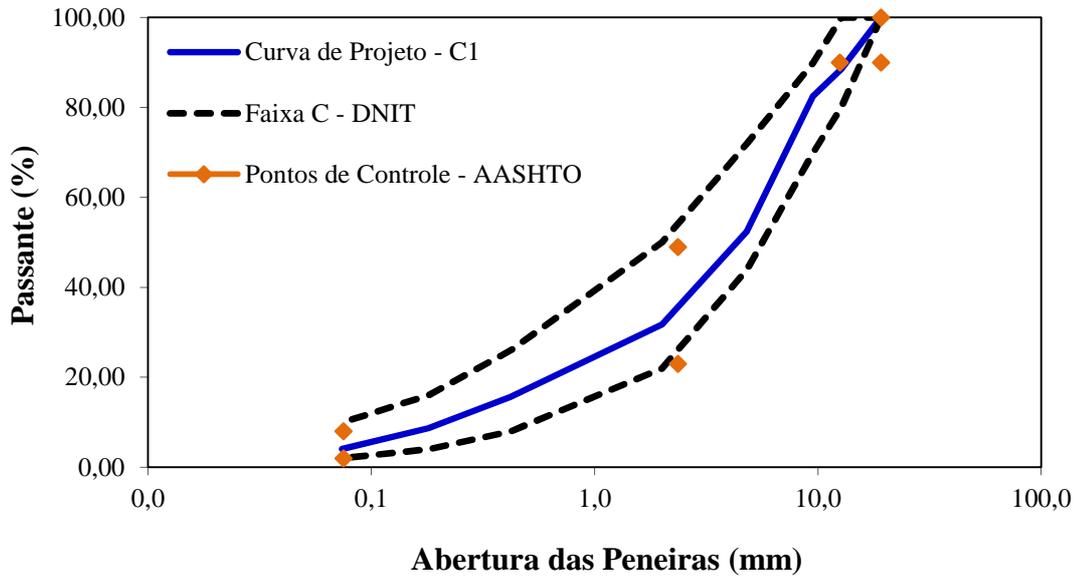
Tabela 3.5 - Características da curva de projeto - Mistura C1.

Característica	Valor
TMN (mm)	19,0
Brita 3/4" (%)	42,0
Brita 3/8" (%)	30,0
Pó de pedra (%)	28,0
Agregado graúdo (%)	75,0
Agregado miúdo (%)	22,0
Fíler (%)	3,0

Fonte: Autor deste trabalho.

A curva de projeto da Mistura C1 (Figura 3.3) foi enquadrada na Faixa C do DNIT 031/2006 - Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - ES.

Figura 3.3 - Curva de projeto - Mistura C1.



Fonte: Autor deste trabalho.

A Mistura C1 foi dosada de acordo com a metodologia Superpave, AASHTO M 323-13 (2013) - *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design*. O número de giros a ser aplicado no Compactador Giratório Superpave (CGS) é determinado em função do tráfego, ESAL (*Equivalent Single Axle Load*). A premissa principal da dosagem Superpave é de que a quantidade de ligante usada deve ser tal que a mistura atinja 4% de vazios no número de giros de projeto (N_{PROJETO}). A Tabela 3.6 apresenta as características de dosagem da Mistura C1 e seus parâmetros volumétricos: Vv (Volume de vazios), VAM (Vazios no Agregado Mineral), RBV (Relação Betume/Vazios) e G_{mm} .

Tabela 3.6 - Características de dosagem - Mistura C1.

Parâmetro	Resultado	Especificação AASHTO
Teor de CAP (%)	4,5	4,5 - 7,0
V _v (%)	4,0	4,0
VAM (%)	14,2	≥ 13,0
RBV (%)	71,9	65,0 - 75,0
Proporção pó/asfalto	0,90	0,6 - 1,2
N _{PROJETO}	100	100
G _{mm}	2,428	-

Fonte: Autor deste trabalho.

A proporção pó/asfalto é um critério fixo para todos os níveis de tráfego considerados na metodologia Superpave. Ele é calculado como uma porcentagem em massa do material passante na peneira N° 200 (0,075mm) dividido pelo teor de ligante da mistura (este em % da massa da mistura).

3.1.2 Mistura C2

A Mistura C2 é proveniente de um trecho de obra na BR222, estado do Ceará, cuja extensão é de 58,50km. Esta mistura foi utilizada como camada de rolamento a cargo do consórcio GETEL/GEL/Marquise sob a supervisão do DNIT. Os materiais utilizados nessa obra foram cedidos ao LMP/UFC para o processo de obtenção dos CP's em escala laboratório. O ligante utilizado na Mistura C2 foi o CAP50/70 fornecido pela Petrobras/Lubnor em Fortaleza. Nesta mistura foi utilizado um aditivo melhorador de adesividade, DOPE, em 0,3% em massa do ligante. A Tabela 3.7 mostra algumas propriedades do ligante fornecidas pelo DNIT.

Tabela 3.7 - Propriedades do CAP - Mistura C2.

Característica	Método	Resultado
Viscosidade Saybolt-Furol, 135°C	ABNT NBR - 14950 (2003)	198
Penetração a 25°C, 100g, 5s, 0,1 mm	ABNT NBR - 6576 (2007)	57
Densidade relativa	ABNT NBR - 6296 (2012)	1,030
Ponto de Fulgor (°C)	ABNT NBR - 11341 (2008)	301

Fonte: Autor deste trabalho.

Os agregados da Mistura C2 são de origem gnáissica e provenientes da Pedreira Yolita (Pyla), localizada na BR 222, distante 19km da capital Fortaleza. A proporção de cada agregado que compôs a curva granulométrica da Mistura C2 encontra-se na Tabela 3.8.

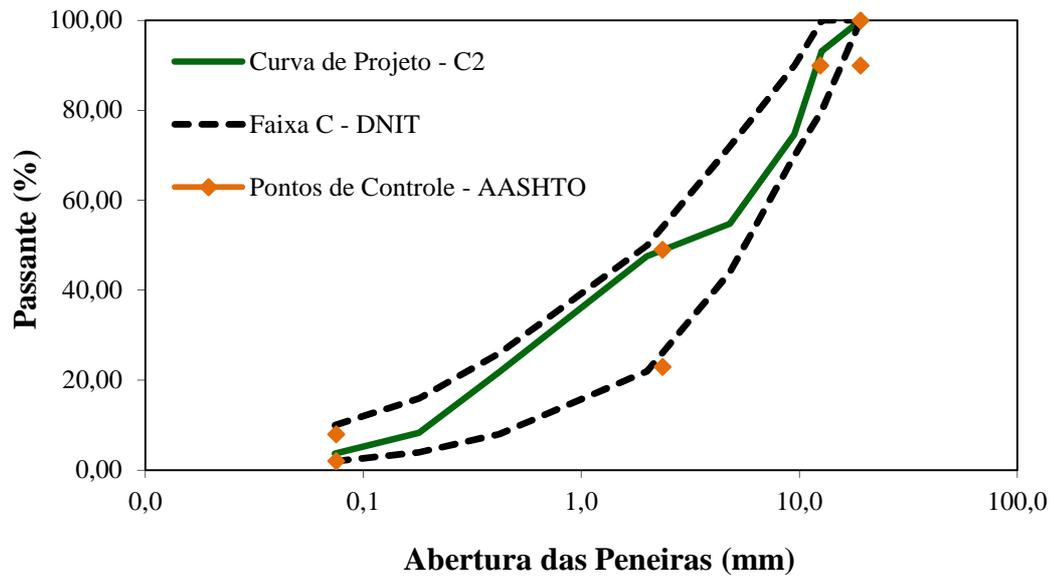
Tabela 3.8 - Características da curva de projeto - Mistura C2.

Material	Valor
TMN (mm)	12,5
Brita 3/4" (%)	21,0
Brita 1/2" (%)	35,0
Areia de rio (%)	22,0
Areia de campo (%)	20,0
Fíler (%)	2,0

Fonte: Autor deste trabalho.

A Mistura C2 teve sua curva granulométrica enquadrada na Faixa C do DNIT 031/2006 - Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - ES, conforme mostra a Figura 3.4.

Figura 3.4 - Curva de projeto - Mistura C2.



Fonte: Autor deste trabalho.

A Mistura C2 foi dosada de acordo com a metodologia Marshall preconizada no Brasil pela norma rodoviária do DNIT (DNER - ME 043/95 - Mistura Betuminosas a quente - Ensaio Marshall). Os CP's sofreram 75 golpes por face para a determinação do teor de projeto. A Tabela 3.9 contém as características finais da Mistura C2.

Tabela 3.9 - Características de dosagem - Mistura C2.

Parâmetro	Resultado	Especificação AASHTO
Teor de CAP (%)	6,0	4,5 - 9,0
Vv (%)	4,2	3,0 - 5,0
RBV (%)	77,0	75,0 - 82,0
Estabilidade (kgf)	999	≥ 500
Resistência à tração (MPa)	0,99	≥ 0,65
G _{mm}	2,423	-

Fonte: Autor deste trabalho.

3.1.3 Mistura C3

A Mistura C3 foi destinada a obras de pavimentação na cidade de Fortaleza por meio da empresa Insttale Engenharia. Os materiais desta mistura foram cedidos ao LMP/UFC para a fabricação dos CP's. O ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/70 fornecido pela Petrobras/Lubnor. Também foi adicionado um aditivo melhorador de adesividade, DOPE, em 0,05% em massa do ligante. Algumas propriedades deste ligante estão descritas na Tabela 3.10, conforme informado pela fornecedora.

Tabela 3.10 - Propriedades do CAP - Mistura C3.

Característica	Método	Resultado
Viscosidade Rotativa a 60°C (P) ⁽¹⁾	ASTM D 4402	2415
Penetração a 25°C, 100g, 5s (0,1 mm)	ASTM D 5	60
Ponto de Amolecimento (°C)	ASTM D 36	48,0
Viscosidade Saybolt-Furol a 135°C (s)	ASTM E 102	198,0
Viscosidade Brookfield a 135°C, SP21 ⁽²⁾ , 20 RPM (cP)	ASTM D 4402	389
Viscosidade Brookfield a 150°C, SP21 (cP) ⁽³⁾	ASTM D 4402	194
Viscosidade Brookfield a 177°C, SP21 (cP)	ASTM D 4402	71
RTFOT - Penetração Retida (%)	ASTM D 5	75
RTFOT- Aumento do Ponto de Amolecimento (°C)	ASTM D 36	3,8
RTFOT - Ductilidade a 25°C (cm)	ASTM D113	> 150
RTFOT - Variação em % de Massa (%)	ASTM D 2872	0,024
Ductilidade a 25°C (cm)	ASTM D113	> 150
Solubilidade no Tricloroetileno (% em massa)	ASTM D 2042	100,0
Ponto de Fulgor (°C)	ASTM D92	> 300
Índice de Suscetibilidade Térmica	ANP X 018	-1,3
Aquecimento a 177°C	ANP X 215	NESP ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Poise.

⁽²⁾ Spindle 21.

⁽³⁾ Centi-Poise = 0,01Poise.

⁽⁴⁾ Não espuma.

Fonte: Autor deste trabalho.

A Mistura C3 é composta por agregados de origem fonolítica, provenientes da Pedreira OCS Mineradora, localizada a 19km do centro de Fortaleza. A descrição de cada material que compõe a curva de projeto da Mistura C3 e seu percentual estão presentes na Tabela 3.11.

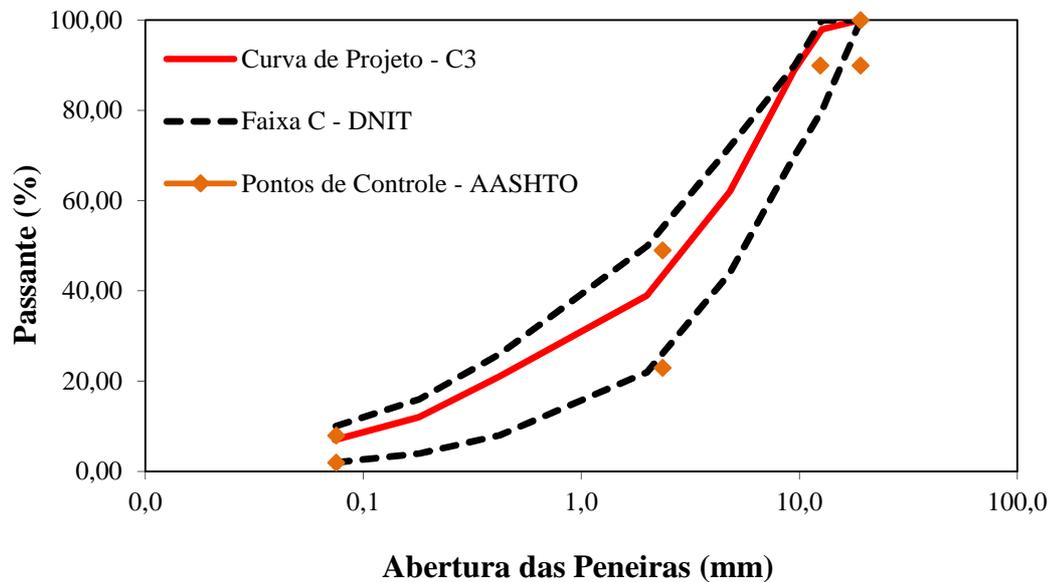
Tabela 3.11 - Características da curva de projeto - Mistura C3.

Material	Valor
TMN (mm)	9,5
Brita 1/2" (%)	28,0
Brita 3/8" (%)	19,5
Pó de pedra (%)	41,5
Areia de campo (%)	11,0

Fonte: Autor deste trabalho.

A Mistura C3 teve sua curva granulométrica enquadrada na Faixa C do DNIT 031/2006 - Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - ES, Figura 3.5.

Figura 3.5 - Curva de projeto - Mistura C3.



Fonte: Autor deste trabalho.

Esta mistura também foi idealizada de acordo com a metodologia Marshall, DNIT (DNER - ME 043/95 - Mistura Betuminosas a quente - Ensaio Marshall). Similarmente à Mistura C2, os CP's sofreram 75 golpes por face para a determinação do teor de projeto. As características da Mistura C3 estão presentes na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Características de dosagem - Mistura C3.

Parâmetro	Resultado	Especificação DNIT
Teor de CAP (%)	5,7	4,5 - 9,0
Vv (%)	3,4	3,0 - 5,0
VAM (%)	13,1	-
RBV (%)	79,3	75,0 - 82,0
Estabilidade (kgf)	9976	≥ 500
Fluência (mm)	3,3	2,0 - 4,5
G _{mm}	2,482	-

Fonte: Autor deste trabalho.

3.1.4 Mistura R1

A Mistura R1 é proveniente do estado do Rio de Janeiro e foi idealizada na Petrobras/Cenpes. Esta mistura foi aplicada em uma obra de pavimentação na cidade do Rio de Janeiro, e foi considerado em seu projeto um tráfego médio. O ligante asfáltico que compõe a Mistura R1 foi o CAP Reduc fornecido pela refinaria Petrobras/Reduc no Rio de Janeiro. Algumas propriedades do CAP Reduc estão descritas na Tabela 3.13 e foram fornecidas pela Petrobras/Cenpes.

Tabela 3.13 - Propriedades do CAP - Mistura R1.

Característica	Método	Resultado
PG (<i>Performance Grade</i>)	ASTM D 6373	64 -16
Penetração a 25°C, 100g, 5s (0,1 mm)	ASTM D 5	43
Ponto de Amolecimento (°C)	ASTM D 36	48,7
Viscosidade Brookfield a 135°C, SP21, 20 RPM (cP)	ASTM D 4402	445

Fonte: Autor deste trabalho.

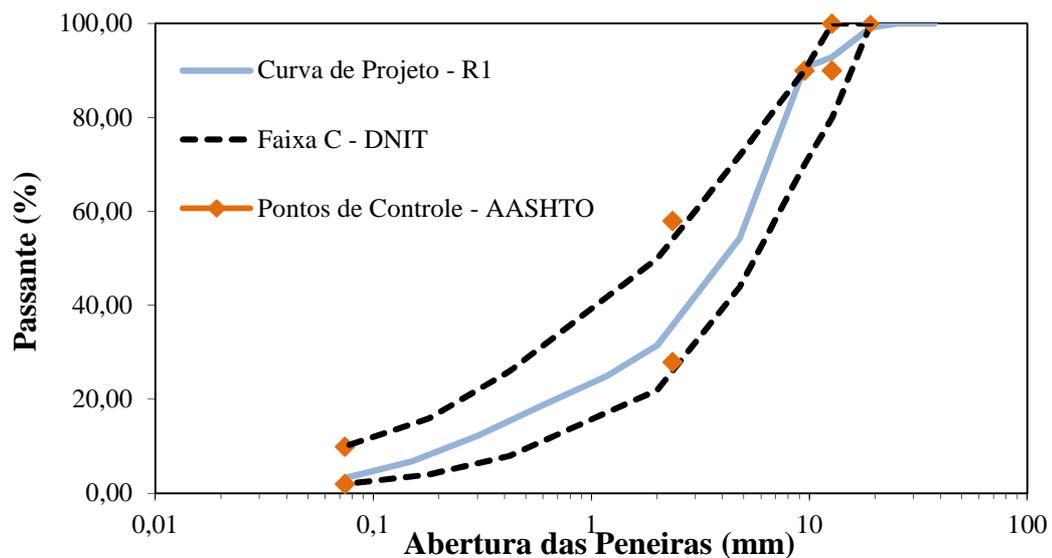
Os agregados utilizados na Mistura R1 são de origem granítica e foram coletados na Pedreira Sepetiba, localizada em Itaguaí/RJ, distante 90km da cidade do Rio de Janeiro. A curva de projeto desta mistura foi enquadrada pela especificação norte-americana AASHTO M 323-13 (2013), de acordo com o TMN do agregado que é 12,5mm, obedecendo aos pontos de controle. Vale lembrar que os pontos de controle da especificação AASHTO atendem ao limites da Faixa C do DNIT. A Tabela 3.14 apresenta os valores para os pontos de controle conforme o TMN de 12,5mm. A curva de projeto da Mistura R1 está representada pela Figura 3.6.

Tabela 3.14 - Pontos de controle para TMN de 12,5mm.

Série ASTM	Abertura (mm)	Pontos de controle	
		Limite Inferior	Limite Superior
3/4"	19,0	100	-
1/2"	12,5	90	100
3/8"	9,5	-	90
Nº 4	4,75	-	-
Nº 8	2,36	28	58
Nº 16	1,18	-	-
Nº 200	0,075	2	10

Fonte: AASHTO M 323-13 (2013).

Figura 3.6 - Curva de projeto - Mistura R1.



Fonte: Autor deste trabalho.

A Mistura R1 foi dosada de acordo com a metodologia Superpave e os CP's foram fabricados na Petrobras/Cenpes e enviados ao LMP/UFC para a realização dos ensaios. As características de dosagem da Mistura R1 estão presentes na Tabela 3.15.

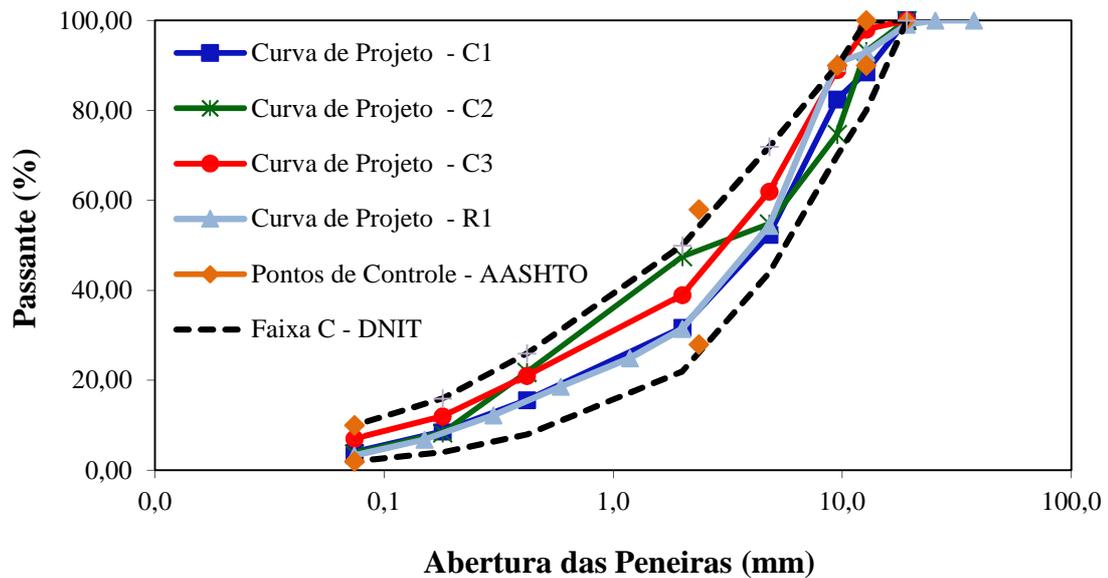
Tabela 3.15 - Características de dosagem da Mistura R1.

Parâmetro	Resultado	Especificação AASHTO
Teor de CAP (%)	5,5	4,5 - 7,0
Vv (%)	3,9	4,0
VAM (%)	14,59	≥ 13,0
RBV (%)	73,64	65,0 - 75,0
Resistência à tração (MPa)	1,39	≥ 0,65
N _{PROJETO}	100	100
G _{mm}	2,516	-

Fonte: Autor deste trabalho.

Todas as misturas presentes neste trabalho apresentam agregados de fontes mineralógicas e curvas granulométricas distintas, assim como diferentes teores de projetos. Assim, é possível compreender melhor o comportamento quanto à deformação permanente em escala de laboratório a partir do ensaio confinado, que possui diferenças na tensão atuante, tempo de carregamento, período de repouso e temperatura quando comparado ao ensaio de *creep* dinâmico. A Figura 3.7 mostra as curvas granulométricas utilizadas nessa pesquisa.

Figura 3.7 - Comparação entre as curvas granulométricas - misturas C1, C2, C3 e R1.



Fonte: Autor deste trabalho.

3.2 Protocolo de ensaio

3.2.1 Preparação das amostras

A etapa metodológica inicial do protocolo de ensaio consistiu na execução do ensaio de Referência para a obtenção da curva de referência, e a segunda etapa foi destinada aos ensaios MSS (*Multiple Stress Sweep*) os quais serão vistos adiante e que servem para o ajuste do *Shift Model*. Vale lembrar que tanto o ensaio de Referência como os ensaios MSS são ensaios confinados, e apresentam diferença nos níveis de tensão, período de repouso e temperatura. Tais diferenças serão apresentadas nessa seção.

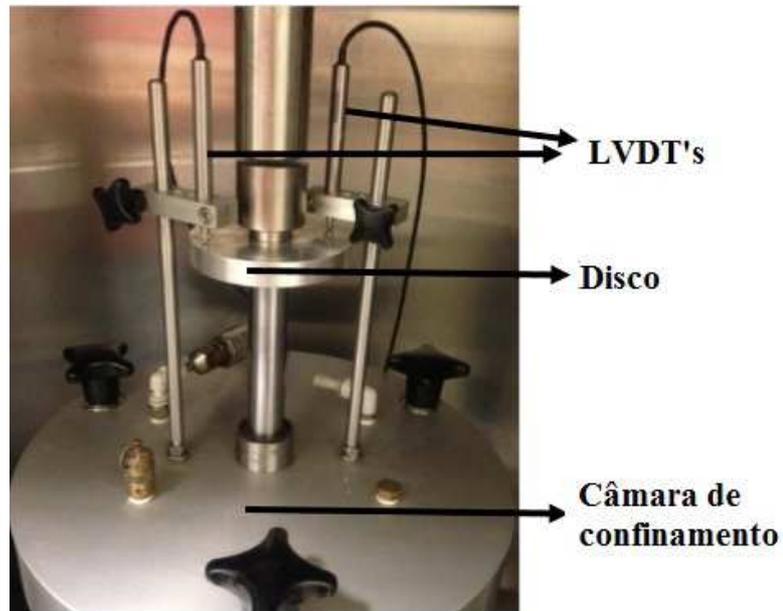
A partir da definição dos parâmetros volumétricos de cada mistura empregada nessa dissertação, os CP's das Misturas C1, C2 e C3 foram moldados em 100mm de diâmetro por 150mm de altura no LMP/UFC, por meio do CGS. Os CP's da Mistura R1 foram moldados na Petrobras/Cenpes na mesma geometria citada, e entregues ao LMP/UFC. Todos os CP's ensaiados nessa dissertação foram moldados com um Vv de $5,5\% \pm 0,5$, independente do Vv de projeto da mistura. O Vv de $5,5\% \pm 0,5$ vem sendo adotado em grupos de pesquisa no Brasil e no mundo, e a justificativa deste valor está relacionada ao número médio do Vv que o revestimento atinge ao longo da vida de serviço. Choi (2013) e LaCroix (2013) utilizaram esse valor de Vv na realização dos ensaios triaxiais com carga repetida.

3.2.2 Configuração do ensaio

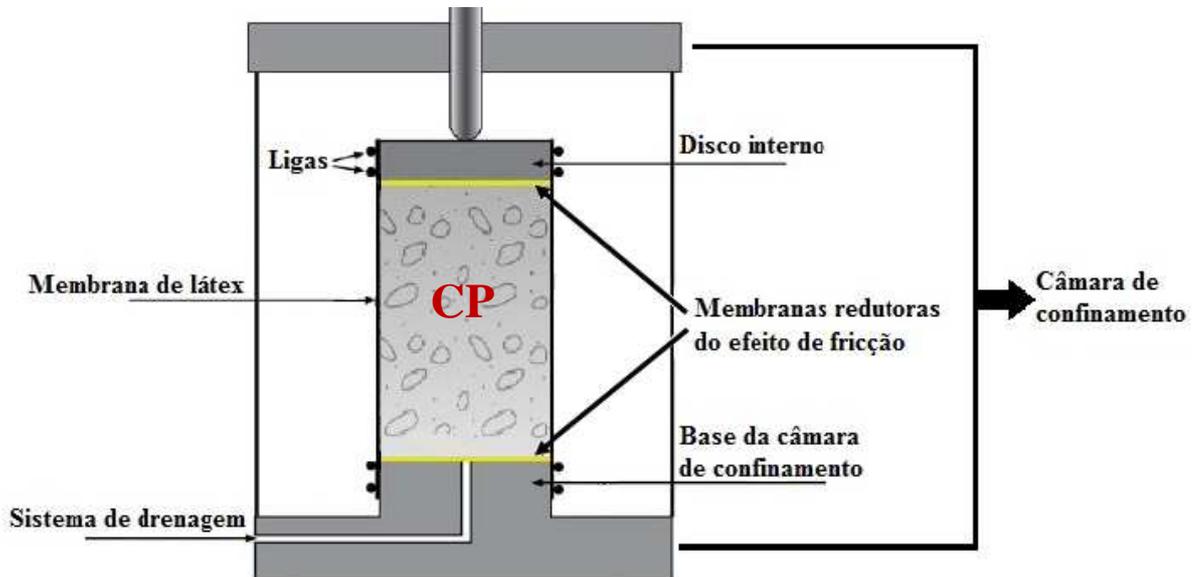
Os ensaios TRLPD e *creep* dinâmico sem confinamento foram realizados na UTM - 25 (*Universal Testing Machine - 25*) do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da UFC, que é uma máquina de célula triaxial. As pressões de confinamento são originadas por meio de um compressor a ar. O *software* utilizado para a programação da máquina (controle de temperatura, tensões atuantes, pressão de confinamento, período de repouso e carregamento, número de ciclos, etc.) e aquisição de dados mediante os ensaios é o UTS 030.

As amostras foram preparadas para ensaios confinados e receberam uma membrana de látex a fim de uniformizar a pressão confinante, pois esta membrana tem a finalidade de evitar a absorção de ar pela amostra. As leituras de deformações foram realizadas por dois LVDT's (*Linear Variable Differential Transformers*) acoplados na câmara de confinamento. Os LVDT's entram em contato com um disco que irá acompanhar as deformações do CP na medida em que o atuador for aplicando os ciclos de carregamento. A fim de diminuir o efeito de fricção entre o CP e os discos metálicos superiores e inferiores será inserida uma membrana de borracha lubrificada de diâmetro de 100mm. As ligas (nesta pesquisa foram utilizadas ligas de látex) servem para prender a membrana de látex no disco interno e na base da câmara de confinamento. Foram usadas no total quatro ligas. A Figura 3.8 (a) mostra a configuração entre os LVDT's, o disco e a câmara de confinamento, enquanto que a Figura 3.8 (b) representa o CP instalado na câmara de confinamento.

Figura 3.8 - Representação do ensaio triaxial de carga repetida: (a) configuração entre os LVDT's, disco e câmara de confinamento e (b) representação do CP na câmara de confinamento.



(a)



(b)

Fonte: Autor deste trabalho.

3.2.3 Pré-condicionamento

A etapa de pré-condicionamento consiste em ajustar a temperatura de condicionamento do ensaio e a aplicação da pressão de confinamento (pressurização). Após atingir a temperatura de ensaio, a pressão de confinamento foi aumentada gradualmente de 0 a 69kPa (10psi) ao longo de 1min. Isto é feito para evitar mudanças bruscas no CP e no atuador de carga. As amostras foram pressurizadas em 69kPa por volta de 1,5 horas. Nesta etapa também é realizado o *fingerprint testing*, o qual é um curto ensaio inicial de $|E^*|$ sob condições específicas para verificar se a rigidez do CP apresenta valores aceitáveis (limites de *microstrains* entre 50 e 75) para a realização dos ensaios triaxiais, o ensaio tem duração de 5 min e é descrito mais adiante.

3.2.4 Ensaios confinados

Após a finalização da etapa de condicionamento foram realizados dois tipos de ensaios confinados para verificar o comportamento da mistura asfáltica e posterior obtenção dos dados para a utilização do *Shift Model*. Os ensaios confinados são: o ensaio de Referência e o ensaio MSS, que é um tipo de ensaio CHC (o qual representa um TRLPD completo a partir de blocos de carregamento). O ensaio de Referência assume uma condição específica de nível de tensão desvio, assim como tempo de carregamento, período de repouso e temperatura. O ensaio MSS serve para a calibração do modelo e assume vários níveis de tensão desvio, tempo de carregamento, período de repouso e temperatura, e é descrito mais adiante. O nível da pressão de confinamento é o mesmo para estes dois ensaios, 69kPa (10psi).

Ensaio de Referência

No Capítulo 2 foi citado que o TRLPD é um ensaio com características de *creep* dinâmico, no entanto, as condições sofrem algumas alterações, sendo elas: tempo de carregamento, período de repouso, tensão desvio, temperatura e adição da pressão de confinamento. Essa pressurização de 69kPa (pressão de confinamento) não varia no ensaio, pois o modelo considera apenas uma deformação permanente uniaxial a fim de se evitar uma análise muito complexa. O tempo de carregamento, a tensão desvio, e a temperatura são os fatores mais importantes.

As condições deste ensaio serão representadas a seguir na execução do protocolo de ensaio. Vale lembrar que nessa dissertação não será calculado o fator de correção campo/laboratório, apresentado no Capítulo 2, uma vez que para tal ajuste é necessário um banco de dados a partir de informações de campo, com valores das deformações permanentes juntamente com o projeto bem detalhado da mistura asfáltica. No Brasil tal banco de dados ainda encontra-se em construção no âmbito da Rede Temática de Asfalto da Petrobras, e que conta com a participação da UFC.

Ensaio Multiple Stress Sweep (MSS)

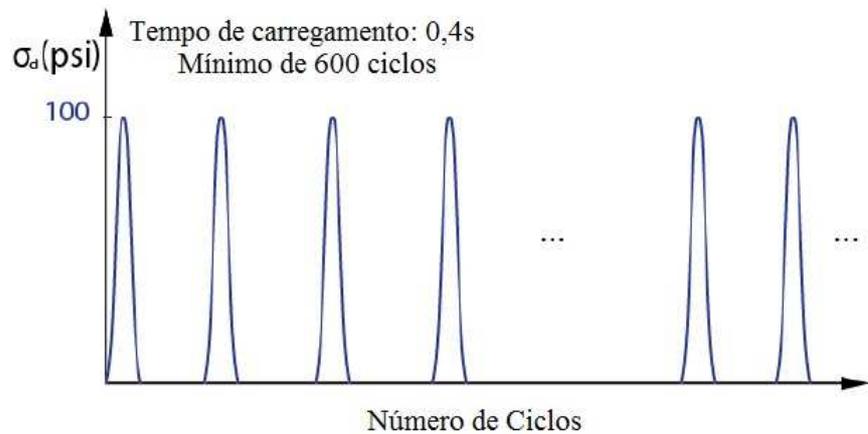
Para fins de ajuste do modelo é realizado o ensaio MSS (um tipo de ensaio CHC), o qual tem como hipótese que um carregamento por bloco (carregamento composto pelas três tensões desvio e três tempos de carregamento) representa um TRLPD completo. Ou seja, as características do comportamento quanto à deformação permanente que são obtidas para um TRLPD podem ser obtidas também pelos ensaios CHC (Compostos com Histórico de Carregamento). Portanto, o ensaio MSS pode servir como um substituto para o TRLPD com diferentes níveis de tensão desvio e tempo de carregamento.

Choi (2013) determinou, a partir de vários ensaios realizados, dentre todas as condições apresentadas na Tabela 2.2, um ensaio de Referência nas seguintes condições: tensão desvio de 690kPa (100psi); tempo de carregamento de 0,4s; período de repouso de 10s e temperatura de 47°C. A partir deste ensaio de Referência, o autor obteve a calibração do modelo pelo ensaio *Multiple Stress Sweep (MSS)* descrito a seguir.

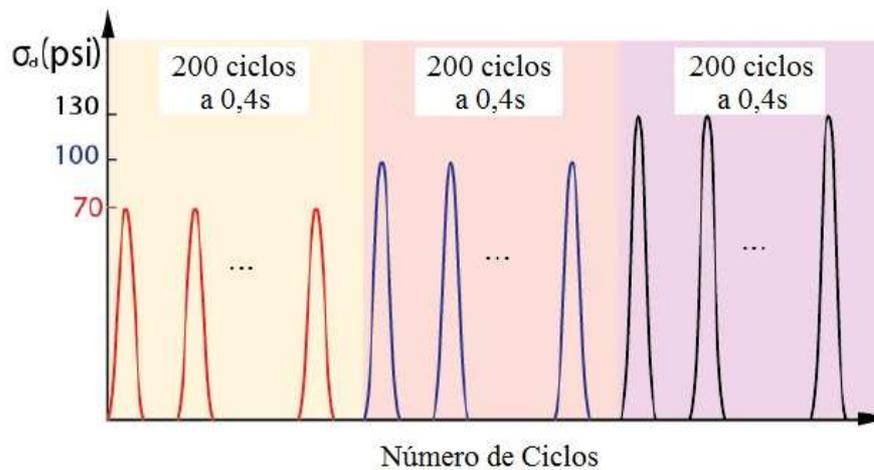
O MSS é um ensaio composto que tem três blocos de carregamento com três níveis de tensão desvio (483, 690 e 897kPa) e tempo de carregamento constante de 0,4s. O ensaio é realizado a três diferentes temperaturas para obter o fator de ajuste de tempo reduzido. Além do ensaio MSS, o *Shift Model* também precisa de uma curva de referência obtida a partir do TRLPD, que no referido modelo é denominado de ensaio de Referência. O ensaio de Referência, como já mencionado, é realizado em uma condição específica de carregamento. A maior temperatura (47°C) foi selecionada como a temperatura de referência, pois nesta temperatura os níveis de deformação são amplos o suficiente para cobrir as deformações que ocorrem nos níveis de temperatura intermediário (37°C) e baixo (17°C). O nível de tensão desvio selecionado é de 690kPa (100psi). Em resumo, este protocolo consiste em um ensaio de Referência (TRLPD) na maior temperatura, e em três ensaios MSS cada um com um nível de

temperatura selecionado (baixo, intermediário ou alto). Portanto, o protocolo de ensaio exige a realização dos ensaios TSS (*Triaxial Stress Sweep*), os quais são compostos pelos ensaios TRLPD e MSS. O ensaio MSS é no mínimo realizado com 600 ciclos e equivale ao ensaio CHC (Choi, 2013). As Figuras 3.9 (a) e (b) exemplificam o ensaio de Referência e os ensaios MSS, respectivamente.

Figura 3.9 - Diagrama esquemático do protocolo de ensaio: (a) ensaio de Referência e (b) ensaio *Multiple Stress Sweep*.



(a)



(b)

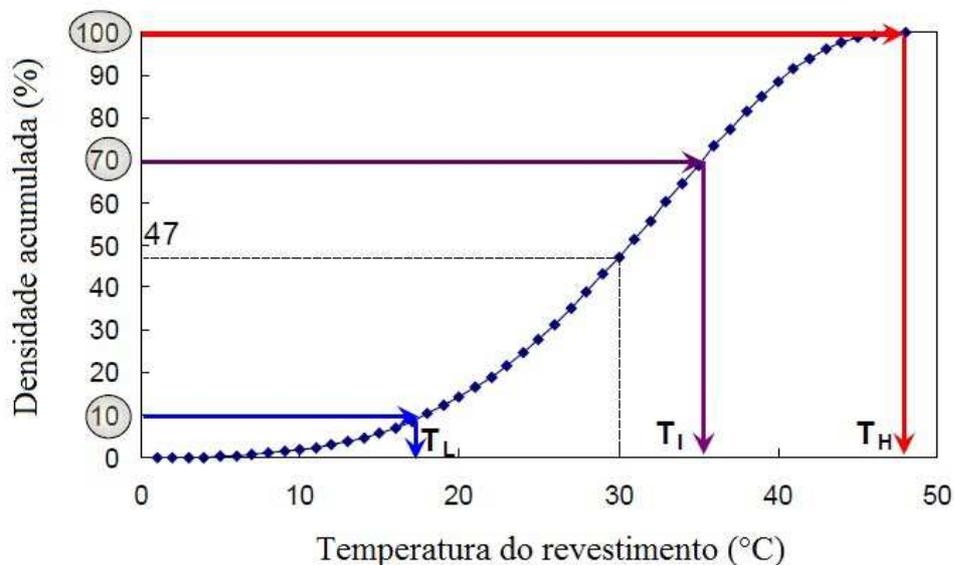
Fonte: Adaptada de Choi (2013).

Choi (2013) afirma que para melhor avaliação dos níveis de deformação obtidos em cada bloco, o período de repouso não pode ser longo o suficiente para causar efeitos de amolecimento viscoplástico e recuperação viscoelástica. Períodos de repouso muito longos

geram um tempo de ensaio impraticável. A partir da realização de numerosos ensaios TRLPD com diferentes períodos de repouso e pela comparação com as deformações previstas pelo *Shift Model*, o referido autor concluiu que para as temperaturas baixas e intermediárias o período de repouso assume valor de 1,6 segundos e para altas temperaturas assume o valor de 10 segundos.

O amolecimento viscoplástico e a recuperação viscoelástica também estão associados às variações de temperatura no revestimento asfáltico, pois o aumento da temperatura reduz a viscosidade do ligante e com isso pode ocorrer a densificação do material. Dessa forma, o EICM (*Enhanced Integrated Climatic Model*), desenvolvido pelo NCHRP, é um modelo para análise conjunta de fluxo de calor e umidade. Foi inicialmente desenvolvido para o FHWA e posteriormente adaptado para uso no MEPDG (2004). O EICM é utilizado no MEPDG para prever ou simular as mudanças no comportamento e características do pavimento em conjunto com o ciclo natural das condições ambientais que ocorrem ao longo dos anos de serviço. Choi (2013) determinou na sua pesquisa os valores de temperatura apontados pelos programas MEPDG e EICM, e, a partir das deformações permanentes encontradas referentes à temperatura do pavimento, foi criado um gráfico de densidade acumulada (Figura 3.10).

Figura 3.10 - Exemplo de função de densidade acumulada da deformação permanente de acordo com a temperatura do revestimento em Angelica, NY.



Fonte: Adaptada de Choi (2013).

Choi (2013) afirma que as temperaturas de ensaio devem corresponder de 0 a 100% da densidade acumulada. Entretanto, as deformações permanentes não se desenvolvem a

temperaturas muito baixas. A temperatura equivalente a 10% da densidade acumulada é chamada de temperatura baixa (T_L). Os níveis máximos de deformação permanente equivalem a 100% da densidade acumulada e são atingidos nas temperaturas altas (T_H). A temperatura correspondente entre 60 e 80% da densidade acumulada é utilizada como temperatura intermediária (T_I), ao invés de 50%. Assim, 70% da densidade acumulada é recomendada como temperatura intermediária (T_I). A partir das considerações acerca dos índices de densidade acumulada foram propostos valores para a temperatura baixa (T_L), intermediária (T_I), e alta (T_H) utilizadas no protocolo de ensaio para a mistura avaliada em Angelica, NY.

3.2.5 Procedimento de ensaio

Como já visto, o protocolo de ensaio requer a utilização dos ensaios TSS (ensaio de Referência e três ensaios MSS nos três diferentes níveis de temperatura). Na Tabela 3.16 estão representadas as condições do protocolo de ensaio, incluindo temperatura, tempo de carregamento, período de repouso, tensão desvio, pressão de confinamento e número de ciclos para cada tipo de ensaio.

Tabela 3.16 - Condições do protocolo de ensaio.

Condição	Referência (TRLPD)	MSS		
		T_H	T_L	T_I
Temperatura (°C)	T_H	T_H	T_L	T_I
Período de repouso (s)	10	10	1,6	1,6
Tempo de carregamento (s)	0,4	0,4		
Tensão desvio (kPa)	690 (100psi)	483; 690 e 897 (70; 100 e 130psi)		
Pressão de confinamento (kPa)	69 (10psi)			
Número de Ciclos	≥ 600	200 ciclos por bloco de carregamento		

Fonte: Autor deste trabalho.

O procedimento de ensaio é composto por seis etapas: (1) preparação do CP; (2) condicionamento da temperatura alvo na câmara da UTM - 25; (3) instalação do CP na UTM - 25; (4) pressurização e correção da temperatura alvo caso seja necessário; (5) ensaio *fingerprint*

e (6) realização dos ensaios principais (Referência e MSS). As etapas do procedimento de ensaio estão descritas na Tabela 3.17.

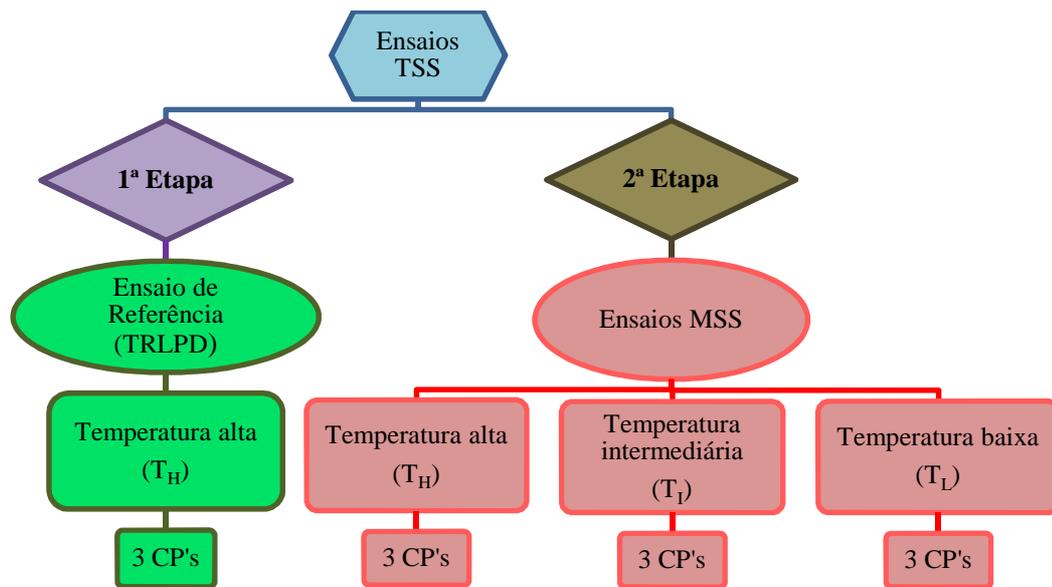
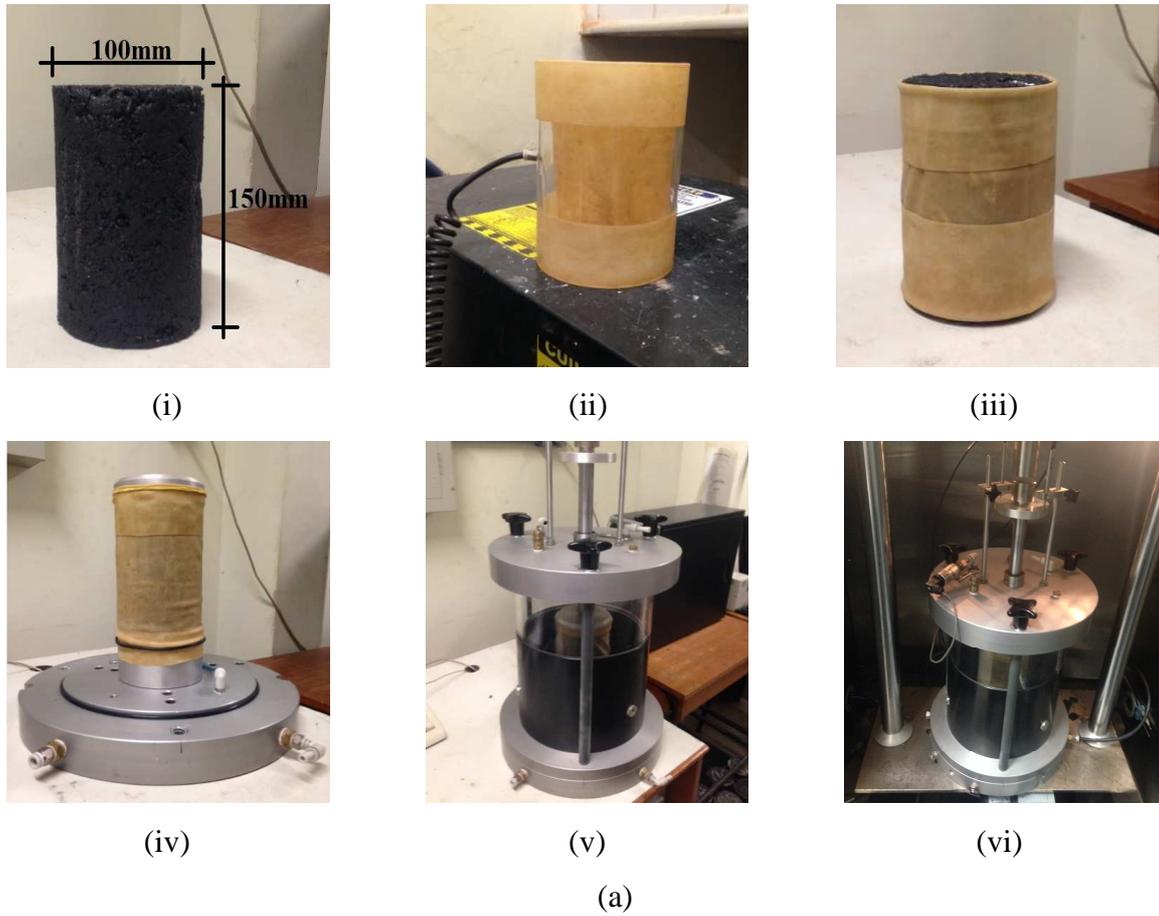
Tabela 3.17 - Procedimento para o protocolo de ensaio.

Etapa	Procedimento	Descrição	Duração média
1	Preparação do CP	Membrana e LVDT's	-
2	Condicionamento da temperatura (°C)	Ambiente da câmara	-
3	Instalação do CP	Câmara da UTM - 25	< 5 minutos
4	Pressurização e condicionamento de temperatura adicional	Aplicação da força de contato e pressão de confinamento	> 1h
5	Ensaio <i>fingerprint</i> ($ E^* $)	10 Hz, 20 ciclos	5 minutos
6	Ensaios principais	Referência (T_H) e MSS (T_L , T_I e T_H)	1,8h (T_H) e 0,7h (T_L e T_I)

Fonte: Adaptada de Choi (2013).

Os ensaios principais apresentam uma condição própria de preparação das amostras e configuração da câmara de confinamento dentro da câmara da UTM - 25. O esquema de preparação do CP e montagem na câmara de confinamento estão representados pela Figura 3.11 (a), onde: (i) CP nas medidas de 100mm de diâmetro e 150mm de altura; (ii) suporte para colocação da membrana no CP; (iii) CP recoberto pela membrana; (iv) CP na base da câmara de confinamento, (v) conjunto CP e câmara de confinamento; e (vi) câmara de confinamento inserido na câmara da UTM - 25. Os procedimentos de configuração da UTM - 25 (calibração do *template*) para a realização dos ensaios confinados estão descritos no Apêndice A desta dissertação. A Figura 3.11 (b) apresenta um fluxograma de realização dos ensaios TSS.

Figura 3.11 - Realização dos ensaios TSS: (a) preparação do CP e montagem na câmara de confinamento e (b) fluxograma das etapas dos ensaios TSS.



(b)

Fonte: Autor deste trabalho.

Para aplicação do protocolo de ensaio foram moldados doze CP's para cada mistura (C1, C2, C3 e R1): três para o ensaio Referência (TRLPD) e mais nove para o ensaio MSS (calibração do modelo), sendo que são três CP's para cada tipo de temperatura (T_L , T_I e T_H). Esta pesquisa também tem por objetivo comparar os resultados do ensaio TRLPD com os de *creep* dinâmico sem confinamento. Portanto, foram fabricados três CP's adicionais para cada mistura para a realização dos ensaios de *creep* dinâmico, totalizando quinze CP's por mistura investigada. A Tabela 3.18 representa o número de CP's referentes a realização do protocolo de ensaio durante a primeira e a segunda etapa, assim como os números de CP's referentes ao ensaio de *creep* dinâmico para cada mistura.

Tabela 3.18 - Configuração do protocolo de ensaio e ensaio de *creep* dinâmico em número de CP's para cada mistura.

Mistura	Protocolo de ensaio		<i>Creep</i> dinâmico
	1ª Etapa	2ª Etapa	
	Referência	MSS	
C1	3 CP's	9 CP's	3 CP's
C2	3 CP's	9 CP's	3 CP's
C3	3 CP's	9 CP's	3 CP's
R1	3 CP's	9 CP's	3 CP's

Fonte: Autor deste trabalho.

O ensaio de Referência (TRLPD), assim como o ensaio de *creep* dinâmico, possui um critério de ruptura a partir da inversão da taxa de deformação plástica, o que caracteriza o FN. No entanto, estes ensaios são realizados sob configurações de procedimentos bastante diferentes. O ensaio de Referência é caracterizado por um estado triaxial de tensões, o qual é possível a partir da pressão de confinamento e tensão desvio. Outro ponto relevante entre estes ensaios é a recomendação de um número mínimo de ciclos, pois no ensaio de *creep* dinâmico há um critério de parada quando a mistura atinge 10.000 ciclos, enquanto que para o ensaio de Referência foi estabelecido um limite mínimo de 600 ciclos, a partir de uma série de ensaios realizados por Choi (2013). Este protocolo de ensaio, que foi oriundo do trabalho desenvolvido por Choi (2013), já é uma especificação norte-americana em avaliação, AASHTO TP XX-XX - *Determining the Rutting Parameters of Asphalt Concrete from Triaxial Stress Sweep* (TSS)

Tests, para a análise de deformação permanente em laboratório de misturas asfálticas. Como já mencionado no Capítulo 2, pesquisadores avaliaram que a pressão de confinamento reproduz mais adequadamente as tensões e as deformações da realidade de campo. Os ensaios do tipo TRLPD sugerem que a mistura asfáltica esteja em estado confinado, o qual considera os efeitos das zonas passivas sobre a zona ativa, como já visto anteriormente.

Assim, também é proposto neste trabalho avaliar os níveis de deformação permanente em todas as misturas a partir dos ensaios de *creep* dinâmico e Referência (TRLPD), com o objetivo de avaliar o comportamento de cada uma delas sob a condição uniaxial de carga repetida e condição triaxial de carga repetida (estado de confinamento). É importante salientar que a referida proposta AASHTO TP XX-XX menciona que está desenvolvendo e irá disponibilizar uma equação e uma tabela que correlacione as temperaturas de ensaio (T_L , T_I e T_H) com o PG do ligante. As diferenças entre estes ensaios são apresentadas na Tabela 3.19.

Tabela 3.19 - Diferenças entre o ensaio de *creep* dinâmico e o ensaio de Referência.

Ensaio	<i>Creep</i> dinâmico	Referência - TRLPD
Tempo de carregamento (s)	0,1	0,4
Período de repouso (s)	0,9	10
Temperatura (°C)	60	T_H
Tensão atuante (kPa)	204	759
Tensão desvio (kPa)	-	690
Pressão de confinamento (kPa)	-	69
Número de ciclos	≤ 10.000	≥ 600
Número de CP's por mistura	3	3

Fonte: Autor deste trabalho.

3.3 Aplicação e compreensão do *Shift Model*

O *Shift Model* também está inserido na proposta de norma AASHTO TP XX - XX, uma vez que os parâmetros desse modelo são utilizados para a previsão de desempenho de pavimento a partir do programa LVECD. Choi (2013) avalia que o *Shift Model* correlaciona fisicamente dois princípios de superposição, i.e., o princípio da superposição tempo-temperatura (t-TS) do qual é determinado o *shift factor* do tempo de carregamento reduzido

(a_{ξ_p}), e o princípio da superposição tempo-tensão (t-SS) que é usado para calcular o *shift factor* de tensão vertical (a_{σ_d}). A soma desses dois fatores resulta no *shift factor* total (a_{total}). A seguir serão descritos os procedimentos para obtenção destes fatores.

Como já mencionado, o *Shift Model* é derivado do modelo da taxa proposto por Subramanian (2011), sendo a sua análise baseada em princípios viscoplásticos. O modelo também é considerado uma lei de potência avançada (Choi, 2013). A região secundária engloba o maior número de ciclos, assim como nos modelos clássicos. O expoente $(1-\alpha)$ é a inclinação da curva da zona secundária na escala log-log. Esta inclinação representa o endurecimento do material. Altos valores de α indicam baixas inclinações, ou seja, as deformações permanentes se desenvolvem lentamente. O parâmetro B determina o nível de deformação permanente juntamente com o valor de α .

O parâmetro A contribui para o desenvolvimento inicial de deformação, e C determina a forma de curvatura e em que ponto a curvatura começará. Ou seja, o valor de C está associado com o limiar onde a região secundária inicia. Logo, A e C governam a forma de desenvolvimento da deformação assim como o seu início na hora do ensaio. Quando o N for pequeno, A e C tem um grande efeito sobre a evolução da deformação permanente. O modelo incremental viscoplástico para a análise de deformação permanente é expresso pela Equação 2.27, repetida uma vez mais a seguir.

$$\varepsilon_{vp} = \frac{A + BN}{(C + N)^\alpha} \quad (2.27)$$

A modelagem proposta deve ser seguida a partir de dados obtidos dos ensaios de Referência (TRLPD) e MSS. Do tratamento de tais valores se obtém a curva deformação permanente (ε_{vp}) versus número de ciclos (N), assim como os *shift factors* e os parâmetros de regressão do modelo que serão vistos e calculados a seguir. Como mencionado no Capítulo 2, o modelo incremental viscoplástico permite que as integrais assumam valores constantes quando atingem a condição de estado estacionário. Logo os parâmetros A , B e C assumem valores numéricos fixos. Para desenvolver o modelo é necessário o uso de programas voltados para o cálculo numérico, como o MATLAB. O Excel também pode ser usado para a aplicação do modelo. Nesta pesquisa foi desenvolvido um código em MATLAB como rotina de programação para a aplicação do *Shift Model*. Para todos os detalhes sobre este código o leitor

deve reportar-se ao Apêndice B desta dissertação. As etapas a seguir descrevem a aplicação do *Shift Model* por meio do Excel.

3.3.1 Parâmetros A , B , C e α

Os parâmetros A , B , C e α são calculados para a construção da curva do *Shift Model*. Ao término do ensaio de Referência (TRLPD) deve-se exportar do arquivo gerado as colunas que contenham os valores de deformação permanente (\mathcal{E}_{vp}) e número de ciclos (N), e plotar $\mathcal{E}_{vp} \times N$. Em seguida deve-se plotar um gráfico de ajuste inicial ($\mathcal{E}_{vp} \times N$) com valores iniciais atribuídos para A , B , C e α para as misturas asfálticas do tipo CBUQ. Os valores iniciais são sugeridos pela proposta de norma AASHTO TP XX-XX, conforme apresentados pela Tabela 3.20. Note que o parâmetro A assume valor igual a zero, pois está associado ao nível inicial de deformação permanente para $N = 1$. Os valores propostos pela AASHTO TP XX-XX para B , C e α permitiram que Choi (2013) obtivesse bons ajustes entre as curvas dos ensaios Referência e as curvas de modelagem. Ou seja, esses valores representam uma condição inicial de modelagem satisfatória (melhor ajuste de pontos). No entanto, vale ressaltar que a modelagem pode apresentar melhor comportamento para valores iniciais diferentes aos da Tabela 3.20, e isso vai depender da curva de cada material. Assim, o modelo proposto por Choi (2013) assume a forma da Equação 3.1.

$$\mathcal{E}_{vp} = \frac{BN}{(C + N)^\alpha} \quad (3.1)$$

Tabela 3.20 - Valores iniciais para o ajuste do *Shift Model*.

Parâmetro	α	A	B	C
Limite superior	0,85	0	$1,0 \times 10^{-3}$	10
Limite inferior	0,70	0	$1,0 \times 10^{-4}$	0

Fonte: Adaptada da AASHTO TP XX-XX.

Após a construção do gráfico de ajuste inicial, os parâmetros são calibrados pela minimização do erro logarítmico ($Error_{\log}$). A função Solver no Excel é capaz de minimizar o $Error_{\log}$. A Equação 3.2 representa a função $Error_{\log}$.

$$Error_{\log} = \sum_{i=1}^N \log(|\varepsilon_{vp,i}^{medida} - \varepsilon_{vp,i}^{ajustada}|) \quad (3.2)$$

onde $Error_{\log}$: função erro entre a curva obtida no ensaio de Referência e a curva do gráfico de ajuste inicial;

N : número de ciclos do ensaio de Referência;

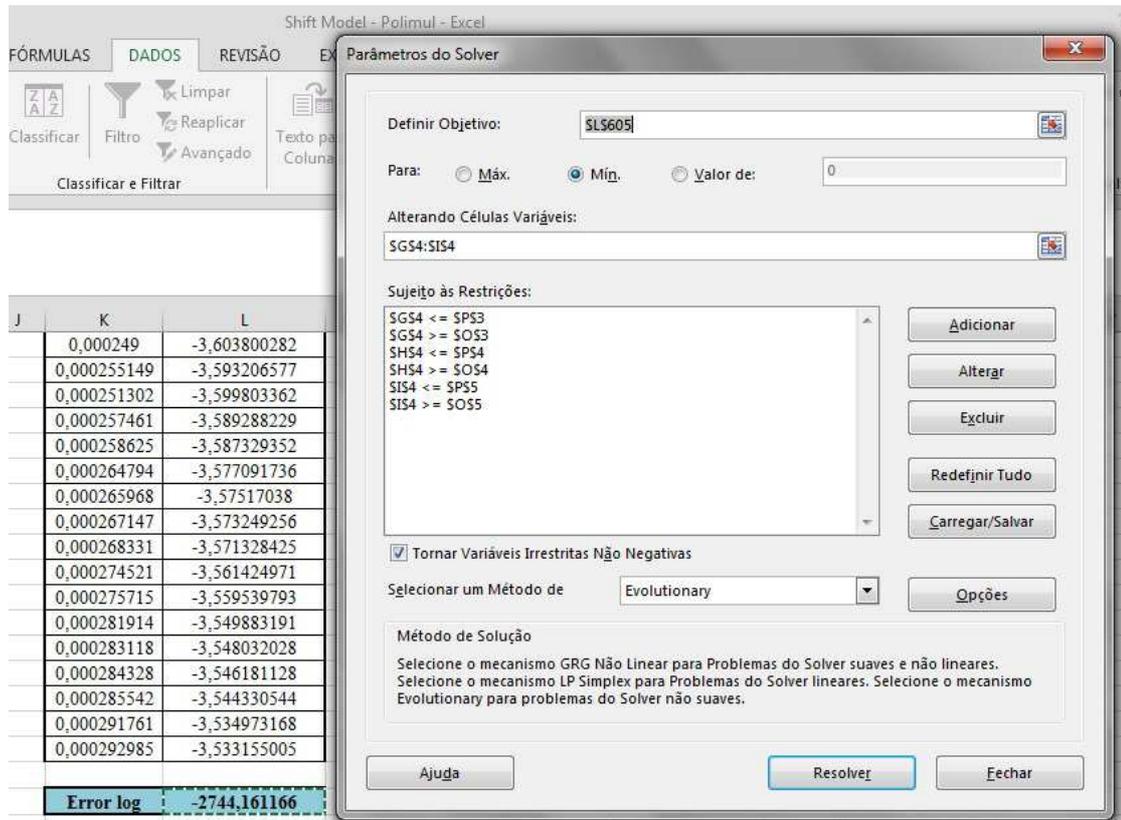
$\varepsilon_{vp,i}^{medida}$: deformação permanente obtida no ensaio de Referência; e

$\varepsilon_{vp,i}^{ajustada}$: deformação permanente obtida no gráfico de ajuste inicial.

Após a minimização da função $Error_{\log}$ são obtidos os parâmetros calibrados B , C e α , e juntamente com o N do ensaio de Referência é então construída a curva do *Shift Model* a partir da Equação 3.1.

A configuração do Solver está exemplificada na Figura 3.12. No campo “Definir Objetivo” deve-se inserir a célula equivalente ao $Error_{\log}$. No campo “Alterando Células Variáveis” são inseridas as células referentes aos parâmetros B , C e α que serão ajustados após o Solver minimizar o erro. No campo “Sujeito às Restrições” são adicionados os valores dos limites conforme a Tabela 3.20.

Figura 3.12 - Calibração dos parâmetros através da função Solver no Excel.



Fonte: Autor deste trabalho.

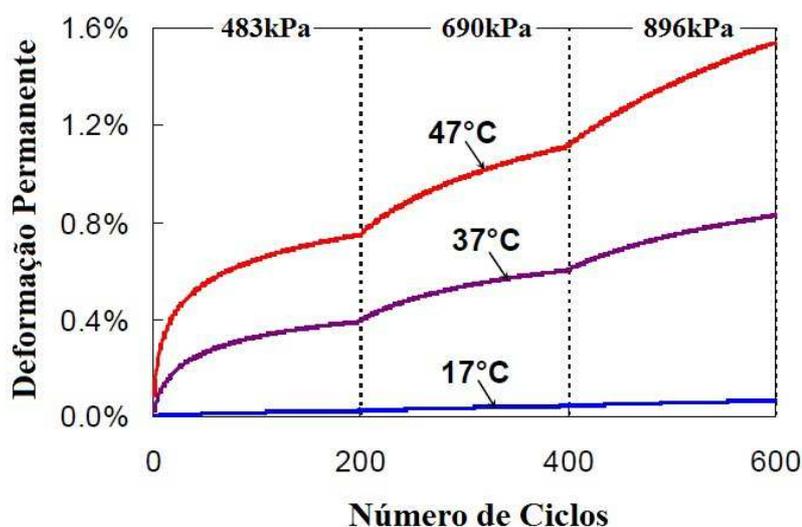
Com base na Figura 3.12, os parâmetros B , C e α correspondem respectivamente às células “G4”, “H4” e “I4”. A célula “L605” corresponde à Função $Error_{log}$ (Equação 3.2). O limites inferior e superior do parâmetro B ($1,0 \times 10^{-4}$ e $1,0 \times 10^{-3}$) correspondem, respectivamente, às células “O3” e “P3”; os limites inferior e superior de C (0 e 10) são, respectivamente, às células “O4” e “P4” e os limites inferior e superior do parâmetro α (0,70 e 0,85) equivalem, respectivamente, às células “O5” e “P5”.

3.3.2 Número de ciclos reduzido

O número de ciclos reduzido (N_{red}) representa o número de ciclos inicial e final no ensaio de Referência onde ocorrem as deformações permanentes inicial e final para os respectivos números de ciclo inicial e final de cada bloco de carregamento no ensaio MSS. A Figura 2.14, no Capítulo 2 representa esquematicamente a correlação entre o número de ciclos reduzido no início e no final em cada bloco de carregamento. Primeiramente são obtidos do

ensaio MSS os valores de deformação permanente inicial (ϵ_{vp}^B) e final (ϵ_{vp}^E), assim como o número de ciclos inicial (N_{block}^B) e final (N_{block}^E) para cada bloco de carregamento. Como já mencionado, cada ensaio MSS é conduzido a uma temperatura específica com três níveis de tensão (483, 690 e 897kPa), o que totaliza três ensaios MSS por mistura. Em cada nível de tensão são aplicados 200 ciclos até que o ensaio seja encerrado no ciclo 600. A Figura 3.13 exemplifica a condição do ensaio MSS para cada nível de temperatura com dados obtidos por Choi (2013) para a mistura NY9.5B avaliada em seu trabalho. A Tabela 3.21 contém os valores dos números de ciclos iniciais e finais por bloco de carregamento, onde o N_{block}^B está associado ao início de cada bloco (*begin*) e o N_{block}^E está associado ao final de cada bloco (*end*).

Figura 3.13 - Resultados dos ensaios MSS (Mistura NY9.5B).



Fonte: Adaptada de Choi (2013).

Tabela 3.21 - Número de ciclos iniciais e finais para cada bloco de carregamento dos ensaios MSS.

Ensaio MSS (17°C, 37°C e 47°C)	483kPa (70psi)		690kPa (100psi)		897kPa (130psi)	
	1° Bloco		2° Bloco		3° Bloco	
	N_{block}^B	N_{block}^E	N_{block}^B	N_{block}^E	N_{block}^B	N_{block}^E
	1	200	201	400	401	600

Fonte: Autor deste trabalho.

A partir da obtenção dos valores de deformação permanente no início e no final de cada bloco de carregamento é necessário um valor de partida para o número de ciclos inicial e final de cada bloco de carregamento na referida tensão. As Equações 3.3 e 3.4 são usadas para calcular esta estimativa.

$$N_{guess}^B = \left(\frac{B}{\epsilon_{vp}^B} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (3.3)$$

$$N_{guess}^E = \left(\frac{B}{\epsilon_{vp}^E} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (3.4)$$

onde N_{guess}^B : estimativa inicial do número de ciclos para calcular N_{block}^B ;
 N_{guess}^E : estimativa inicial do número de ciclos para calcular N_{block}^E ;
 B e α : parâmetros calibrados do modelo;
 ϵ_{vp}^B : deformação permanente inicial de cada bloco de carregamento; e
 ϵ_{vp}^E : deformação permanente final de cada bloco de carregamento.

O número de ciclos reduzido (N_{red}) é calculado pela minimização do $Error_{N_{red}}$. O Solver nesse caso também pode ser utilizado para minimizar esse erro e calcular o número de ciclos reduzido para o começo de cada bloco e para o final de cada bloco, na referente condição de carregamento. No campo “Definir Objetivo” é inserida a célula equivalente ao $Error_{N_{red}}$. No campo “Alterando Células Variáveis” é inserida a célula correspondente ao N_{guess} , que passará a ser o N_{red} após o Solver minimizar o erro. Neste caso não é necessário utilizar o campo “Sujeito às Restrições”. A minimização do erro deve ser realizada tanto para o número de ciclos inicial quanto para o número de ciclos final em cada bloco de carregamento. O número de ciclos reduzido é obtido pela minimização da função $Error_{N_{red}}$ de acordo com as Equações 3.5 e 3.6.

$$Error_{red}^B = \left| \varepsilon_{vp}^B - \frac{BN}{(C+N)^\alpha} \right| \quad (3.5)$$

$$Error_{red}^E = \left| \varepsilon_{vp}^E - \frac{BN}{(C+N)^\alpha} \right| \quad (3.6)$$

onde $Error_{red}^B$: erro para calcular o N_{red}^B do referido bloco de carregamento;
 $Error_{red}^E$: erro para calcular o N_{red}^E do referido bloco de carregamento; e
 B, C e α : parâmetros calibrados do modelo.

3.3.3 Shift factor total

O cálculo do número de ciclos reduzido é condição necessária para a obtenção do *shift factor* total (a_{total}), o qual é definido como a distância horizontal logarítmica, por meio da variação do número de ciclos reduzido no ensaio de Referência pela variação do número de ciclos por bloco de carregamento no ensaio MSS. O *shift factor* total é calculado a partir da Equação 3.7.

$$a_{total} = \log \left(\frac{N_{red}^E - N_{red}^B}{N_{block}^E - N_{block}^B} \right) \quad (3.7)$$

onde a_{total} : *shift factor* total;
 N_{red}^B : número de ciclo reduzido inicial de cada bloco de carregamento;
 N_{red}^E : número de ciclo reduzido final de cada bloco de carregamento;
 N_{block}^B : número de ciclo inicial do bloco de carregamento; e
 N_{block}^E : número de ciclo final do bloco de carregamento.

Vale lembrar que nos ensaios MSS serão calculados nove *shift factors* totais por mistura, uma vez que são três níveis de temperatura e cada nível possui três blocos de carregamento. O *shift factor* total onde a tensão desvio é 690kPa (100psi) passa a ser *shift factor*

do tempo de carregamento reduzido (a_{ξ_p}) na respectiva temperatura, ou seja, serão determinados três *shift factors* para o tempo de carregamento reduzido (a_{ξ_p}) por mistura.

3.3.4 Tempo de carregamento reduzido

O tempo de carregamento reduzido é a correlação física do efeito da temperatura e do tempo de carregamento nos ensaios TSS (0,4s). Ou seja, a partir dos três níveis de temperatura é possível utilizar um *shift factor* tempo-temperatura similar ao do princípio de construção de curvas mestras de $|E^*|$. O cálculo desta redução é representada pela Equação 3.8. Para cada uma das três temperaturas será calculado um tempo de carregamento reduzido na tensão desvio equivalente a 690kPa (100psi).

$$\xi_p = \frac{t_p}{a_T} \quad (3.8)$$

onde ξ_p : tempo de carregamento reduzido (segundos);
 t_p : tempo de carregamento (0,4s) para o ensaio TSS; e
 a_T : *shift factor* tempo-temperatura para cada temperatura de ensaio; a temperatura de referência será a maior das três temperaturas (T_H).

A determinação do *shift factor* tempo-temperatura pode ser realizada pelo princípio da construção de curvas mestras, conforme o método de Arrhenius. A temperatura de referência será de 47°C. As temperaturas de análise serão 17°C, 37°C e 47°C, porém é necessário calcular a média para cada temperatura em cada ciclo de carregamento, uma vez que a UTM - 25 não estabiliza perfeitamente os níveis de temperatura desejados. Os valores individuais de temperatura em cada ciclo de carregamento são obtidos da planilha de dados gerados ao término de cada ensaio MSS. O *shift factor* tempo-temperatura é determinado na condição onde a tensão desvio é 690kPa (100psi). Coutinho *et al.* (2010b) constataram que a equação de Arrhenius (Equação 3.9) apresentou melhor aplicabilidade para o cálculo dos fatores de deslocamento para misturas asfálticas e sugeriram o valor de 12.000 como constante do material para misturas asfálticas avaliadas com agregados do estado do Ceará e com o CAP 50/70.

$$\log a_T = \frac{E_a}{2,303R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) = C \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad (3.9)$$

onde E_a : energia de ativação;
 R : constante dos gases ideais (8,314J/mol);
 T : temperatura de análise (K);
 T_{ref} : temperatura de referência (320K); e
 C : constante do material.

3.3.5 Parâmetros de regressão da função ajuste do tempo de carregamento reduzido

Os parâmetros de regressão da função ajuste do tempo de carregamento reduzido estão associados ao princípio da superposição tempo-temperatura (t-TS). Estes parâmetros representam coeficientes que fisicamente correlacionam o *shift factor* total a tempos variados de carregamento. Os parâmetros são calculados por regressão não-linear. Cada tempo de carregamento reduzido determinado no item 3.4.4, assim como cada *shift factor* do tempo de carregamento reduzido determinado no item 3.4.3 são inseridos na função ajuste do tempo de carregamento reduzido (Equação 3.10). Assim, são geradas três equações para a função ajuste do tempo de carregamento reduzido.

$$a_{\xi_p} = a_1 (\xi_p)^{a_2} + a_3 \quad (3.10)$$

onde a_{ξ_p} : *shift factor* do tempo de carregamento reduzido;
 ξ_p : tempo de carregamento reduzido; e
 a_1 , a_2 e a_3 : parâmetros de regressão da função ajuste do tempo de carregamento reduzido.

O valor de cada parâmetro pode ser calculado através da função Solver. Neste trabalho é sugerido que o Solver realize a minimização da função erro quadrático entre os valores do *shift factor* do tempo de carregamento reduzido (a_{ξ_p}) e os valores do *shift factor* do

tempo de carregamento reduzido estimado ($a_{\xi_p}^{estimado}$). Primeiro é necessário atribuir valores iniciais aos parâmetros a_1 , a_2 e a_3 para que sejam geradas três equações estimadas da função ajuste do tempo de carregamento reduzido, mantendo os mesmos valores para o tempo de carregamento reduzido (ξ_p) calculados no item 3.4.4. Assim, o Solver deve ser configurado da seguinte forma: no campo “Definir Objetivo” inserir a célula equivalente ao Erro quadrático. No campo “Alterando Células Variáveis” são inseridas as células referentes aos parâmetros a_1 , a_2 e a_3 . No campo “Sujeito às Restrições” são adicionados os valores dos limites sugeridos pela Tabela 3.22. A função erro quadrático é expressa pela Equação 3.11. Após a minimização do erro quadrático são gerados novos valores para a_1 , a_2 e a_3 , os quais serão os parâmetros de regressão do modelo.

$$erro_{quadrático} = \sum_{i=1}^3 \left(a_{\xi_p} - a_{\xi_p}^{estimado} \right)^2 \quad (3.11)$$

onde $erro_{quadrático}$: função erro quadrático;

a_{ξ_p} : *shift factor* do tempo de carregamento reduzido; e

$a_{\xi_p}^{estimado}$: *shift factor* do tempo de carregamento reduzido estimado.

Tabela 3.22 - Limites sugeridos para os parâmetros a_1 , a_2 e a_3 .

Parâmetro	a_1	a_2	a_3
Límite superior	10	1,0	-1,0
Límite inferior	1,0	$1,0 \times 10^{-3}$	-10

Fonte: Autor deste trabalho.

Os limites sugeridos para os parâmetros a_1 , a_2 e a_3 seguem o mesmo princípio de sugestão para os parâmetros B , C e α . Dessa forma, observou-se que os valores sugeridos para esses limites não apresentaram restrições na solução, ou seja, esses limites corresponderam a um valor no qual a função erro quadrático não apresentava mais redução (otimização da função), a partir de inúmeras análises simuladas nesta dissertação.

3.3.6 Parâmetros de regressão da função ajuste de tensão vertical

O princípio da superposição tempo-tensão (t-SS) avalia o comportamento da mistura asfáltica a diferentes níveis de tensão. Este princípio está associado ao *shift factor* de tensão vertical (a_{σ_v}), o qual é obtido pela Equação 3.12, visto que o a_{total} e o a_{ξ_p} já foram calculados.

$$a_{\sigma_v} = a_{total} - a_{\xi_p} \quad (3.12)$$

onde a_{σ_v} : *shift factor* de tensão vertical;

a_{total} : *shift factor* total; e

a_{ξ_p} : *shift factor* do tempo de carregamento reduzido.

Cada ensaio MSS, por CP, tem um nível de temperatura com três níveis de tensão (483kPa, 690kPa e 897kPa), logo o *shift factor* de tensão vertical (a_{σ_v}) será a média de cada *shift factor* de tensão vertical para cada nível de temperatura. Ou seja, para a tensão de 483kPa (70psi) tomam-se os *shift factors* de tensão vertical nos três níveis de temperatura (17°C, 37°C e 47°C) e retira-se a média. Repete-se então o procedimento para os níveis de tensão 690kPa (100psi) e 897kPa (130psi). No total são obtidos três *shift factors* de tensão vertical. Em seguida calcula-se a tensão vertical (σ_v) que é a soma do nível de tensão desvio no referido bloco de carregamento com a pressão confinante, 69kPa (10psi). Também são obtidas três tensões verticais (σ_v). Assim, os parâmetros de regressão da função ajuste de tensão vertical são obtidos pela Equação 3.13.

$$a_{\sigma_v} = b_1 \left(\frac{\sigma_v}{P_a} \right)^{b_2} + b_3 \quad (3.13)$$

onde a_{σ_v} : *shift factor* de tensão vertical;

- σ_v : tensão vertical (soma da tensão desvio e pressão de confinamento nos ensaios TSS);
- P_a : pressão atmosférica (101,325kPa ou 14,696psi); e
- b_1, b_2 e b_3 : parâmetros de regressão para a função de tensão vertical.

O valor de cada um destes parâmetros de regressão também pode ser calculado através da função Solver. O mesmo procedimento utilizado para determinar os parâmetros de regressão da função ajuste do tempo de carregamento reduzido, item 3.3.5, deve ser repetido. A Tabela 3.23 contém os valores de limites sugeridos para os parâmetros, e a Equação 3.14 representa a função erro quadrático. Após o Solver minimizar o erro quadrático são gerados novos valores para b_1, b_2 e b_3 , os quais serão os parâmetros de regressão do modelo para a função de tensão vertical.

$$erro_{quadrático} = \sum_{i=1}^3 (a_{\sigma_v} - a_{\sigma_v}^{estimado})^2 \quad (3.14)$$

- onde $erro_{quadrático}$: função erro quadrático;
- a_{σ_v} : *shift factor* de tensão vertical; e
- $a_{\sigma_v}^{estimado}$: *shift factor* de tensão vertical estimado.

Tabela 3.23 - Limites sugeridos para os parâmetros b_1, b_2 e b_3 .

Parâmetro	b_1	b_2	b_3
Limite Superior	10	1,0	-1
Limite inferior	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$	-10

Fonte: Autor deste trabalho.

Os limites superiores e inferiores sugeridos para os parâmetros b_1, b_2 e b_3 seguem o mesmo princípio de sugestão para os parâmetros a_1, a_2 e a_3 , e também foram propostos a partir de inúmeras análises simuladas neste trabalho.

3.4. Ensaio de *creep* dinâmico

Para a caracterização mecânica das misturas com relação à resistência à deformação permanente foram também realizados ensaios de *creep* dinâmico sem confinamento, conforme Witczak *et al.* (2002), e as condições deste ensaio constam na Tabela 3.24. Vale ressaltar que o ensaio de *creep* dinâmico é capaz de apresentar um *ranking* de misturas, ou seja, esse ensaio tem o potencial de selecionar os melhores materiais quanto à resistência à deformação permanente. Todas as misturas adotadas nesta pesquisa foram conduzidas até a obtenção da taxa mínima de deformação, onde é determinado o FN ou até o ciclo de número 10.000. Desse ensaio também foram obtidas as curvas de número de ciclos de carga *versus* deformação permanente acumulada para avaliar a evolução da deformação ao longo do tempo. Os ensaios de *creep* dinâmico foram conduzidos no LMP/UFC por meio da UTM - 25, conforme mostram as Figuras 3.14 (a) e (b). A Figura 3.14(a) mostra um CP sendo ensaiado e a Figura 3.14(b) é uma captura de tela do ensaio de *creep* dinâmico sem confinamento após o rompimento do CP, FN.

Tabela 3.24 - Condições do ensaio de *creep* dinâmico.

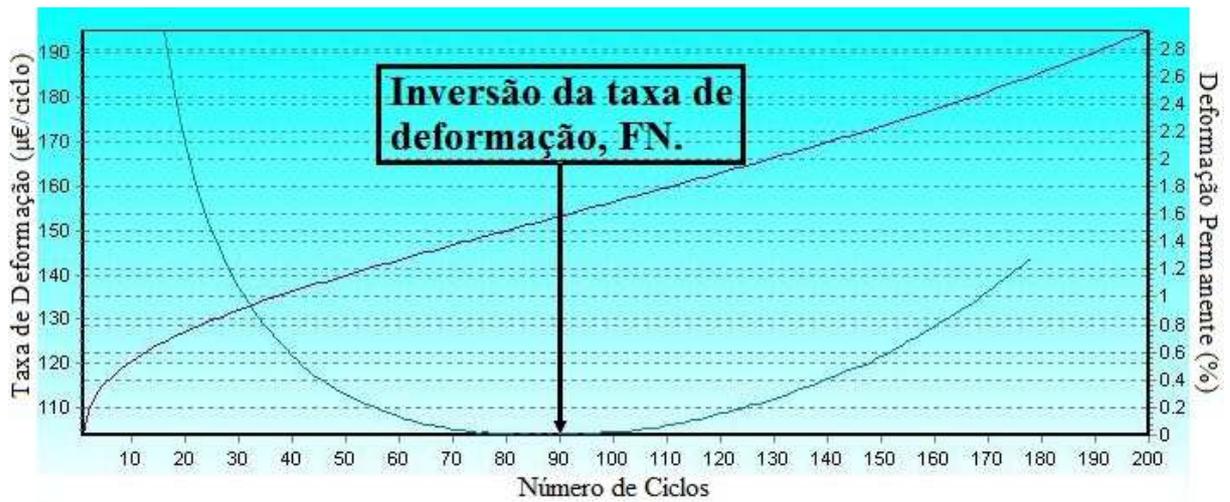
Condição	Valor
Tempo de carregamento (s)	0,1
Período de repouso (s)	0,9
Temperatura (°C)	60
Tensão atuante (kPa)	204
Número de ciclos	≤ 10.000
Número de CP's por mistura	3

Fonte: Autor deste trabalho.

Figura 3.14 - Ensaio de *creep* dinâmico sem confinamento: (a) CP durante o ensaio e (b) captura de tela com CP apresentando ruptura, FN.



(a)



(b)

Fonte: Autor deste trabalho.

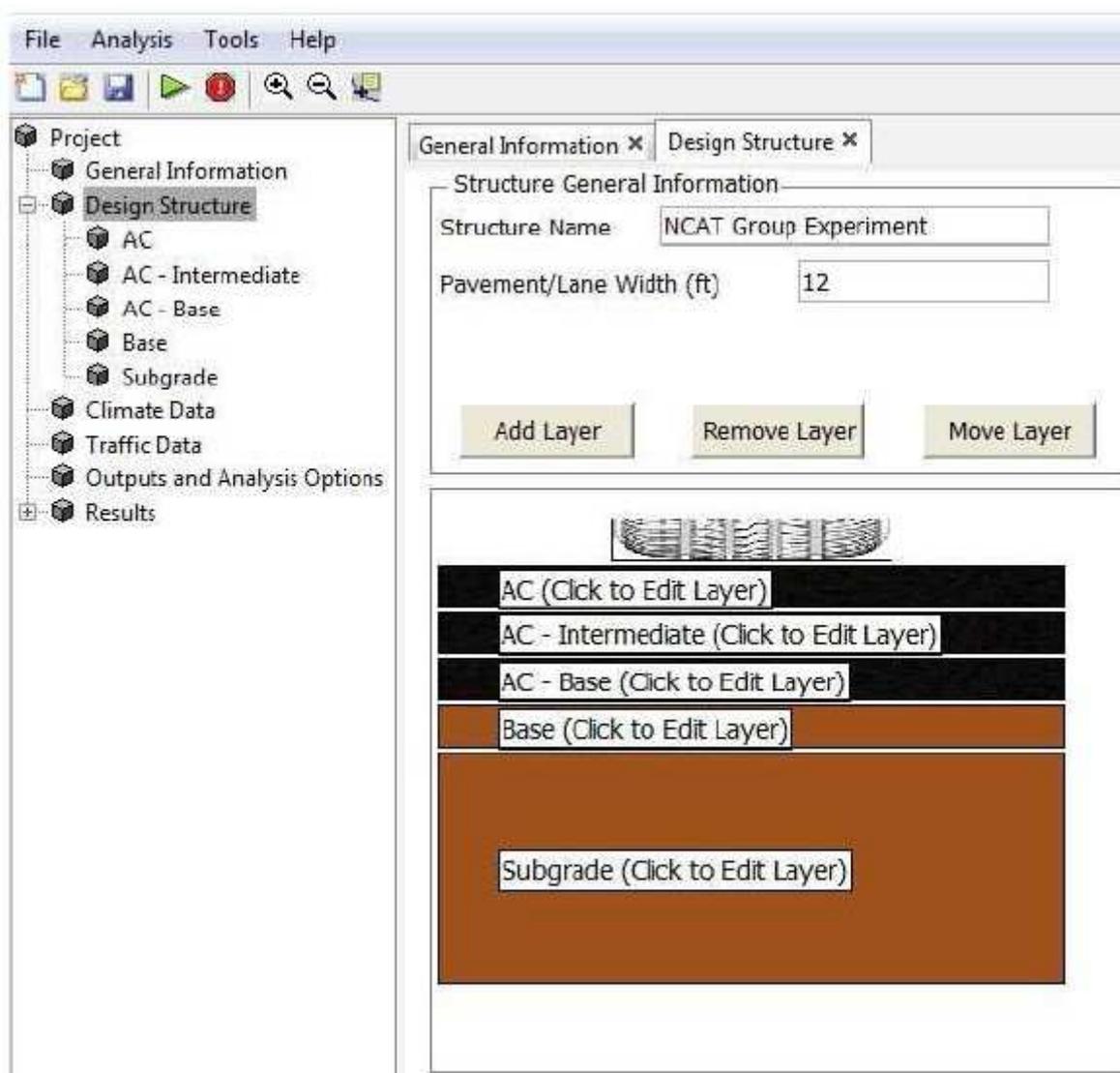
3.5. Utilização do programa *Layered Viscoelastic Continuum Damage (LVECD)*

O programa LVECD, desenvolvido na NCSU, como já citado no Capítulo 2, é uma ferramenta para previsão de desempenho de pavimentos. Este programa é capaz de capturar efeitos da viscoelasticidade, temperatura (efeitos da temperatura nos níveis de tensão e mudanças nas propriedades viscoelásticas) e o movimento do tráfego (carregamento). O

LVECD é capaz de simular curvas de desempenho de pavimentos por um período de até 20 anos.

Para essa dissertação, a análise no LVECD (versão 1.1 Beta) foi realizada na Petrobras/Cenpes. Os dados de entrada necessários para a simulação de deformação permanente são fornecidos a partir da completa aplicação do *Shift Model*. Os parâmetros da curva de referência (α , B e C) e os coeficientes da função de ajuste (a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 e b_3) são os *input* necessários para a criação da curvas de desempenho de deformação permanente ao longo do período em anos desejado. A rigidez do material também é considerada pelo LVECD. Assim, os valores do módulo dinâmico e ângulo de fase também servem como *input* para a simulação da curva de deformação permanente, uma vez que a mistura asfáltica possui um comportamento viscoelástico (valores até 75 microstrains). O ensaio de $|E^*|$ foi realizado de acordo com a AASHTO T 342 - 11 (2011) - *Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)*. A Figura 3.15 mostra a estrutura geral do LVECD.

Figura 3.15 - Captura de tela do LVECD.

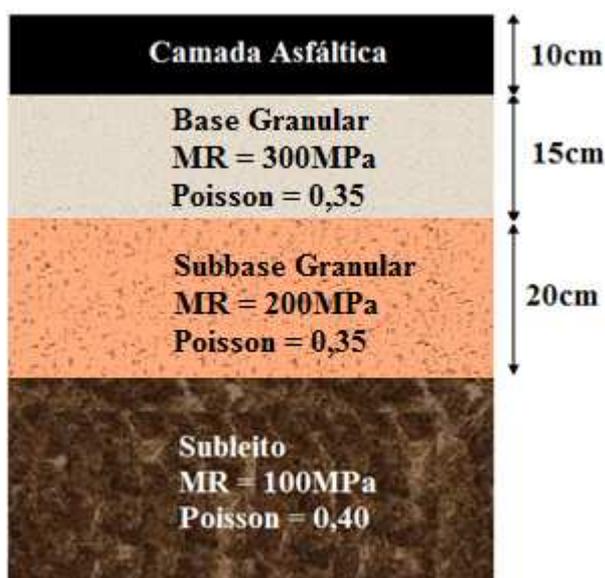


Fonte: Adaptada de LaCroix (2013).

As simulações foram feitas a partir de condições já observadas e avaliadas para a realidade de rodovias brasileiras. As mesmas condições de simulações foram aplicadas para dois tipos de clima, ou seja, o clima da região Sul e o da região Sudeste. Os dados referentes às camadas granulares são oriundos de materiais da região Sudeste. Foram selecionados solos robustos (em termos de deformação permanente), assim os níveis de deformação das camadas granulares foram desprezíveis. As seguintes considerações foram aplicadas aos dois tipos de clima:

- a) o período das simulações foi de 10 anos;
- b) as velocidades de veículos consideradas forem de 80km/h e 25km/h, com o propósito de verificar o modelo e, também, a severidade de cargas lentas na deformação permanente;
- c) o número de passadas do eixo padrão (8,2 toneladas, roda dupla) total de $6,6 \times 10^7$, ou seja, um AADTT (*Average Annual Daily Truck Traffic*) de 18.000 eixos. A pressão de inflação dos pneus foi de 800kPa, cujas cargas foram consideradas retangulares na razão 1,57, uma vez que a utilização de cargas retangulares torna a análise mais próxima de campo quando comparada a cargas circulares (LaCroix, 2013); e
- d) a estrutura utilizada foi composta por uma camada de revestimento de 10cm; base granular de 15cm com 300MPa de rigidez e coeficiente de Poisson de 0,35; subbase granular de 20cm com 200MPa de rigidez e coeficiente de Poisson de 0,35; tudo sobre um subleito de 100MPa de rigidez e coeficiente de Poisson de 0,40. A Figura 3.16 representa a estrutura do pavimento que foi analisada no programa LVECD.

Figura 3.16 - Representação da estrutura do pavimento analisada no LVECD.



Fonte: Autor deste trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção foi dividida em quatro subitens: (i) ensaios mecânicos, (ii) comparação entre resultados dos ensaios de Referência (TRLPD) e *creep* dinâmico sem confinamento, (iii) análise do *Shift Model* e (iv) simulação de desempenho no *Layered Viscoelastic Continuum Damage* (LVECD). O capítulo apresenta as curvas de deformação permanente *versus* número de ciclos para todos os ensaios mecânicos realizados. Também trata a análise dos níveis de deformação de cada mistura, considerando as diferentes condições de cada ensaio empregado. Além disso, o capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação do *Shift Model* e a análise de cada um dos parâmetros desse modelo. E, por fim, são apresentadas as curvas de simulação de campo quanto ao desempenho da deformação permanente por um período de 10 anos, provenientes da análise no programa LVECD.

4.1 Ensaios mecânicos

4.1.1 Resultados do protocolo de ensaio

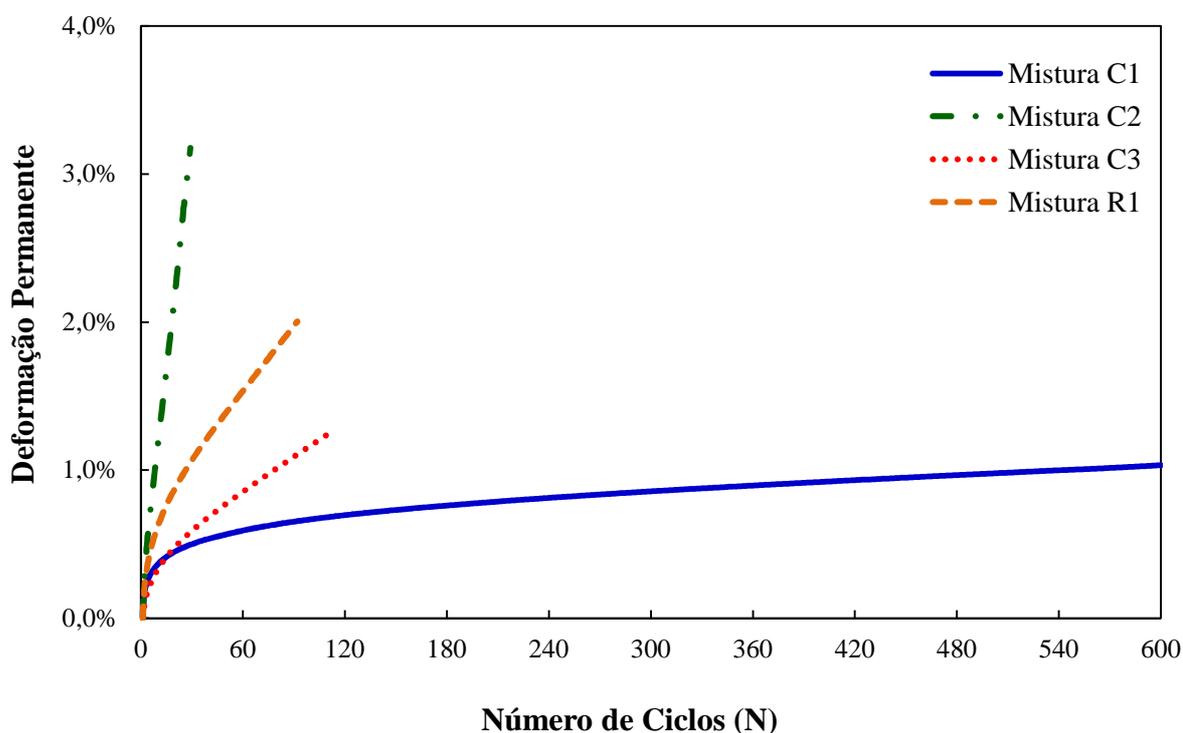
As quatro misturas investigadas nesta pesquisa foram submetidas ao protocolo de ensaio conforme a proposta de norma norte-americana AASHTO TP XX-XX - *Determining the Rutting Parameters of Asphalt Concrete from Triaxial Stress Sweep (TSS) Tests*. Como já mencionado, esta proposta de especificação é derivada do trabalho desenvolvido por Choi (2013). Assim, os resultados aqui analisados são provenientes das condições de ensaio voltadas para a realidade norte-americana, a qual pode não ser a mais adequada à realidade brasileira em termos de tensões desvio, níveis de temperatura, frequências de carregamento/descarregamento e pressão de confinamento.

Resultados do ensaio de Referência

Inicialmente as misturas C1, C2, C3 e R1 foram submetidas ao ensaio de Referência (ensaio do tipo TRLPD) do qual é possível obter a curva de referência. O critério de parada deste ensaio é o mínimo de 600 ciclos de carregamento. Assim, pode-se dizer que as misturas devam atingir 600 ciclos de carregamento na curva de referência sem a ruptura, para a aplicação completa do *Shift Model*. Quando a mistura não atende a este critério mínimo, os ensaios MSS

(ensaios confinados realizados sob diferentes condições de tensão desvio, período de repouso e níveis de temperatura, e que servem para a obtenção de todos os parâmetros do *Shift Model*) não são realizados, por motivo do surgimento da zona terciária, o qual não permite a calibração do modelo. A Mistura C1, idealizada no LMP/UFC, foi a única a atingir os 600 ciclos no ensaio de Referência. As demais misturas apresentaram FN antes dos 600 ciclos. A Figura 4.1 correlaciona a curva obtida após o ensaio de Referência para as quatro misturas investigadas.

Figura 4.1 - Curvas do ensaio de Referência - misturas C1, C2, C3 e R1.



Fonte: Autor deste trabalho.

Observa-se que a Mistura C1 apresentou o menor nível de deformação permanente e que a Mistura C2 atingiu o maior nível de deformação no menor número de ciclos. Assim, a Mistura C2 pode ser considerada a mistura menos resistente quanto à deformação permanente. A Mistura C1 usou um ligante modificado pelo polímero Polimul S-74, e esta modificação tornou a mistura mais resistente quanto à deformação permanente, uma vez que este polímero tem propriedades elastoméricas o que resultou em alta flexibilidade durante as aplicações de cargas. Polímeros elastoméricos possuem capacidade de deformar quando submetidos a uma determinada tensão, mudando de forma. Porém, ao cessar a tensão, estes possuem a capacidade de voltar à forma original, o que é bom para combater defeitos como a fadiga, como também

pode ser uma alternativa para combater a deformação permanente em misturas asfálticas. Portanto, a Mistura C1 não apresentou FN até os 600 ciclos, e o ensaio de Referência foi interrompido no ciclo 600. A realização do ensaio de Referência para uma mistura que atinja os 600 ciclos sem ruptura é de aproximadamente duas horas por CP e, portanto, é recomendado o término do ensaio para que haja otimização do tempo total de aplicação do protocolo de ensaio. As misturas C3 e R1 apresentaram FN próximos, porém com valores de deformações bastante distintos. A Tabela 4.1 detalha o FN, o teor de CAP e o respectivo valor de deformação para cada mistura no ensaio de Referência, para a média de 3 CP's por mistura.

Tabela 4.1 - Resultados do FN e o respectivo valor de deformação para o ensaio de Referência - misturas C1, C2, C3 e R1.

Ensaio de Referência (TRLPD)				
Mistura	Teor de CAP (%)	Dosagem	FN	Deformação permanente (%)
C1	4,5	Superpave	Não atingiu ⁽¹⁾	1,034
C2	6,0	Marshall	29	3,176
C3	5,7	Marshall	110	1,245
R1	5,5	Superpave	92	2,003

⁽¹⁾ Critério de parada do ensaio, 600 ciclos.

Fonte: Autor deste trabalho.

A mistura C1 apresentou o menor índice de deformação no ensaio de Referência. As misturas C1 e R1, que foram dosadas de acordo com a metodologia Superpave, apresentaram os menores teores de CAP (Mistura C1 com 4,5% e Mistura R1 com 5,5%). A Mistura C3 apresentou o maior FN dentre as que sofreram ruptura. As misturas C2 e C3 apresentaram teor de ligante asfáltico de 6,0% e 5,7%, respectivamente, e foram dosadas de acordo com a metodologia Marshall. O FN atingido pela Mistura C2 foi o menor dentre todos e o seu teor de CAP o maior dentre todos. Portanto, observa-se que misturas com maiores porcentagens de ligante sofrem maiores deformações e apresentam FN mais baixos. As misturas C1 e R1 também possuem agregados de origem mineralógica granítica, porém com TMN diferentes (19,0mm e 12,5mm, respectivamente), já as misturas C2 e C3 possuem agregados de origem gnáissica e fonolítica e TMN de 12,5mm e 9,5mm, respectivamente. Observa-se que a Mistura

C3, de menor TMN e composta por agregados fonolíticos, apresentou o menor índice de deformação se comparada às demais misturas sem polímero. A Mistura R1, com agregados de origem granítica apresentou maior valor de deformação se comparada Mistura C2, e estas duas misturas tem o mesmo TMN de 12,5mm. Outra hipótese que pode confirmar a influência da fonte mineralógica é uma comparação entre as misturas R1 e C3, pois ambas possuem teor de CAP próximos (5,5% e 5,7% respectivamente), porém o FN da Mistura C3 ($N = 110$) foi ligeiramente maior que o FN da Mistura R1 ($N = 92$).

Apenas a Mistura C1 atingiu o critério mínimo de 600 ciclos no ensaio de Referência. No entanto, para as misturas C2, C3 e R1 foi aplicado de forma parcial o *Shift Model*, ou seja, foi utilizada a equação 3.1, mostrada novamente abaixo, para a obtenção dos parâmetros B , C e α , e dessa forma foi possível avaliar como se comporta cada um desses parâmetros em variadas condições de níveis de deformação e quantidade de ciclos, uma vez que a condição de aplicação desta equação é para o mínimo de 600 ciclos. Como já visto no Capítulo 3, os dados de *input* da Equação 3.1 são os valores de deformação permanente e seu respectivo número de ciclos, ou seja, os valores de $\epsilon_{vp} \times N$ obtidos da curva do ensaio de Referência.

$$\epsilon_{vp} = \frac{BN}{(C+N)^\alpha} \quad (3.1)$$

É importante comentar que a curva do *Shift Model* está associada à função erro logarítmico (Equação 3.2) e, portanto, os parâmetros B , C e α , assumem valores que melhor expressam a curva do modelo na medida em que houver mais pontos de análise, ou seja, um maior número de ciclos de carregamento representa um maior potencial de minimização da função erro logarítmico, o que implica na aproximação gráfica entre a curva do ensaio de referência e a curva do *Shift Model*.

Após a aplicação da Equação 3.1, foi possível a obtenção dos parâmetros B , C e α , e a construção da curva do *Shift Model* para a Mistura C1. O parâmetro B apresentou valor de 0,0024, o parâmetro C valor de 1,1452 e o parâmetro α alcançou valor de 0,7760. Esses valores não apresentam diferença significativa se comparado aos valores encontrados no trabalho de Choi (2013). A comparação entre os parâmetros B , C e α encontrados para a Mistura C1 e para Mistura NY9.5B (Choi, 2013) é válida, uma vez que essas duas misturas alcançaram os 600

ciclos no ensaio de Referência. Vale ressaltar que as condições do ensaio de Referência foram mantidas rigorosamente para todas as misturas avaliadas nesta dissertação. A Tabela 4.2 apresenta os valores dos parâmetros B , C e α encontrados para as misturas C1 e NY9.5B.

Tabela 4.2 - Parâmetros da curva do *Shift Model* - misturas C1 e NY9.5B.

Mistura	Parâmetros do <i>Shift Model</i>			
	B	C	α	ϵ_{vp} (%) no ciclo 600
C1	0,0024	1,1452	0,7760	1,034
NY9.5B	0,0051	1,8046	0,8007	1,800

Fonte: Autor deste trabalho.

O parâmetro B , que está correlacionado ao nível de deformação permanente, tem forte influência no comportamento da curva do *Shift Model*, pois quanto maior o valor de B , maior será o nível de deformação apresentado no final dos 600 ciclos. O valor do parâmetro B para a Mistura NY9.5B é aproximadamente o dobro do valor de B da Mistura C1, e segue a relação onde $NY9.5B/C1 = 2,12$. Observa-se que o nível de deformação alcançado pela Mistura NY9.5B é quase o dobro daquele apresentado pela Mistura C1. A relação entre os níveis de deformação dessas misturas segue a razão de $NY9.5B/C1 = 1,74$. Assim, é possível avaliar que a Mistura C1 teve um ganho de incremento de deformação menor ao longo dos ciclos de carregamento, o que configura uma mistura menos suscetível aos impactos mecânicos e a ação da temperatura durante o ensaio. Neste caso específico o nível de deformação foi quase o dobro quando também houve a duplicação no valor de B . Porém, não é possível afirmar que sempre haverá uma relação linear entre os valores dos parâmetros B e os níveis de deformação entre diferentes misturas asfálticas. Os materiais asfálticos possuem comportamentos distintos entre si, ainda mais entre misturas que apresentam diferenças nos parâmetros volumétricos de dosagem, curvas granulométricas e ligante asfáltico.

O parâmetro C está associado ao processo de formação da curva, ou seja, a mudança da zona primária para a zona secundária. Ele apresentou valores não tão distantes para as misturas C1 e NY9.5B. Quanto menor o valor de C , mais a curva irá apresentar um comportamento suave quanto a passagem da zona primária para a zona secundária. A Mistura C1 apresentou um menor valor de C do que a Mistura NY9.5B, ou seja, o processo de formação da curva C1 foi mais suave, o que representou maior quantidade de ciclos na zona primária. Pode-se dizer também que o valor do parâmetro C influencia no tempo de ocorrência do *steady*

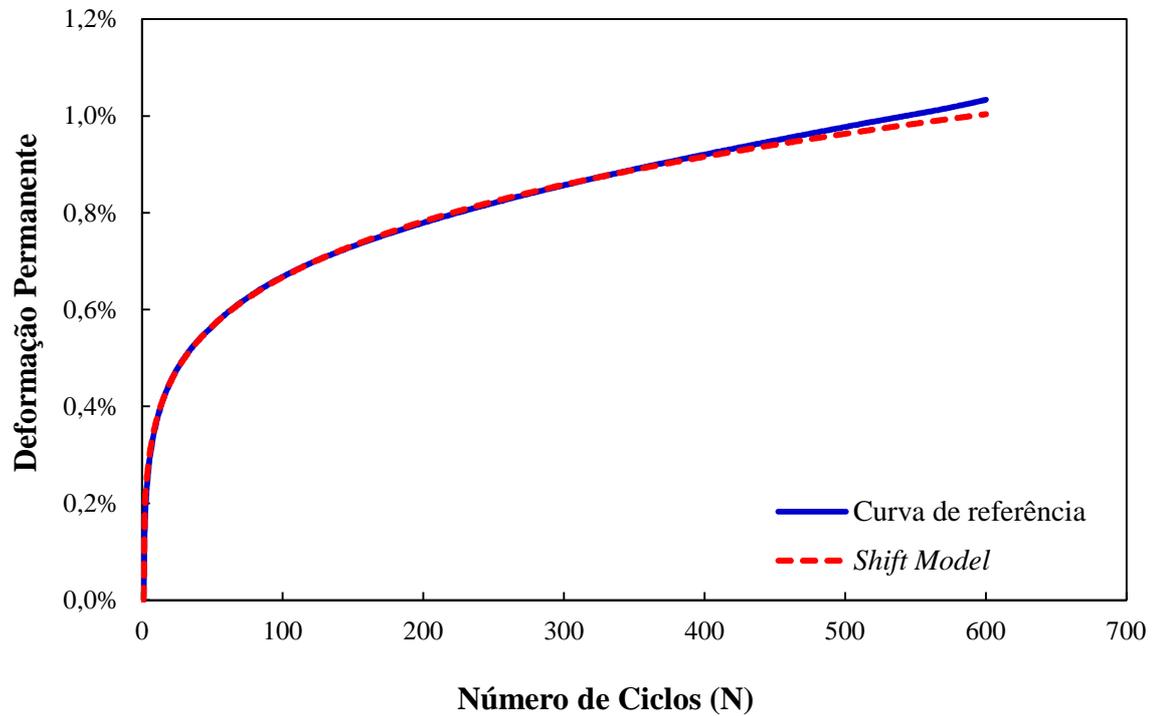
state (estado estacionário), uma vez que misturas mais rígidas tem maiores quantidade de ciclos na zona primária. Assim, a Mistura NY9.5B, por ter maior valor de C , atingiu o *steady state* de forma mais rápida que a Mistura C1. A relação entre valores do parâmetro C das misturas em questão segue a razão de $NY9.5B/C1 = 1,58$. O processo de formação do *steady state* também está associado ao arranjo do agregado mineral e seu intertravamento.

O parâmetro que determina a inclinação da reta que representa o *steady state* na curva de deformação é o coeficiente α . Quanto maior o valor de α maior será o endurecimento do material, o que representa baixas inclinações de reta. As misturas C1 e NY9.5B apresentaram valores muito próximos de α , obedecendo a razão de $NY9.5B/C1 = 1,03$. Portanto, a NY9.5B apresentou nível de rigidez ligeiramente maior se comparado ao C1 no decorrer do ensaio de Referência. Pode-se dizer que a NY9.5B apresentou um ganho de endurecimento levemente menor a cada ciclo de carregamento, o que não representou menores níveis de deformação permanente no fim dos 600 ciclos de carregamento. Na Equação 3.1 é observado que o aumento no valor do parâmetro α torna o denominador maior, o que reduz os valores de deformações viscoplásticas no *Shift Model*.

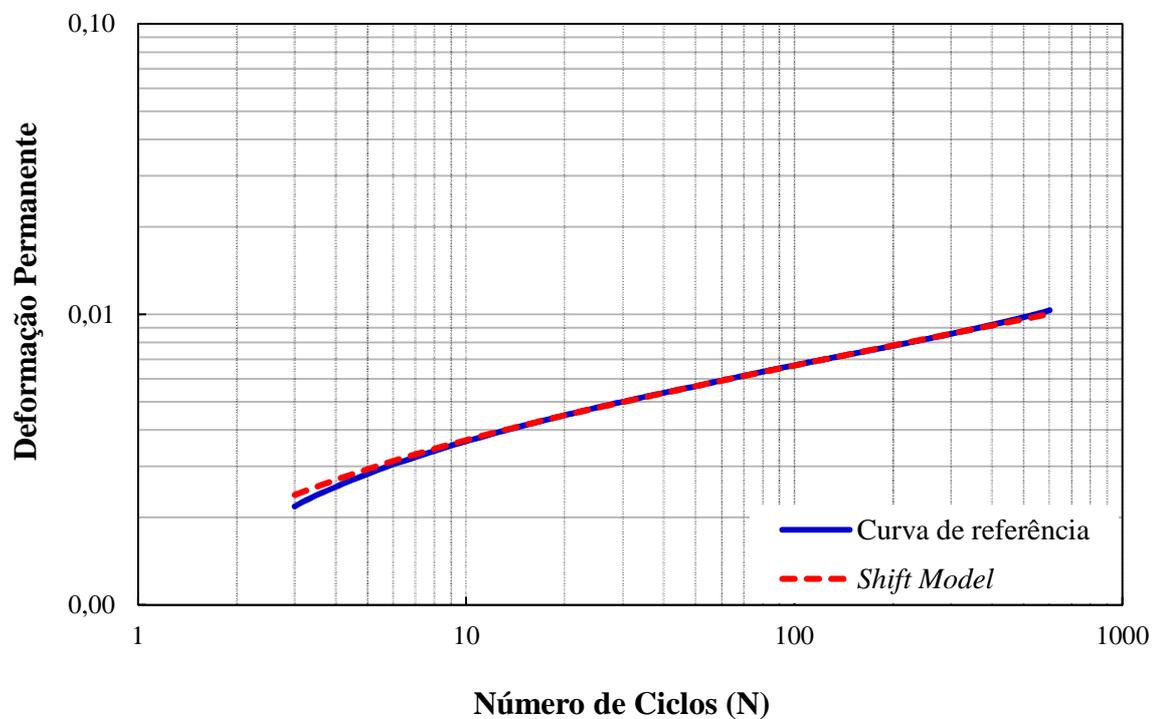
A partir da determinação dos parâmetros B , C e α referentes à Mistura C1 foi possível a construção da curva do *Shift Model*. A Mistura C1 apresentou uma curva de modelo muito próxima à curva de referência, visto que os 600 ciclos alcançados no ensaio representaram 600 pontos para a modelagem. Outra forma de visualizar o comportamento da curva do *Shift Model* é alterando os eixos das abcissas e ordenadas, colocando ambos em escala log. A escala log-log tem como objetivo transformar o comportamento da curvas de ensaio e modelo o mais próximo de uma reta. Essa mudança na escala permite entender em que zona a curva do modelo apresentou melhor comportamento de acordo com os valores dos parâmetros B , C e α . No caso da Mistura C1, a função erro logarítmico representou melhor o ajuste dos pontos até por volta do ciclo 500. A partir do ciclo 200, início da região secundária, é possível observar que a curva começa a ganhar um comportamento semelhante a uma reta, o que caracteriza o *steady state*, no qual o ganho de deformações ou incremento de deformações passa a ser constante, e este comportamento é observado no gráfico com a mudança de eixo para escala log-log. Observa-se que na mudança de escala, a curva do modelo passou a representar muito bem o material a partir do ciclo 10, ou seja, a função erro logarítmico foi bastante eficiente na modelagem numérica para a obtenção dos parâmetros B , C e α . Caso o ensaio de Referência para a Mistura C1 fosse interrompido até a obtenção do FN ou com maior número de ciclos de carregamento, seria possível encontrar valores para B , C e α que melhor

representassem a curva do modelo, ou seja, a função erro logarítmico teria melhor resposta, visto que sua análise ponto a ponto seria maior. Porém, como já explicado, o tempo para realização do protocolo de ensaio seria extenso demais. Em vista disso, é possível perceber que a modelagem empregada nesta mistura conseguiu correlacionar de forma satisfatória o comportamento mecânico do material com o que se observou na curva de ensaio. As Figuras 4.2 (a) e (b) mostram as curvas de referência e do *Shift Model*, respectivamente, na escala usual e na escala log.

Figura 4.2 - Curva de referência e curva do *Shift Model*: (a) escala usual e (b) escala log-log - Mistura C1.



(a)

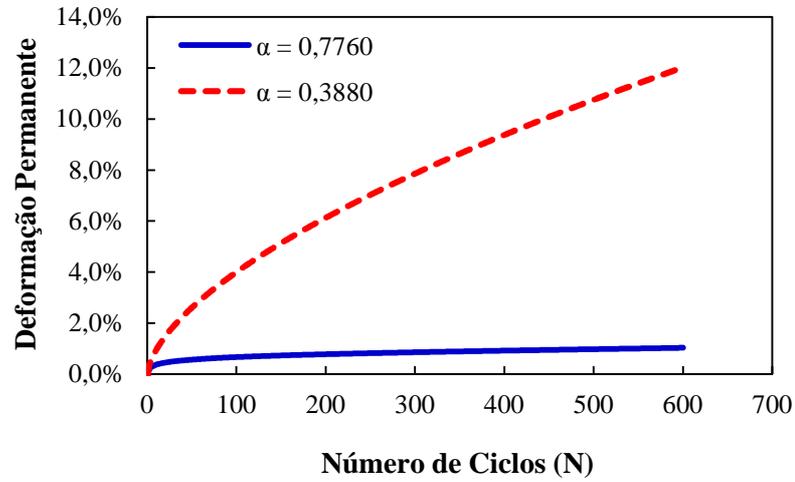


(b)

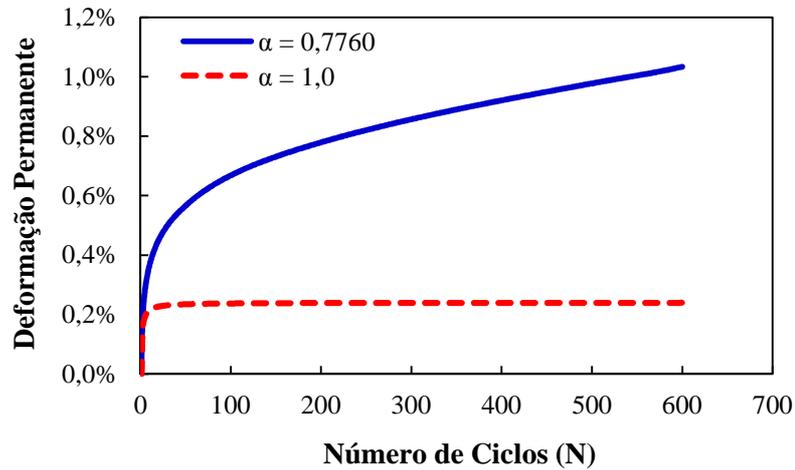
Fonte: Autor deste trabalho.

A partir dos parâmetros B , C e α foi realizada uma análise paramétrica a fim de verificar a influência da variação de cada parâmetro no modelo, ou seja, como os valores de B , C e α estão associados ao desenvolvimento dos níveis de deformação durante a realização do ensaio de Referência (TRLPD). Portanto, toma-se a Mistura C1 para realizar um estudo de parametrização. Observou-se que a variação do parâmetro α apresentou mudança nos níveis finais de deformação permanente. Os valores de B (0,0024) e C (1,1452) foram mantidos constantes. Foram realizadas as seguintes mudanças no valor original de α ($\alpha = 0,7760$): redução para a metade do seu valor original, consideração do dobro do seu valor original e valor correspondente a um. Quando o valor de α foi reduzido pela metade ($\alpha = 0,388$), a curva do *Shit Model* apresentou 12,0255% como valor final de deformação. É verificado que a diminuição no coeficiente α aumenta os valores de deformação permanente. Quando o valor de α foi um ($\alpha = 1,0$), verificou-se que no *steady state* o incremento de deformação foi pequeno, pois a reta que representa a curva da zona secundária apresentou comportamento quase que paralelo ao eixo x. O valor de deformação alcançado no fim dos 600 ciclos correspondeu a 0,0024% e este valor iniciou por volta do ciclo 4. Ou seja, o material atingiu o *steady state* muito rápido, pois apresentou alta rigidez. Na situação onde o valor de α foi duplicado ($\alpha = 1,5520$), os valores de deformação diminuíram a cada ciclo de carregamento, o que configura uma situação inexistente para uma mistura asfáltica. Dessa forma, o valor do coeficiente α assume valores que de fato representam um ensaio triaxial com carga repetida abaixo de um. As Figuras 4.3 (a), (b) e (c) mostram as varrições no valor de α sendo, respectivamente para 0,3880; 1,0 e 1,5520.

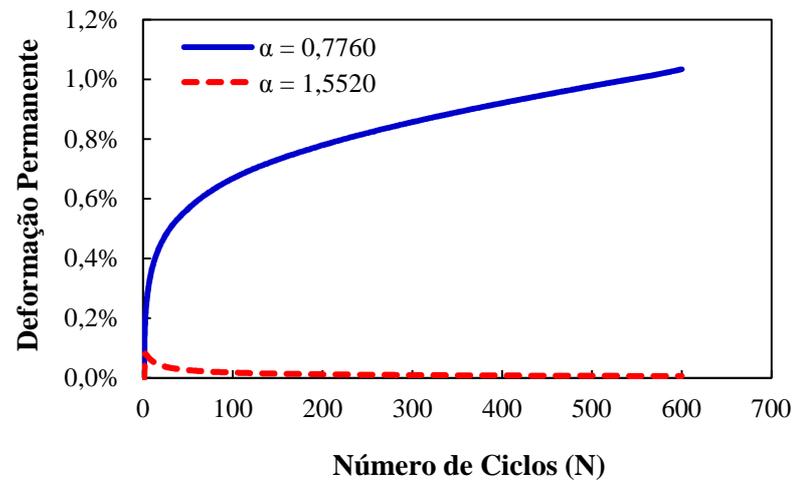
Figura 4.3 - Variações no coeficiente α . *Shift Model*: (a) $\alpha = 0,388$, (b) $\alpha = 1,0$ e (c) $\alpha = 1,5520$ - Mistura C1.



(a)



(b)

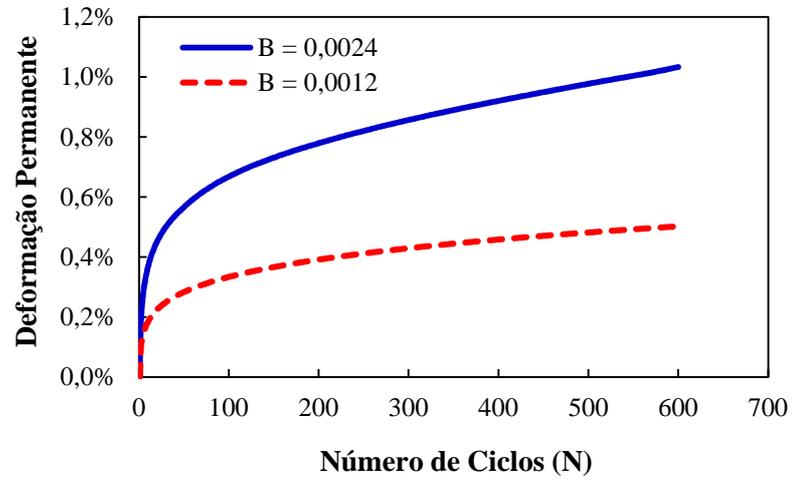


(c)

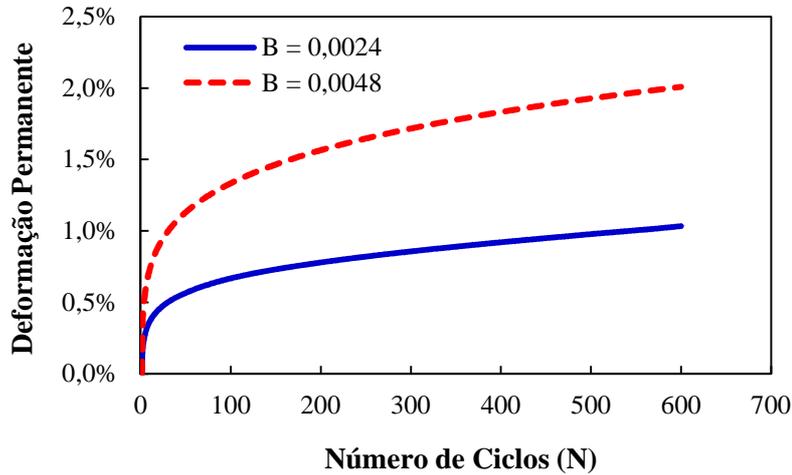
Fonte: Autor deste trabalho.

O valor do parâmetro B apresentou mudanças nos níveis finais de deformação permanente, sem alterar representativamente o comportamento quanto à inclinação da reta e a passagem para a zona secundária. As mudanças do valor original $B = 0,0024$ foram: redução para metade do seu valor, consideração do dobro do seu valor e valor correspondente a zero. Valores de α (0,7760) e C (1,1452) foram mantidos constantes. Quando o valor de B foi reduzido pela metade ($B = 0,0012$), a curva do *Shit Model* apresentou 0,5022% como valor final de deformação, verificando-se que a diminuição do B reduziu os valores de deformação permanente. Quando o B foi duplicado ($B = 0,0048$), observou-se que os valores finais de deformação permanente aumentaram para 2,0087%. Quando a simulação foi realizada para um B nulo ($B = 0$), verificou-se os níveis de deformação permanente foram zero do início ao fim do ensaio. Dessa forma, quanto o menor o valor do parâmetro B menores serão os níveis de deformação apresentados ao término do ensaio. As Figuras 4.4 (a), (b) e (c) mostram as variações no valor de B sendo, respectivamente para 0,0012; 0,0048 e 0,0.

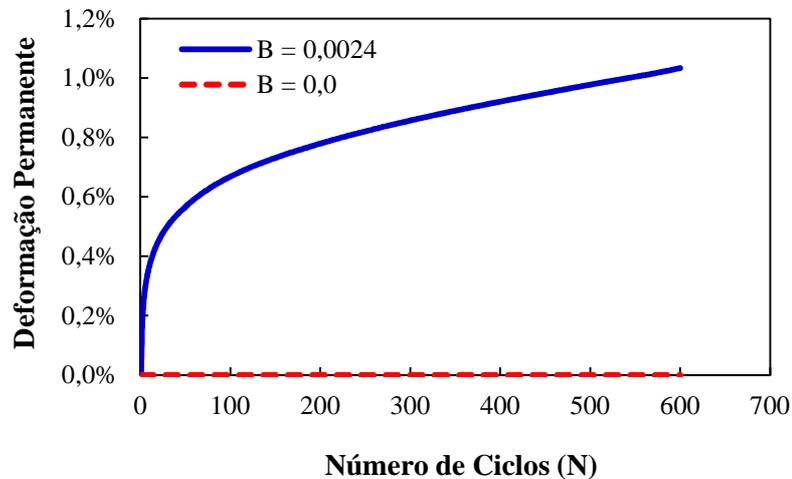
Figura 4.4 - Variações no coeficiente B . *Shift Model*: (a) $B = 0,0012$, (b) $B = 0,0048$ e (c) $B = 0,0$ - Mistura C1.



(a)



(b)

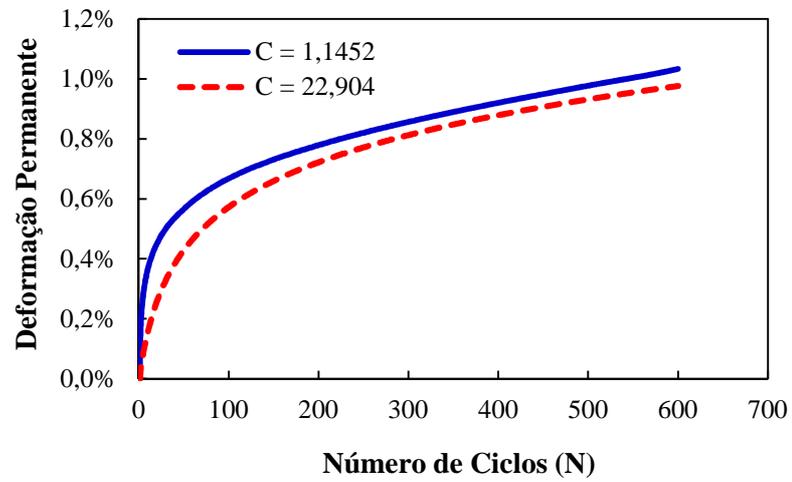


(c)

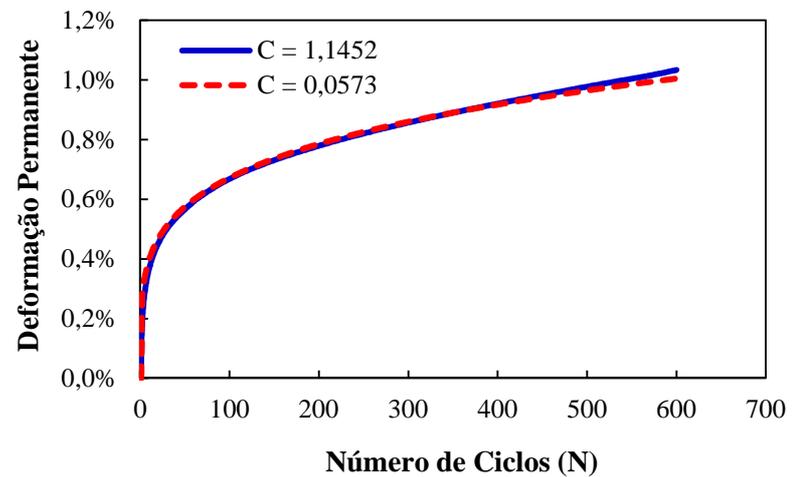
Fonte: Autor deste trabalho.

O valor do parâmetro C também foi modificado a fim de verificar sua influência na passagem da zona primária para a secundária. Os valores foram alterados da seguinte forma na análise paramétrica: multiplicação em 20 vezes o seu valor, redução em 20 vezes o seu valor e valor igual a zero. Os valores de α (0,7760) e B (0,0024) foram mantidos constantes. A mudança mais significativa entre as análises do parâmetro C ocorreu no aumento do seu valor. Porém, o nível de deformação permanente apresentou leve redução para 0,9770%. A redução em 20 vezes no valor do C teve o mesmo efeito visual que o valor de zero (apresentaram o mesmo valor de deformação permanente final, 1,0057%), ou seja, os baixos valores de C apresentaram baixa influência nos níveis de deformação permanente. Assim, é desejado um baixo valor para o parâmetro C , pois o seu aumento representa uma passagem mais rápida para a zona secundária, e tal passagem está associada à menor resistência da mistura. Observa-se que na Figura 4.5 o processo de mudança da zona primária para a secundária foi mais rápido quando o C apresentou maior valor. As Figuras 4.5 (a), (b) e (c) mostram as variações no parâmetro C sendo, respectivamente para 22,904; 0,0573 e 0,0.

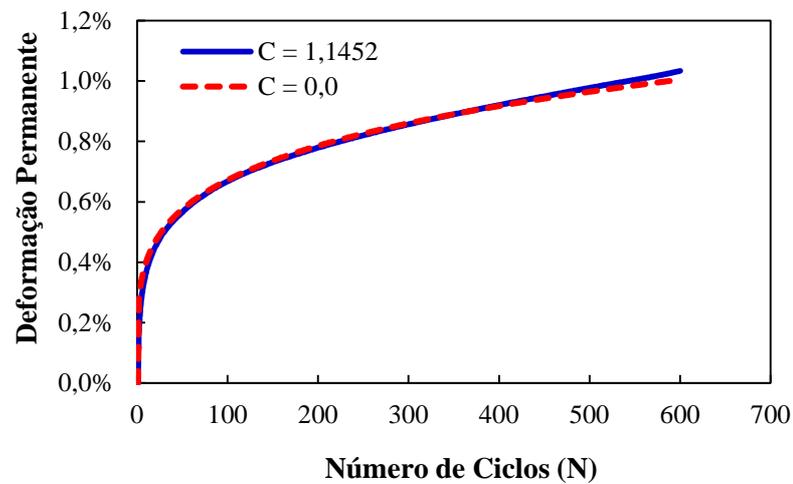
Figura 4.5 - Variações no coeficiente C . *Shift Model*: (a) $C = 22,904$, (b) $C = 0,0573$ e (c) $C = 0,0$ - Mistura C1.



(a)



(b)



(c)

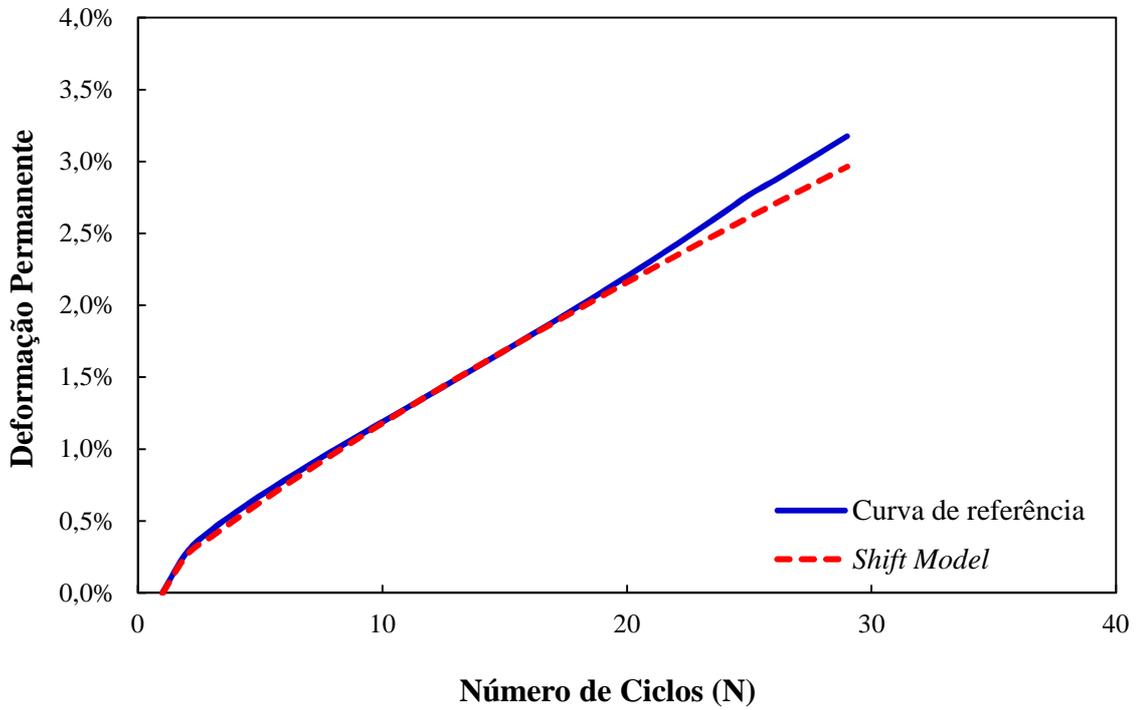
Fonte: Autor deste trabalho.

As misturas C2, C3 e R1 atingiram o FN antes dos 600 ciclos de carregamento. No entanto, a Equação 3.1 foi aplicada para estas misturas com o objetivo de determinar e avaliar os parâmetros B , C e α e verificar de que forma eles representam o comportamento de curvas distintas a partir de variados ciclos de carregamento. Considerando que as misturas C1 e NY9.5B apresentaram valores próximos para os coeficientes do *Shift Model*, toma-se a partir de agora somente os parâmetros da Mistura C1 como parâmetros de análise comparativa para com as demais misturas desse trabalho. Avaliar e comparar misturas nacionais é uma forma de construir um banco de dados com parâmetros mecânicos que possam nortear a melhor mistura quanto à deformação permanente.

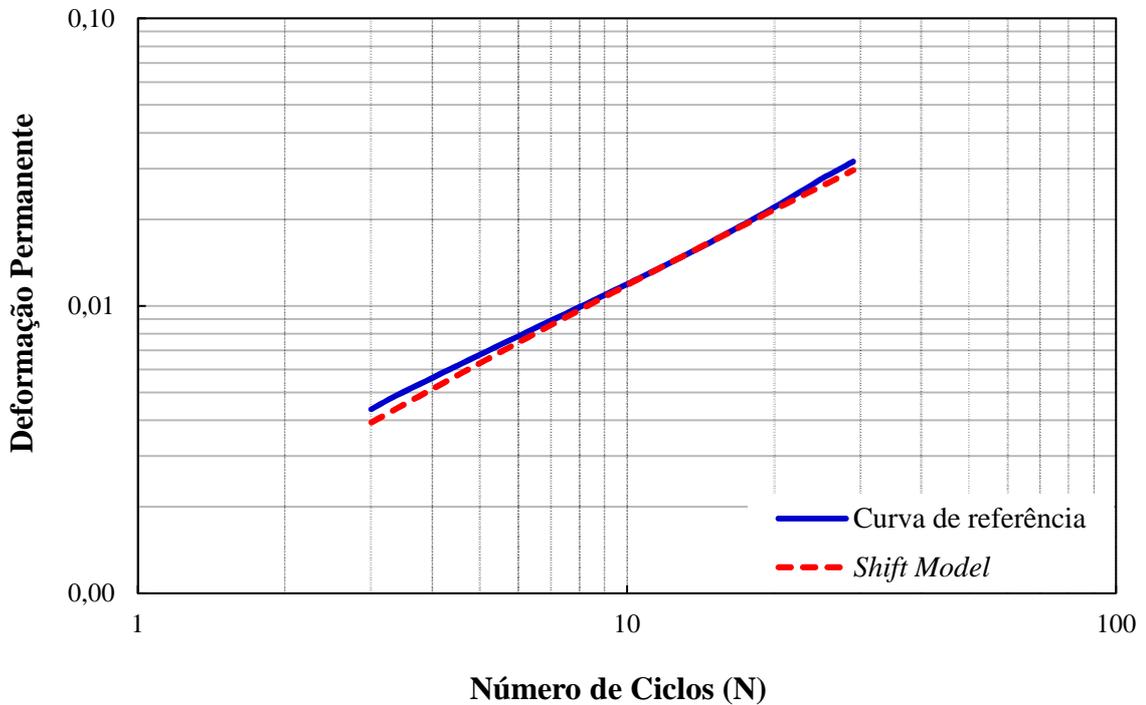
A Mistura C2 apresentou FN no ciclo 29, e dessa forma foi possível obter somente 29 pontos de análise na função erro logarítmico. O valor encontrado para B foi de 0,0021, o parâmetro C teve valor de 7,1038 e α atingiu 0,1951. O parâmetro B das misturas C1 e C2 apresentaram valores muito próximos na razão de $C1/C2 = 1,14$. A relação entre os valores de C foi $C1/C2 = 0,16$, e isso confirma que o comportamento da curva C2 é menos suave que o da C1, pois a Mistura C2 alcançou o *steady state* de forma mais rápida que a Mistura C1, o que representou maiores deformações em um menor número de ciclos. O valor do α para a Mistura C2 é inferior ao da Mistura C1 na razão $C1/C2 = 3,98$, e isto refletiu em um ganho de incremento de deformação maior a cada ciclo de carregamento para a Mistura C2. A interferência do parâmetro α se sobrepôs à influência do parâmetro B neste caso, pois uma maior inclinação de reta configurou em uma mistura que apresentou grandes ganhos de incrementos em poucos ciclos de carregamento.

Assim, fica exposto que os parâmetros do *Shift Model* da Mistura C1 mostram valores que indicam menores índices quanto à deformação permanente quando comparados aos da Mistura C2. A curva de modelo da Mistura C2 apresentou inclinação visivelmente maior dentre todas, conforme a Figura 4.6 (a). Observa-se que a partir do ciclo 20 o comportamento da curva do modelo não foi satisfatório no que se refere à representação da curva de ensaio. Observa-se também que o nível da evolução da curva não foi suave, visto que o valor do C foi mais de seis vezes maior que o da Mistura C1, seguindo a relação de $C2/C1 = 6,20$. Vale lembrar que são desejados baixos valores para o parâmetro C . A mudança para a escala log-log, indicada na Figura 4.6 (b), também foi realizada e observa-se que apenas o trecho entre os ciclos 10 e 20 apresentou boa correlação entre a curva do ensaio de referência e a curva do *Shift Model*. Assim, pode-se assumir como hipótese que baixos valores de ciclos refletem em trechos na curva que não são bem representados pelo *Shift Model*.

Figura 4.6 - Curva de referência e curva do *Shift Model*: (a) escala usual e (b) e escala log-log - Mistura C2.



(a)



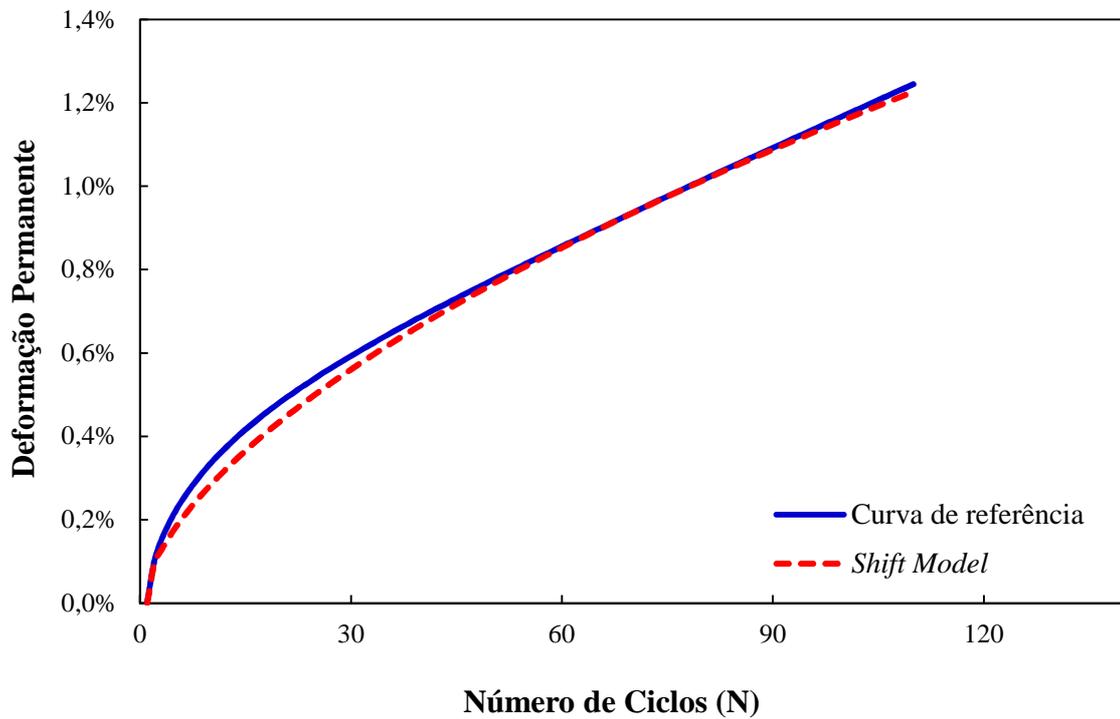
(b)

Fonte: Autor deste trabalho.

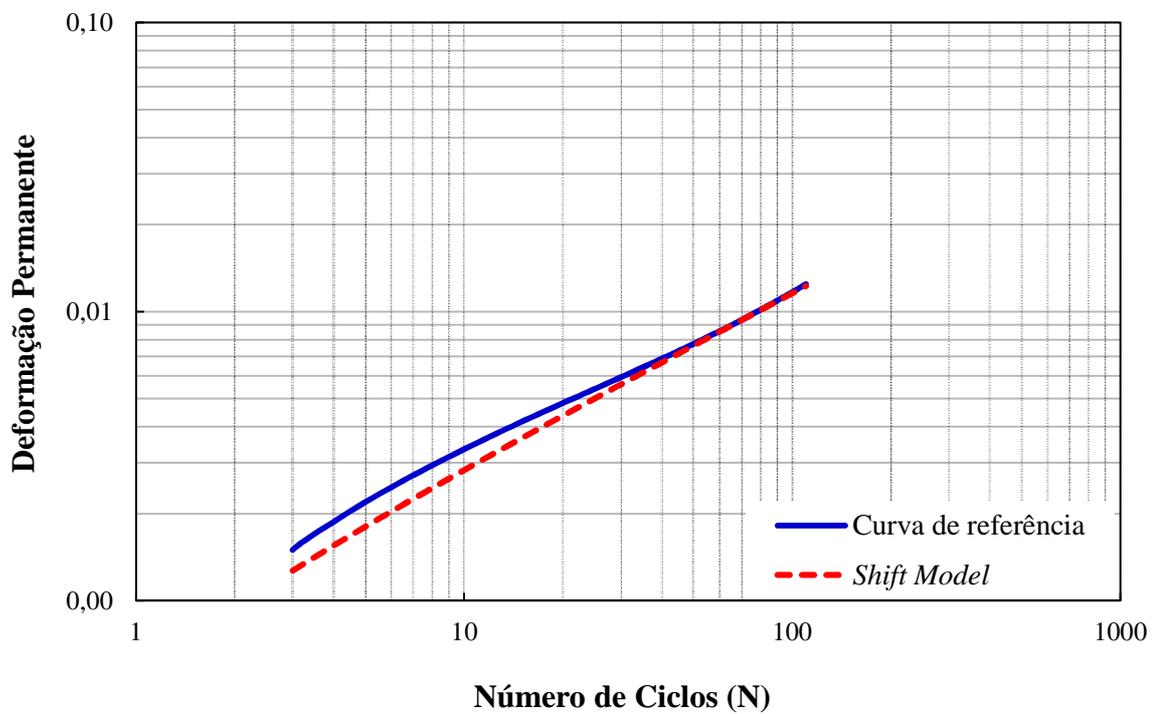
A Mistura C3 apresentou FN no ciclo 110. Esta mistura contou com 110 pontos de análise na função erro logarítmico para a obtenção dos parâmetros do *Shift Model*. O valor do parâmetro B foi de 0,0008, C de 1,1217 e α de 0,4057. A relação entre o B da Mistura C1 e C3 é expressa por $C1/C3 = 3$. O nível de deformação no FN da Mistura C3 foi o menor entre as misturas C2 e R1 (Tabela 4.2), o que justifica um baixo valor do parâmetro B . O parâmetro C da Mistura C3 apresentou valor próximo ao da Mistura C1 na razão de $C1/C3 = 1,02$, o que caracterizou um processo de mudança para a zona secundária semelhante. Esse processo de curvatura, o qual é influenciado pela mudança da zona primária para a secundária, é bem representado no comportamento das duas curvas C1 e C3 (Figura 4.1). O parâmetro α da Mistura C3 assumiu um valor quase que duas vezes menor quando comparado ao da Mistura C1, $C1/C3 = 1,91$. Assim, observa-se que o α exerceu maior influência no comportamento evolutivo de deformação permanente da Mistura C3, ou seja, o seu valor de 0,4057 refletiu em ganhos de incremento necessários para ocasionar o processo de ruptura do material antes do ciclo 600. As curvas de ensaio e do *Shift Model* da Mistura C3 apresentaram boa correlação gráfica a partir do ciclo 60 (Figura 4.7 (a)), e esse comportamento também pode ser atribuído ao baixo número de pontos de análise.

Outra possível hipótese para a explicação do trecho melhor representado a partir do ciclo 60 está associado ao valor C , ou seja, se esse parâmetro apresentasse um valor mais baixo o comportamento de mudança para a zona secundária seria melhor representado. Portanto, a melhor representação da curva do *Shift Model* pode ser caracterizada pela máxima redução do erro entre valores de deformação da curva de ensaio e da curva do modelo. Dessa forma, é desejável que a mistura asfáltica possua um maior *steady state* possível antes de alcançar o FN. Portanto, quanto melhor a minimização do erro, menor será a diferença gráfica entre as curvas. A mudança para a escala log-log da Mistura C3 confirmou que a correlação gráfica teve melhor ajuste a partir do ciclo 60. A Figura 4.7 (b) representa a curva do ensaio de referência e a curva do *Shift Model* para a Mistura C3 na escala log-log.

Figura 4.7 - Curva de referência e curva do *Shift Model*: (a) escala usual e (b) e escala log-log - Mistura C3.



(a)



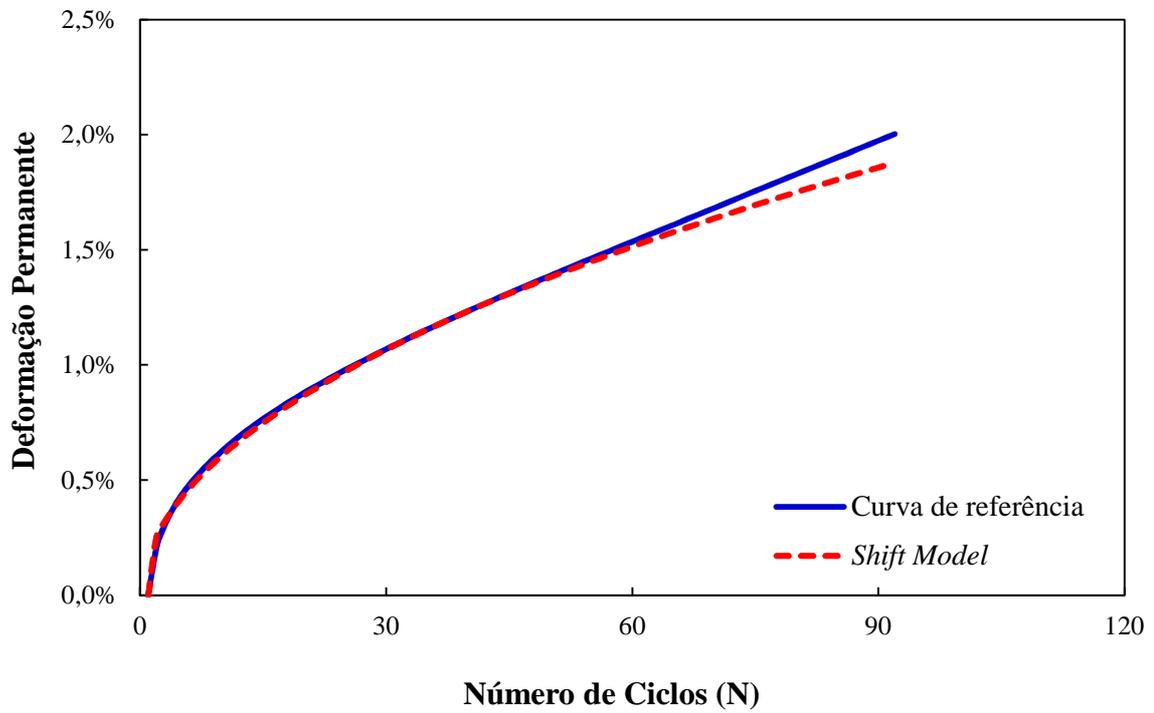
(b)

Fonte: Autor deste trabalho.

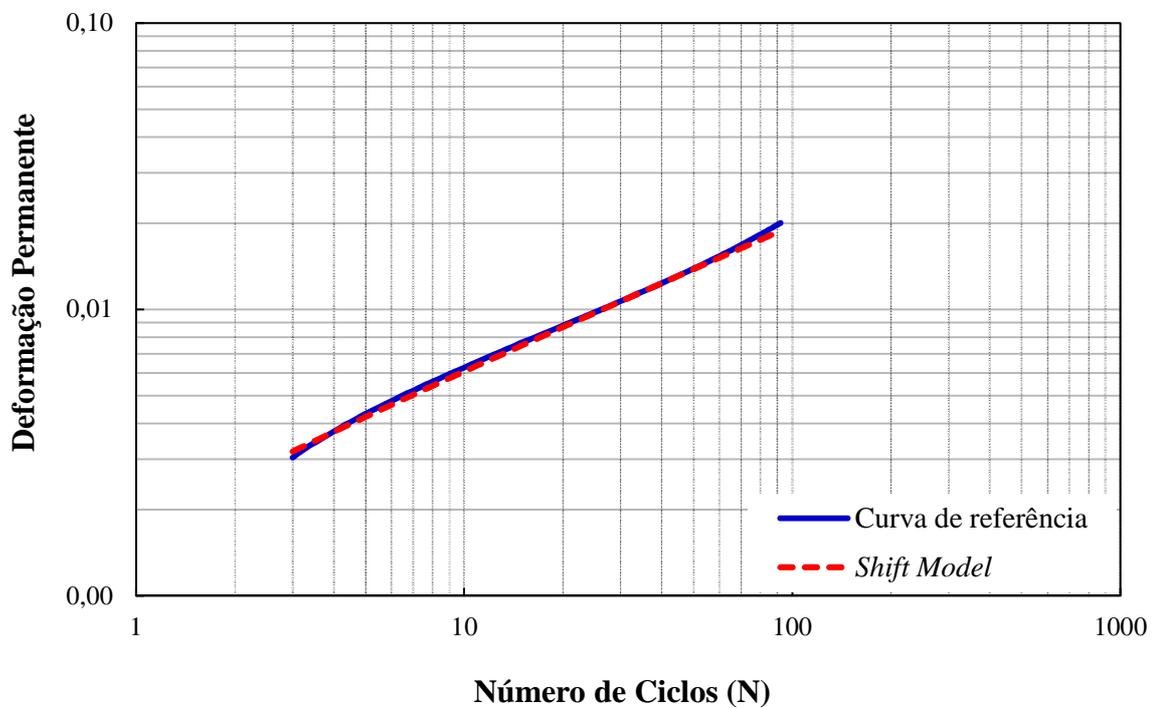
A Mistura R1, aplicada em obras de médio volume de tráfego na cidade do Rio de Janeiro/RJ, apresentou FN no ciclo 92 para o ensaio de Referência. Portanto, foram utilizados 92 pontos de análise na função erro logarítmico para a obtenção dos parâmetros do *Shift Model*. B apresentou valor de 0,0020, C de 0,3677 e α de 0,4989. A partir da comparação com a Mistura C1, os níveis de deformação da Mistura R1 também foram superiores (Tabela 4.1). O parâmetro B da Mistura R1 apresentou valor ligeiramente menor e a razão ficou sendo de $C1/R1 = 1,20$. O valor de C da mistura R1 foi menor se comparado ao da Mistura C1, na razão de $C1/R1 = 3,11$, o que representa um maior número de ciclos na zona primária. O parâmetro associado à inclinação da reta, α , apresentou valor inferior ao da Mistura C1, conforme razão de $C1/R1 = 1,56$. Como já visto para os valores de B , as relações $C1/C2$ e $C1/C3$ também apresentaram valores maiores que um, ou seja, o parâmetro B , que está associado ao nível de deformação alcançado no final do ensaio de Referência, foi sempre maior para a Mistura C1. Da mesma forma que a relação entre os valores de C (parâmetro que está associado ao processo inicial de formação de curva), para as misturas $C1/C2$ e $C1/C3$ ficaram abaixo e próximo de um, respectivamente. Assim, pode-se assumir como hipótese que o parâmetro α teve maior influência no comportamento das curvas aqui analisadas, ou seja, a deformação permanente é fortemente influenciada pelo valor de α . O processo de inclinação da reta está associado ao ganho de incremento de deformação no *steady state*, e por esta razão as curvas que apresentaram maiores valores para α possuem baixas inclinações de reta.

A curva de ensaio e a curva do modelo da Mistura R1 ficaram mais próximas quando comparado ao que se observa na Mistura C2, devido ao fato de agregar mais pontos de análise. Tal comportamento não foi tão satisfatório quando comparado ao da Mistura C1, que possuiu 600 pontos para análise na função erro logarítmico. A curva do *Shift Model* apresentou comportamento similar ao da curva de referência até por volta do ciclo 60, conforme a Figura 4.8 (a). Observa-se que o *steady state* da curva do modelo não teve boa representação linear até o FN, ou seja, a zona secundária não teve boa representação na modelagem. A mudança de eixos para a escala log-log confirma que a partir do ciclo 60 a curva do modelo apresentou inclinação menor do que a curva de ensaio, Figura 4.8 (b).

Figura 4.8 - Curva de referência e curva do *Shift Model*: (a) escala usual e (b) e escala log-log - Mistura R1.



(a)



(b)

Fonte: Autor deste trabalho.

A realização do ensaio de Referência para as quatro misturas avaliadas nessa dissertação gerou dados que foram necessários (valores de deformação *versus* números de ciclo de carregamento) para a aplicação parcial do *Shift Model*. A partir da Equação 3.1 foi possível obter os parâmetros B , C e α e fazer uma análise de modo a entender como cada parâmetro influenciou no comportamento quanto à deformação permanente. A Mistura C1 apresentou o menor índice de deformação permanente ao final dos 600 ciclos de carregamento (e sem ruptura), e o seu parâmetro α foi o maior. Enquanto que a Mistura C2 apresentou o menor valor de FN assim como o maior percentual de deformação dentre todas as misturas, o que se traduziu no menor valor do parâmetro α .

Outra importante correlação encontrada entre essas misturas é quanto ao teor de CAP e o parâmetro α . Os métodos de dosagem (Superpave e Marshall) empregados na obtenção dos teores de projeto possibilitaram como resultado final diferentes porcentagens de ligante asfáltico, uma vez que cada método possui critérios distintos de dosagem e obtenção dos parâmetros volumétricos, os quais já foram apresentados nessa dissertação para cada mistura investigada. A Tabela 4.3 apresenta os valores dos parâmetros da curva do *Shift Model* para as misturas C1, C2, C3 e R1, assim como os seus teores de CAP.

Tabela 4.3 - Parâmetros da curva do *Shift Model* e teor de CAP - misturas C1, C2, C3 e R1.

Mistura	Teor de CAP (%)	Parâmetros da curva do <i>Shift Model</i>				
		B	C	α	FN	ϵ_{vp} (%) no FN
C1	4,5	0,0024	1,1452	0,7760	600 ⁽¹⁾	1,034 ⁽²⁾
C2	6,0	0,0021	7,1038	0,1951	29	3,176
C3	5,7	0,0008	1,1217	0,4057	110	1,245
R1	5,5	0,0020	0,3677	0,4989	92	2,003

⁽¹⁾ Critério de parada do ensaio, 600 ciclos.

⁽²⁾ Valor de deformação medido no ciclo 600 sem atingir o FN.

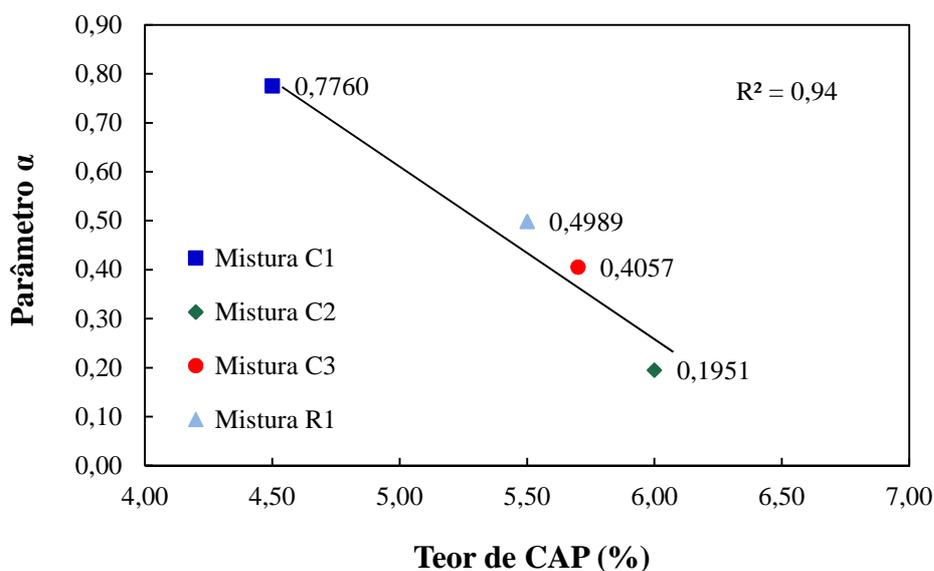
Fonte: Autor deste trabalho.

O acréscimo do teor de CAP aumentou o nível de deformação e diminuiu o FN nas misturas C1, C2 e C3. Porém, a Mistura R1 obteve maior índice de deformação e menor FN quando comparada à Mistura C3. Este comportamento não era esperado devido ao fato de que a Mistura R1 apresenta teor de CAP ligeiramente menor que o da Mistura C3 e também maior

valor de α . O coeficiente B da Mistura R1 apresentou mais que o dobro do valor quando comparado ao da Mistura C3, $R1/C3 = 2,5$, e esta relação teve influência no comportamento quanto à deformação permanente, pois os coeficientes α apresentaram valores não tão distintos, na razão de $R1/C3 = 1,23$. Ou seja, nesta comparação, a influência do parâmetro B foi mais significativa no processo de ruptura do material, pois o B está associado aos níveis finais de deformação permanente atingidos no FN. Quanto à comparação entre os parâmetros C houve uma razão de $C3/R1 = 3,05$, o que apesar de expressar maior suavidade na formação da curva R1, não influenciou na redução das deformações alcançadas no FN. Vale lembrar também que a Mistura R1 foi a única que utilizou CAP Reduc enquanto, as demais utilizaram CAP da Petrobras/Lubnor. No entanto, é possível que esse ganho de resistência para a Mistura C3 em relação à Mistura R1 seja pela diferente fonte mineralógica do agregado, uma vez que a Mistura C3 é composta por agregados fonolíticos e a R1 por graníticos.

A partir da comparação entre os parâmetros B , C e α , e tomando como base a Mistura C1, uma vez que esta mistura apresentou resistência necessária para atender os critérios mínimos do ensaio de Referência, foi possível verificar que o valor de α exerceu maior influência no *Shift Model*. Ou seja, o coeficiente α foi o mais significativo parâmetro para avaliar o comportamento quanto à deformação permanente nas misturas asfálticas investigadas. Assim, foi determinada uma correlação entre o teor de CAP, e o parâmetro α (conforme valores da Tabela 4.3), e verificou-se que quanto maior foi o teor de CAP, menor foi o valor de α . Esta correlação é indicada na Figura 4.9.

Figura 4.9 - Parâmetro α versus teor de CAP - misturas C1, C2, C3 e R1.

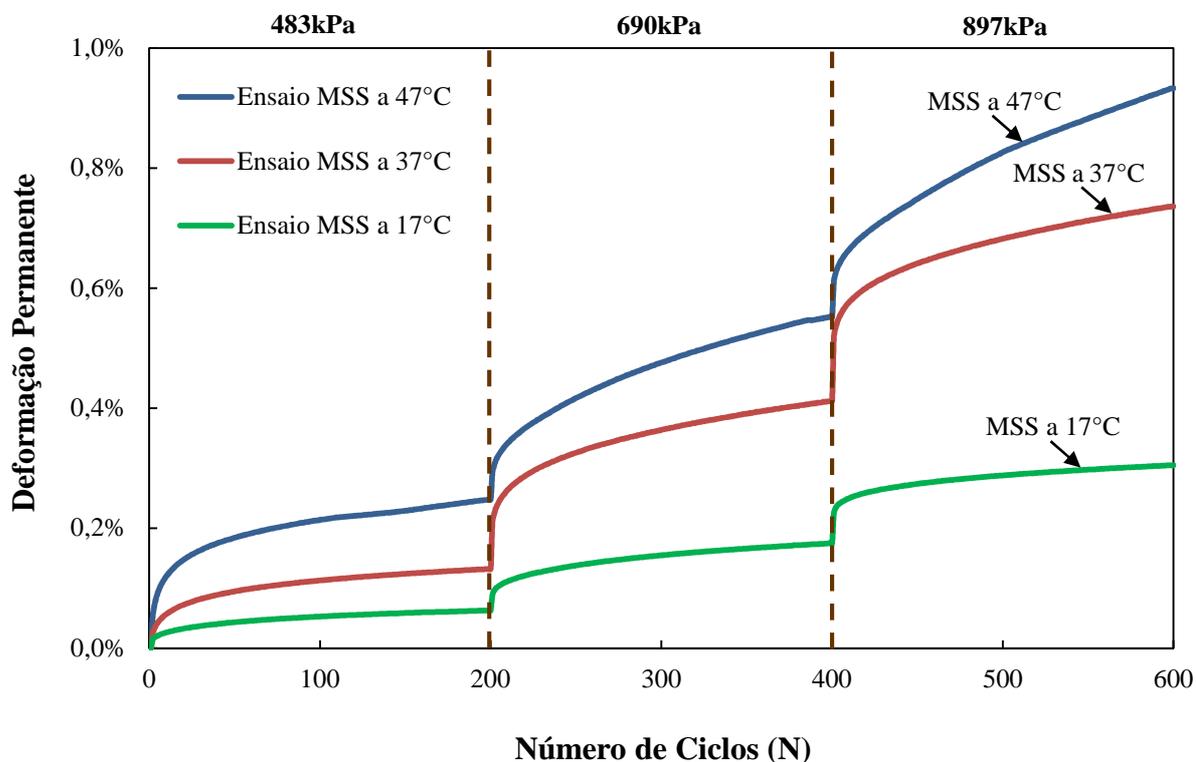


Fonte: Autor deste trabalho.

Resultados do ensaio Multiple Stress Sweep (MSS)

A etapa seguinte do protocolo de ensaio consistiu na realização dos ensaios MSS para obtenção de dados (valores de deformação *versus* números de ciclo de carregamento) que foram necessários para a utilização completa do *Shift Model*. Conforme já mencionado, a única mistura que atendeu aos requisitos mínimos de números de ciclos sem ruptura foi a C1. Assim, os ensaios MSS foram realizados para a obtenção das curvas de ajuste do modelo em questão. Cada curva foi obtida a partir das temperaturas específicas no ensaio MSS, ou seja, os três níveis de temperatura avaliados ($T_L = 17^\circ\text{C}$, $T_I = 37^\circ\text{C}$ e $T_H = 47^\circ\text{C}$) influenciaram de forma significativa no comportamento das curvas e nos valores de deformações alcançados no fim de cada bloco de carregamento. Tomando a viscosidade como uma medida da consistência do CAP, observou-se que o aumento de temperatura naturalmente reduz a viscosidade do ligante e torna a mistura mais suscetível às cargas aplicadas em cada ciclo de carregamento. A Figura 4.10 mostra o comportamento das curvas do ensaio MSS a partir de cada nível de temperatura por bloco de carregamento.

Figura 4.10 - Curvas dos ensaios MSS - Mistura C1.



Fonte: Autor deste trabalho.

As curvas do ensaio MSS apresentaram comportamento esperado e similar ao da Mistura NY9.5B (Figura 3.13) encontrada no trabalho de Choi (2013). Essas curvas permitem que o *Shift Model* seja aplicado na sua totalidade para a obtenção não só dos parâmetros B , C , e α , mas também para a obtenção dos coeficientes de ajuste da função, descritos no Capítulo 3 e que serão apresentados nesta seção. Os valores de deformações permanentes alcançadas no fim de cada bloco de carregamento, por nível de temperatura, estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Deformações no fim de cada bloco de carregamento - Mistura C1.

T (°C)	ϵ_{vp} (%) no fim de cada bloco de carregamento		
	0 - 200	201 - 400	401 - 600
17	0,063	0,175	0,305
37	0,132	0,412	0,736
47	0,248	0,552	0,933

Fonte: Autor deste trabalho.

4.1.2 Resultados do ensaio de *creep* dinâmico

O ensaio de *creep* dinâmico sem confinamento foi realizado nas quatro misturas investigadas. Os critérios de parada deste ensaio foram a inversão da taxa de deformação, que caracteriza o FN, ou o CP atingir 10.000 ciclos de carregamento sem ruptura. A Mistura C1 foi a única que alcançou os 10.000 ciclos sem ruptura. A influência do Polimul S-74 como agente modificador de ligante garantiu essa resistência à deformação permanente. As misturas C3 (FN = 177), R1 (FN = 133) e C2 (FN = 46) apresentarem os maiores FN, nessa ordem, indicando que a resistência à falha estudada se dá na seguinte ordem: $C1 > C3 > R1 > C2$.

Avalia-se que a composição granulométrica representa a maior influência quanto à resistência à deformação permanente. As misturas C1 e R1 (curvas densas) apresentaram curvas de projeto muito próximas e chegam a se sobrepor graficamente (Figura 3.7). No entanto, a Mistura C1, dentre todas, foi a que apresentou maior TMN (19,0mm), portanto, uma porção de agregados maiores. Agregados maiores podem ser vantajosos quando bem selecionados, uma vez que é necessário o intertravamento do esqueleto pétreo. A Mistura C2 com TMN de 12,5mm, representa uma curva com degrau, uma vez que apresentou uma descontinuidade em sua faixa, a partir da peneira de N°2, e isso sugere pequena porcentagem de agregados com tamanho intermediário, formando um patamar na curva granulométrica corresponde às frações intermediárias. A curva C2 apresentou comportamento próximo ao limite superior da Faixa C do DNIT até a peneira de N°2, e isso caracterizou a curva com a maior quantidade de material fino dentre as investigadas neste trabalho. A curva C3 (curva densa), com TMN = 9,5mm, apresentou quantidade de material fino superior às das curvas C1 e R1, pois o seu comportamento se manteve o mais próximo do limite superior da Faixa C do DNIT.

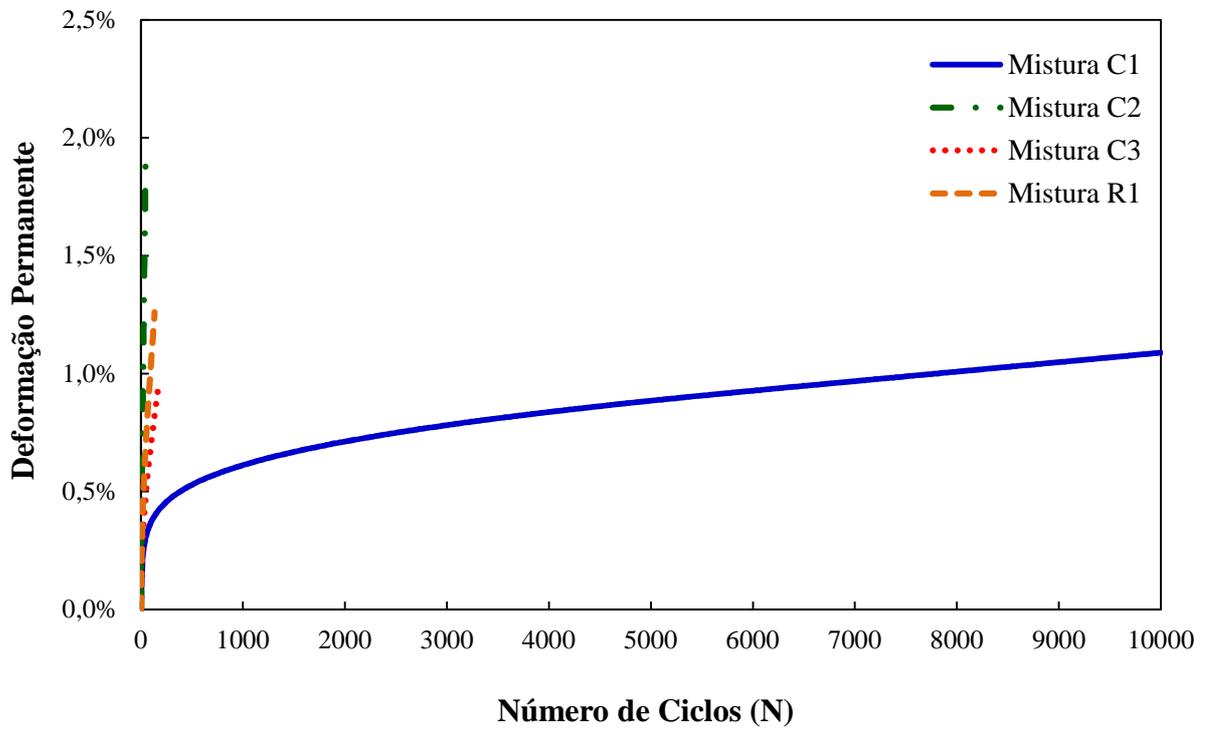
A partir da característica de cada curva de projeto, observou-se que o efeito da adição de polímero, assim como o menor teor de CAP (4,5%) associados ao maior TMN de agregado e a curva com graduação densa tornaram a Mistura C1 a mais resistente quanto à deformação permanente. A Mistura C2 além de ser uma mistura com degrau e possuir a maior porcentagem de material fino apresentou também um TMN menor que o da curva C1, assim pode-se avaliar que o esqueleto mineral da curva C2 não apresenta um bom intertravamento, o que conferiu à Mistura C2 o último lugar no *ranking* de resistência quanto à deformação permanente. A curva C3 apresentou comportamento mais próximo ao limite superior da Faixa C do DNIT, o que representa agregados mais finos. Porém a influência do menor TMN não gerou o menor FN quando comparado aos das misturas C2 e R1. Portanto, o comportamento de

cada curva influenciou nos resultados dos ensaio de *creep* dinâmico, no entanto, é necessário que se realize uma avaliação em conjunto com os outros parâmetros volumétrico (teor CAP, RBV, VAM, etc.) e também características mineralógicas para que se possa compreender melhor o comportamento de uma mistura quanto à deformação permanente.

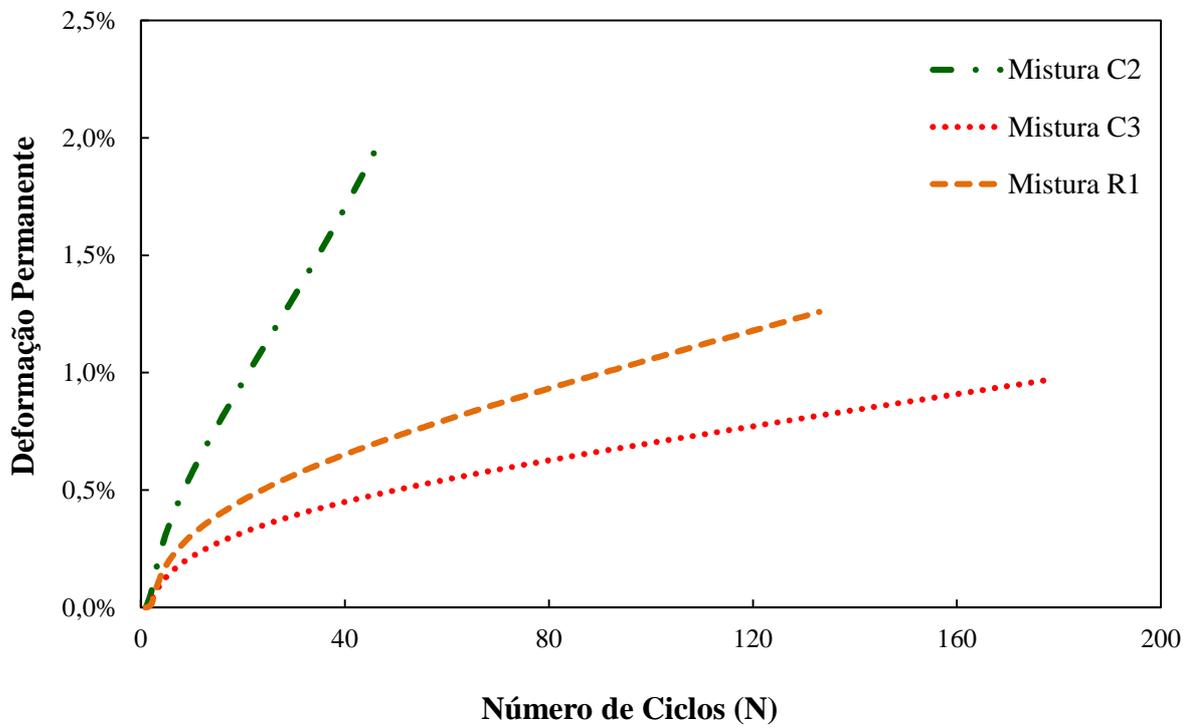
O teor de CAP exerceu bastante influência no FN. Vale lembrar que as misturas C1 e R1 foram dosadas de acordo com a metodologia Superpave, que, comparada à metodologia Marshall propicia redução no teor de CAP. A Mistura C2 com 6,0% de ligante asfáltico apresentou o menor FN, no ciclo 46. As misturas C3 com 5,7% e R1 com 5,5% de ligante asfáltico apresentaram FN respectivamente nos ciclos 177 e 133. O valor no ensaio de penetração do CAP Reduc (utilizado na Mistura R1) é menor quando comparado ao do CAP 50/70 (utilizado na Mistura C3) e isso poderia apresentar maior ganho de resistência, refletindo em um FN maior para a Mistura R1. No entanto, verificou-se que a Mistura C3, mesmo com ligante menos rígido e levemente em maior quantidade do que a Mistura R1, apresentou maior FN, pois a influência dos agregados fonolíticos caracterizou maior ganho de resistência quando comparados aos agregados graníticos que constituíram a Mistura R1. À vista das análises apresentadas, constatou-se que a modificação do ligante da Mistura C1 originou os melhores valores quanto à resistência à deformação permanente, e garantiu que esta mistura não rompesse até os 10.000 ciclos de carregamento.

A Figura 4.11 (a) apresenta as curvas do ensaio de *creep* dinâmico para as misturas C1, C2, C3 e R1. A curva de ensaio da Mistura C1 teve comportamento bastante distinto quando comparada às curvas das demais misturas. Esse comportamento é caracterizado por apresentar um baixo valor de deformação para um alto número de ciclos de carregamento. A partir da Figura 4.12 é possível observar que as curvas de deformação das misturas C2, C3 e R1 em comparação à da Mistura C1 apresentaram um comportamento semelhante a uma reta vertical próxima ao eixo y, devido terem atingido baixos ciclos de carregamento até a ruptura. Portanto, para a melhor visualização do comportamento das curvas das misturas C2, C3 e R1 é apresentada a Figura 4.11 (b), a qual não possui a curva de deformação da Mistura C1.

Figura 4.11 - Curvas do ensaio de *creep* dinâmico: (a) misturas C1, C2, C3 e R1 e (b) misturas C2, C3 e R1.



(a)



(b)

Fonte: Autor deste trabalho.

No que diz respeito à avaliação dos níveis de deformação permanente apresentados, a Mistura C1 foi a mais resistente por não apresentar ruptura, porém o seu nível de deformação apresentado no fim dos 10.000 ciclos foi levemente maior quando comparado ao da Mistura C3 no ciclo de ruptura. No entanto, no ciclo 177 a Mistura C1 apresentou nível de deformação de 0,423%, enquanto que no ciclo 177 (FN) da Mistura C3 o nível de deformação atingido foi de 0,967%. Ou seja, a mistura C1 apresenta mais que o dobro de resistência quando comparada à Mistura C3 para o mesmo ciclo de carregamento. No caso tomou-se como comparação o ciclo 177, que representa o FN da Mistura C3. A Mistura C1 apresentou menor valor de deformação no fim dos 10.000 ciclos quando comparada às misturas C2 e R1. Os valores de deformações no FN de cada mistura estão apresentados na Tabela 4.5. Vale lembrar que para a Mistura C1 não houve FN, e sim o critério de parada de 10.000 ciclos.

Tabela 4.5 - Resultados do FN e seu respectivo valor de deformação para o ensaio de *creep* dinâmico sem confinamento.

Ensaio de <i>creep</i> dinâmico		
Mistura	FN	Deformação permanente (%)
C1	Não atingiu ⁽¹⁾	1,089
C2	46	1,950
C3	177	0,967
R1	133	1,260

⁽¹⁾ Critério de parada do ensaio, 10.000 ciclos.

Fonte: Autor deste trabalho.

4.1.3 Resultado do ensaio de módulo dinâmico ($|E^*|$)

A Mistura C1 foi a única que apresentou resistência necessária para a obtenção das curvas de deformação dos ensaios TSS, para a posterior obtenção dos parâmetros B , C e α , e dos coeficientes de ajuste de função, a partir da completa utilização do *Shift Model*. Assim, a análise no LVECD só foi possível de ser realizada para essa mistura, e, portanto, o ensaio de $|E^*|$ se fez necessário somente para a ela, uma vez que o LVECD utiliza o resultado de $|E^*|$ e ângulo de fase como *input* para a simulação das curvas de desempenho.

A curva mestra de $|E^*|$ da Mistura C1 foi construída a partir de fatores de deslocamento (a_T) calculados utilizando a equação de Arrhenius, e tomou-se como 12.000 o valor de C na Equação 3.9. Esse método foi utilizado por Coutinho *et al.* (2010b) e Onofre (2012) e mostrou-se mais adequado para a elaboração de curvas mestras de misturas asfálticas do estado do Ceará. A temperatura de 21,1°C foi utilizada como referência, uma vez que essa é uma temperatura mediana, o que permitiria um menor deslocamento das curvas das temperaturas mais baixas e mais altas. Os resultados dos fatores de deslocamento estão apresentados na Tabela 4.6.

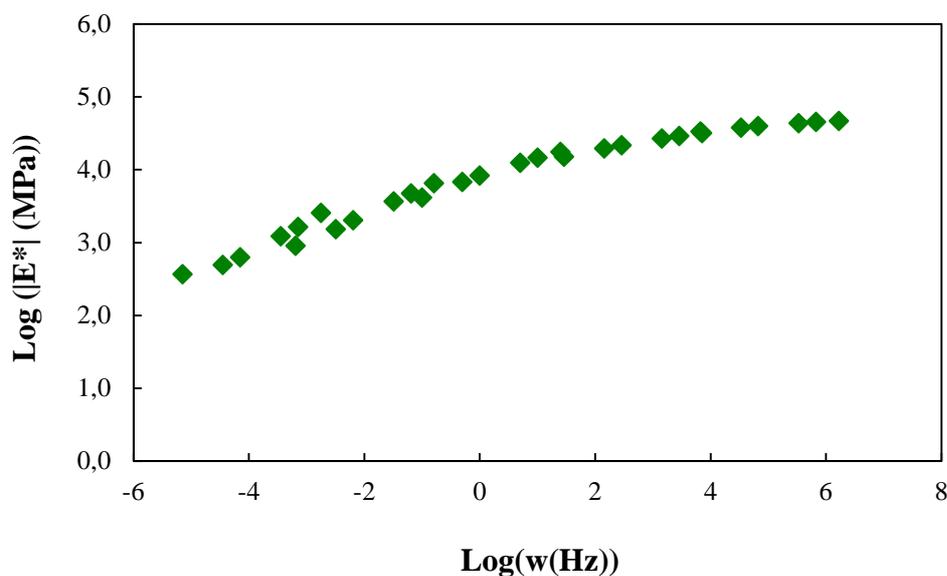
Tabela 4.6 - Resultados dos fatores de deslocamento - Mistura C1.

Temperatura (°C)	a_T
-10	4,825
4,4	2,456
21,1	0
37,8	-2,192
54,4	-4,150

Fonte: Autor deste trabalho.

A curva mestra de $|E^*|$ da Mistura C1 apresentou um bom comportamento (ajuste) a partir dos fatores de deslocamento utilizados. A partir da frequência de 5Hz (valor entre 0,7 e 6,2 no eixo x) a curva apresentou comportamento mais suave. Até a frequência de 5Hz (valor entre -5,2 e 0,7 no eixo x) o comportamento da curva foi menos suave. Ou seja, até o tempo de carregamento de 5Hz o efeito da recuperação viscoelástica foi menor, o que refletiu em maiores perdas de rigidez. Observou-se que para as frequências acima de 0,1Hz (valor igual a -1 no eixo x), na qual começa a ocorrer problemas relacionados à fadiga e ao trincamento térmico, os valores de $|E^*|$ ainda apresentavam significativa redução no incremento, o que é considerado uma vantagem, pois essa redução no crescimento da rigidez faz com que a mistura absorva menos tensões ao ser solicitada, o que retarda os defeitos mencionados.

O menor valor para o $|E^*|$ foi observado na temperatura de 54°C e frequência de 0,1Hz, as quais possibilitam o maior efeito do amolecimento do ligante asfáltico (menor rigidez da mistura) e o maior tempo de carregamento. Vale lembrar que Witczak *et al.* (2002) mostraram que o $|E^*|$ relativo à temperatura de 54,4°C e à frequência de 5Hz pode ser utilizado para caracterizar misturas com relação a resistência à deformação permanente das mesmas. A curva mestra do ensaio de $|E^*|$ para a Mistura C1 é apresentada na Figura 4.12.

Figura 4.12 - Curva mestra de $|E^*|$ - Mistura C1.

Fonte: Autor deste trabalho.

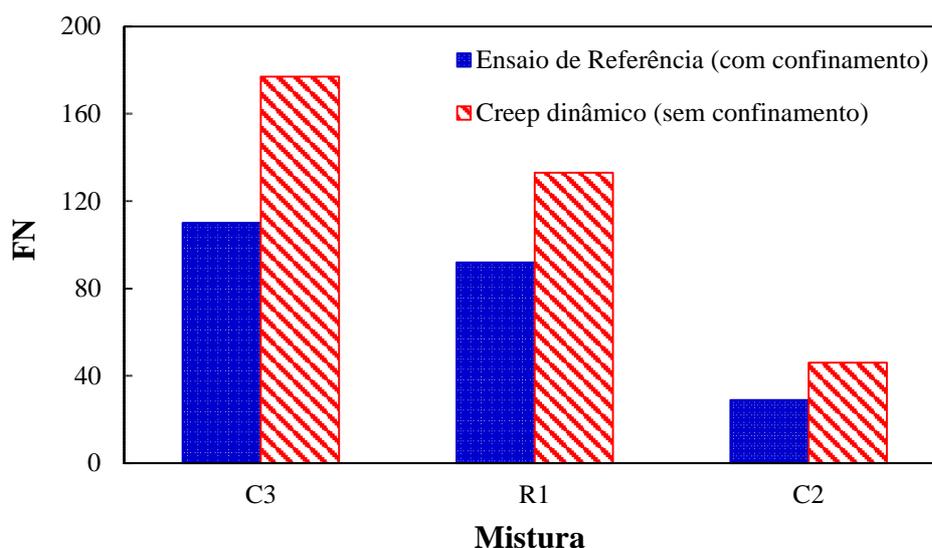
4.2 Comparação entre os resultados do ensaio de Referência e de *creep* dinâmico

O ensaio de Referência, parte integrante do protocolo de ensaio, e o ensaio de *creep* dinâmico sem confinamento foram aplicados nas quatro misturas deste trabalho, e dessa forma foi possível avaliar o *ranking* de resistência quanto à deformação permanente entre as misturas, considerando o FN e o nível de deformação alcançado no término de cada ensaio. Vale ressaltar que esses dois ensaios são realizados sob condições bastante diferentes, conforme mostra a Tabela 3.19.

A Mistura C1 não apresentou FN tanto no ensaio de Referência quanto no ensaio de *creep* dinâmico. As misturas C2, C3 e R1 quando submetidas ao ensaio de Referência apresentaram menores valores de FN quando comparados aos do ensaio de *creep* dinâmico. A tensão atuante axial utilizada no ensaio Referência (759kPa) é quase quatro vezes maior que a tensão atuante utilizada no ensaio de *creep* dinâmico (204kPa). O tempo de carregamento no ensaio de Referência (0,4s) dura quatro vezes mais que no ensaio de *creep* dinâmico (0,1s), e isso reflete no tempo em que o CP absorve os impactos em cada ciclo de carga. Ou seja, o fator tensão atuante e tempo de carregamento sugerem que as deformações apresentadas no ensaio de Referência serão maiores. No entanto, essas diferenças nos níveis de tensão e tempo de carregamento não refletiram em valores de deformações da ordem de quatro vezes maior, pois o fator temperatura é rigoroso no ensaio de *creep* dinâmico. A temperatura usada no ensaio de

referência (47°C) é inferior à utilizada no ensaio de *creep* dinâmico (60°C). O efeito da redução na temperatura tem ação direta na viscosidade do ligante asfáltico. A diminuição da viscosidade implica em perda de rigidez da mistura e com isso os níveis de deformação alcançam valores maiores. O período de repouso no ensaio de Referência (10s) é onze vezes maior que no ensaio de *creep* dinâmico (0,9s), e pode-se avaliar que o efeito da viscosidade atribuída ao ligante asfáltico é menor no ensaio de *creep* dinâmico. Portanto, a parcela de recuperação viscoelástica é maior no ensaio de Referência, o que contribui para a redução no nível de deformação no final de cada ciclo de carregamento, se comparada a parcela encontrada no ensaio de *creep* dinâmico. A ordem decrescente do *ranking* de FN nos dois ensaios é a mesma: C3, R1 e C2. A Figura 4.13 permite a visualização do FN de cada mistura nos ensaios de Referência e de *creep* dinâmico sem confinamento.

Figura 4.13 - *Ranking* dos FN nos ensaios de Referência e *creep* dinâmico sem confinamento - misturas C2, C3 e R1.

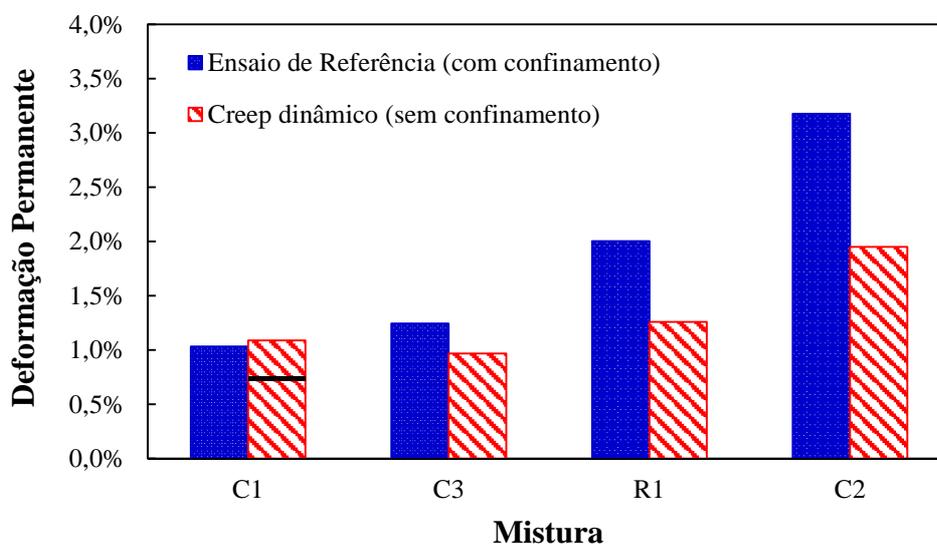


Fonte: Autor deste trabalho.

Os valores das deformações encontradas para as misturas C2, C3 e R1 também foram maiores no ensaio de Referência, o que confirma a forte influência exercida pela tensão atuante e pelo tempo de carregamento no comportamento da mistura asfáltica quanto à resistência à deformação permanente. Observou-se que no caso da Mistura C1 o nível de deformação final foi levemente maior no ensaio de *creep* dinâmico ($\epsilon_{vp} = 1,089\%$), como indicada na Figura 4.14. Porém, esta comparação é em relação à deformação medida no ciclo

600 do ensaio de Referência (TRLPD). Ou seja, tomou-se a deformação no ciclo 600 do ensaio de *creep* dinâmico ($\epsilon_{vp} = 0,549\%$), comparando-a à deformação no ciclo 600 do ensaio de Referência ($\epsilon_{vp} = 1,034\%$). Portanto, é mostrada uma linha horizontal na barra da Mistura C1 que indica a deformação ocorrida no ciclo 600 no ensaio de *creep* dinâmico. Assim, o *ranking* das misturas quanto ao nível de deformação é dado em ordem crescente por: C1, C3, R1 e C2.

Figura 4.14 - Níveis de deformação nos ensaios de Referência e *creep* dinâmico - misturas C1, C2, C3 e R1.



Fonte: Autor deste trabalho.

Observou-se que o teor de CAP exerceu a maior influência nos resultados de FN e níveis de deformação. As principais características de dosagem de cada mistura avaliada nessa pesquisa, assim como os resultados dos ensaios de Referência e *creep* dinâmico estão reunidos na Tabela 4.7. Vale ressaltar que, independente do Vv de projeto para definição do teor de projeto, o valor de 5,5% foi utilizado nos CP's de todas as misturas para os ensaios mecânicos realizados.

Tabela 4.7 - Parâmetros de dosagem e resultados dos ensaios de Referência e *creep* dinâmico sem confinamento.

Mistura	Parâmetro				Ensaio			
	Teor de CAP (%)	TMN (mm)	Vv de projeto (%)	Vv de ensaio (%)	Referência		<i>Creep</i> dinâmico	
					FN	ϵ_{vp} (%)	FN	ϵ_{vp} (%)
C1 ⁽¹⁾	4,5	19,0	4,0	5,5	600 ⁽³⁾	1,034	10.000 ⁽⁴⁾	1,089
C2 ⁽²⁾	6,0	12,5	4,2	5,5	29	3,176	46	1,950
C3 ⁽²⁾	5,7	9,5	3,4	5,5	110	1,245	177	0,967
R1 ⁽¹⁾	5,5	12,5	3,9	5,5	92	2,003	133	1,260

⁽¹⁾ Misturas dosadas de acordo com a metodologia Superpave.

⁽²⁾ Misturas dosadas de acordo com a metodologia Marshall.

⁽³⁾ Não apresentou ruptura no ciclo 600, critério de parada do ensaio de Referência.

⁽⁴⁾ Não apresentou ruptura no ciclo 10.000, critério de parada do ensaio de *creep* dinâmico.

Fonte: Autor deste trabalho.

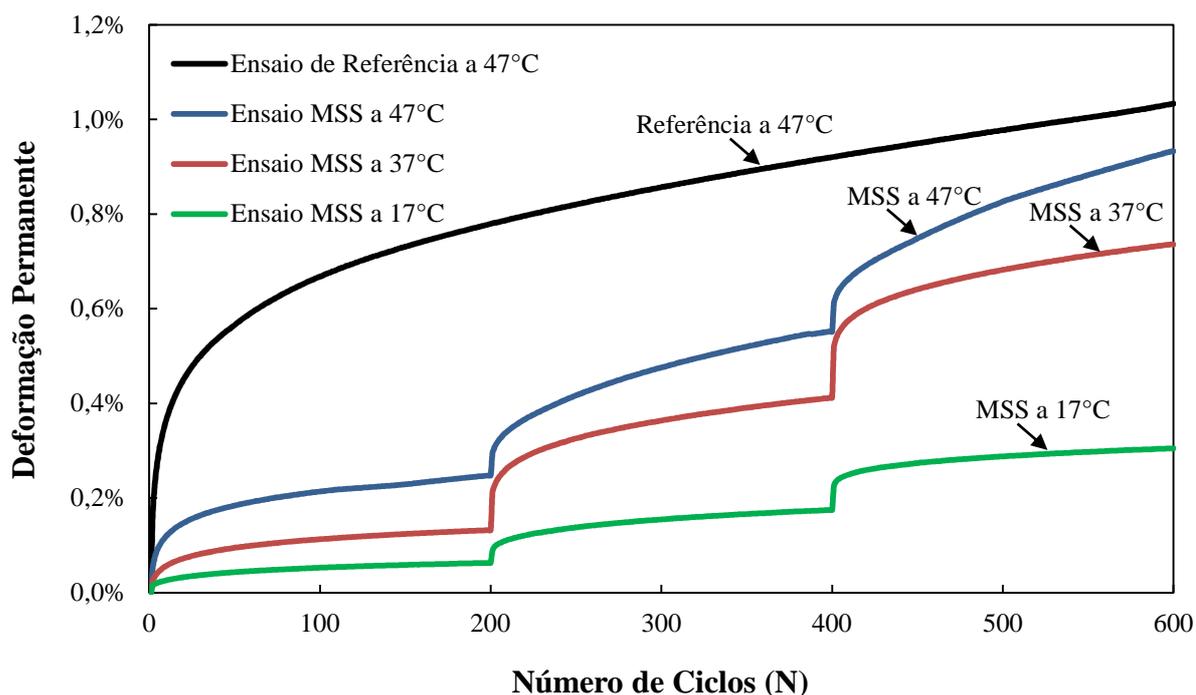
4.3 Análise do *Shift Model*

A utilização completa do *Shift Model* só é possível em misturas que não apresentem FN até o ciclo 600 no ensaio de Referência, como também a posterior realização dos ensaios MSS. Assim, para a aplicação do modelo em questão é necessária a obtenção da curva de referência e as três curvas MSS (Figura 4.15). A Mistura C1 foi a única que apresentou resistência suficiente quanto à deformação permanente para a completa utilização do *Shift Model*, uma vez que as misturas C2, C3 e R1 apresentaram ruptura antes dos 600 ciclos no ensaio de Referência. O *Shift Model*, que é um modelo viscoplástico para a análise da deformação permanente em misturas asfálticas que leva em consideração os princípios da superposição tempo-temperatura (t-TS) e tempo-tensão (t-SS), foi aplicado de forma completa na Mistura C1 a partir dos dados dos ensaios TSS (Referência e MSS).

A Figura 4.15 apresenta o comportamento das curvas dos ensaios TSS da Mistura C1. A curva de referência apresentou nível de deformação maior quando comparado ao da curva do ensaio MSS a 47°C. O comportamento das curvas dos ensaios TSS configura uma condição na qual a curva de referência passa a ser a principal curva de deformação permanente do

protocolo de ensaio, pois a partir dela é realizada a modelagem para a obtenção dos parâmetros de regressão da função ajuste do tempo de carregamento reduzido e da função ajuste de tensão vertical. Assim, a curva de referência, proveniente do ensaio de Referência, representa a condição mais rigorosa dos ensaios TSS. Este comportamento das curvas dos ensaios TSS também é encontrado para a Mistura NY9.5B (Choi, 2013).

Figura 4.15 - Curvas dos ensaios TSS - Mistura C1.



Fonte: Autor deste trabalho.

A obtenção dos *Shift factors* que associam o princípio da superposição tempo-temperatura (t-TS) e princípio tempo-tensão (t-SS) permite correlacionar como a temperatura e a tensão influenciam nos níveis de deformação permanente. Ou seja, os *Shift factors* (fatores de translação) do *Shift Model* estão relacionados à translação de curvas (curva de referência e curvas MSS). A Figura 4.15 avalia os efeitos de condições variadas de ensaio e correlaciona com a curva de referência, uma vez que em campo o material nunca está sujeito a apenas uma condição de carregamento (peso veicular), período de repouso (intervalo de passada entre um veículo e outro) e temperaturas de ensaio (a qual está diretamente associada ao PG do ligante, sendo uma característica do ligante e da região). Assim, pode-se avaliar que os ensaios MSS fornecem não só variados níveis de deformação permanente, mas também contribuem para o

melhor entendimento quanto a propriedade do material, uma vez que há uma varredura de diferentes níveis de temperatura e tensão.

O princípio dos ensaios TSS (os quais englobam o ensaio de Referência e os ensaios MSS) pode ser correlacionado ao princípio do $|E^*|$, o qual avalia a rigidez da mistura asfáltica e fornece resultados obtidos pelo processo de translação de curvas. Ou seja, não se ensaia em determinadas condições, mas é possível conhecer o comportamento do material (resultados de $|E^*|$ e ângulo de fase) a partir da construção de curvas mestras pelo processo de translação de eixos. Portanto, o *Shift Model* também avalia o efeito da temperatura e tensão em variadas condições de ensaio, de modo a se compreender o comportamento a partir do princípio da translação de curvas.

4.3.1 Análise do *shift factor* total

O *shift factor* total (a_{total}) foi determinado em cada um dos três níveis de tensão para cada uma das três temperaturas do ensaio MSS, ou seja, ao todo foram determinados nove *shift factors*. O a_{total} é um fator de ajuste que relaciona os níveis de deformação nos ensaios MSS com os níveis de deformação no ensaio de Referência, no início e no fim de cada bloco de carregamento. A partir das Equações 3.3 e 3.4 foi possível determinar os N_{red}^B e N_{red}^E no início e no fim de cada um dos três blocos de carregamento para cada um dos três níveis de temperatura. Observou-se que o comportamento das curvas dos ensaios TSS refletiu na correlação entre o número de ciclos iniciais e finais e o número de ciclos reduzidos iniciais e finais de cada bloco de carregamento. Ou seja, a deformação apresentada, por exemplo, no ciclo 401 da curva MSS para a temperatura de 47°C equivale à deformação apresentada no ciclo 68 no ensaio de Referência. A Tabela 4.8 apresenta todos os valores de N_{red}^B e N_{red}^E por bloco de carregamento em cada nível de temperatura do ensaio MSS.

Tabela 4.8 - Número de ciclos reduzido no início e no final de cada bloco de carregamento.
Shift Model - Mistura C1.

Temperatura (°C)	Tensão desvio (kPa)					
	483 (70psi)		690 (100psi)		897 (130psi)	
	1° Bloco (1 - 200)		2° Bloco (201 - 400)		3° Bloco (401 - 600)	
	N_{red}^B	N_{red}^E	N_{red}^B	N_{red}^E	N_{red}^B	N_{red}^E
17	0	0,36	0,55	1,56	2,62	5,57
37	0	0,99	2,27	14,54	34,39	152,89
47	0	3,27	4,98	44,90	68,06	432,75

Fonte: Autor deste trabalho.

A partir dos valores da Tabela 4.7 foi calculado cada a_{total} para os três níveis de temperatura nos respectivos blocos de carregamento. O valor do a_{total} aumentou na medida em que o valor do N_{block}^E também aumentou, pois a tensão desvio de 897kPa (130psi) possibilitou maiores valores de deformação nos ensaios MSS, uma vez que os níveis de deformação são máximos no fim dos ensaios TSS. Cada a_{total} foi determinado conforme a Equação 3.7, repetida abaixo, e os valores desse fator de ajuste estão expressos na Tabela 4.9.

$$a_{total} = \log \left(\frac{N_{red}^E - N_{red}^B}{N_{block}^E - N_{block}^B} \right)$$

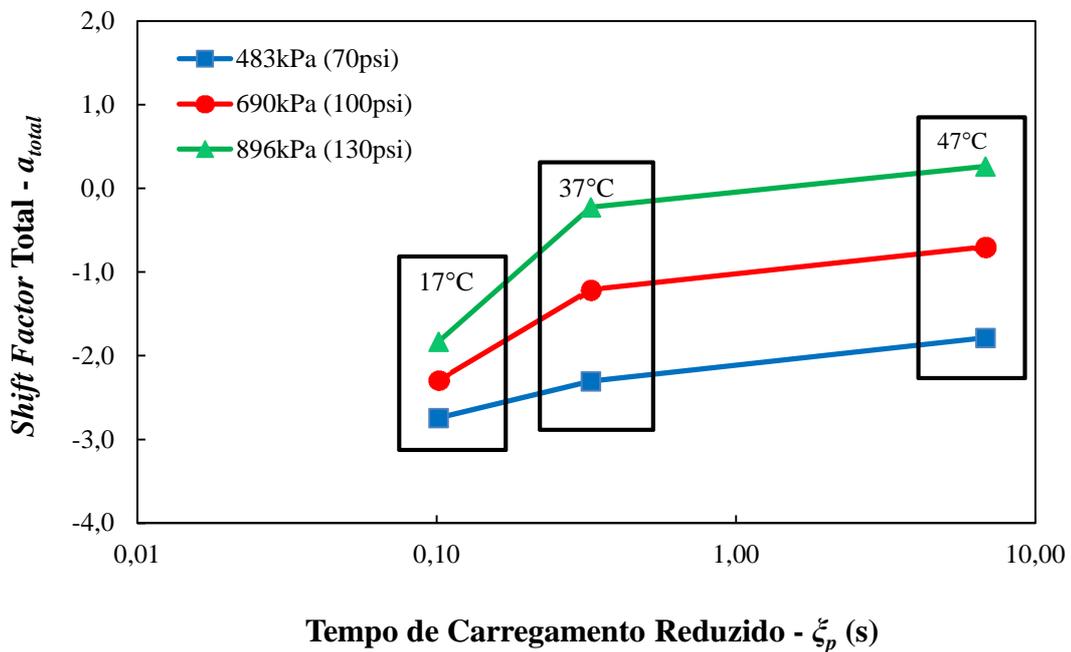
Tabela 4.9 - Valores do a_{total} . *Shift Model* - Mistura C1.

Temperatura (°C)	a_{total}		
	483kPa (70psi)	690kPa (100psi)	897kPa (130psi)
	1° Bloco (1 - 200)	2° Bloco (201 - 400)	3° Bloco (401 - 600)
17	-2,742	-2,294	-1,829
37	-2,302	-1,210	-0,225
47	-1,784	-0,698	0,263

Fonte: Autor deste trabalho.

O tempo de carregamento reduzido (ξ_p), sendo a correlação física do efeito da temperatura e o tempo de carregamento nos ensaios TSS, foi determinado a partir da Equação 3.8. Vale ressaltar que são determinados três ξ_p , um para cada nível de temperatura onde a tensão desvio equivale a 690kPa (100psi). Os valores para o ξ_p nas temperaturas de 17°C, 37°C e 47°C valem respectivamente 0,102s, 0,327s e 6,816s. Os três ξ_p representam condições distintas de tempo de carregamento nos ensaios TSS, o qual utiliza 0,4s. Dessa forma, foi possível observar como o a_{total} aumenta na medida em que as condições de ensaio se tornam mais rigorosas. Ou seja, a translação de cada curva dos ensaios MSS para a curva do ensaio de Referência é representada por um valor (a_{total}) que tende a aumentar quando os níveis de deformações das curvas MSS se aproximam dos níveis da curva de referência. O gráfico de evolução do a_{total} a partir do tempo de carregamento reduzido é representado pela Figura 4.16.

Figura 4.16 - Gráfico a_{total} versus ξ_p . Shift Model - Mistura C1.



Fonte: Autor deste trabalho.

4.3.2 Análise do princípio da superposição tempo-temperatura (t-TS)

O princípio da superposição tempo-temperatura (t-TS) está associado à função tempo de carregamento reduzido. A correlação entre o ξ_p com o *shift factor* do tempo de carregamento reduzido (a_{ξ}) mostrou que há um aumento no valor do a_{ξ} quando o ξ_p também aumenta. Ou seja, se os ensaios TSS fossem realizados em períodos maiores de aplicação de carga os valores de deformação seriam maiores e estariam associados à maiores níveis de temperatura, pois o a_{ξ} assume o valor do a_{total} , que está associado a maiores valores de deformação com o aumento de temperatura para o mesmo valor de tensão desvio aplicada.

Vale ressaltar que foram determinadas três equações para a função ajuste do tempo de carregamento reduzido. Cada equação é referente a um nível de temperatura (17°C, 37°C e 47°C), e é constituída pelo valor de a_{ξ} (valor referente ao a_{total} onde a tensão desvio é 690kPa (no referido nível de temperatura) de acordo com a Tabela 4.9, e pelo valor de ξ_p no referido nível de temperatura. Portanto, os parâmetros de regressão da função ajuste do tempo de carregamento reduzido, a_1 , a_2 e a_3 , tornaram-se solução para cada uma das três equações derivadas da Equação 3.10, repetida abaixo.

$$a_{\xi} = a_1(\xi_p)^{a_2} + a_3 \quad (3.10)$$

As funções de ajuste do tempo de carregamento reduzido estão expressas pelas Equações 4.1, 4.2 e 4.3, e representam respectivamente os níveis de temperatura 17°C, 37°C e 47°C.

$$-2,294 = a_1(0,102)^{a_2} + a_3 \quad (4.1)$$

$$-1,210 = a_1(0,327)^{a_2} + a_3 \quad (4.2)$$

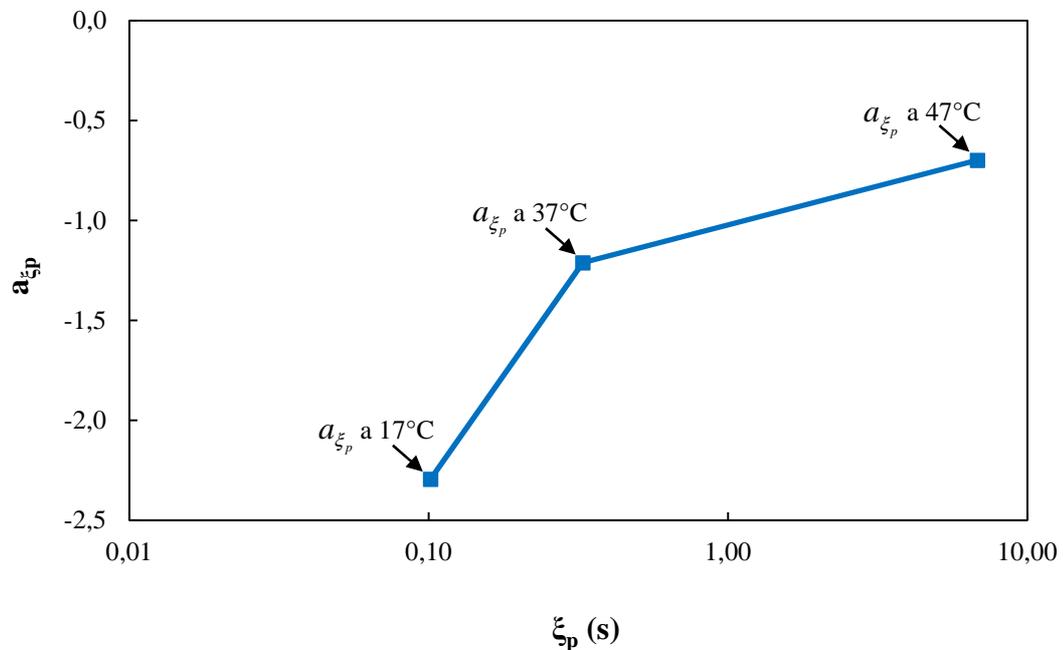
$$-0,698 = a_1(6,816)^{a_2} + a_3 \quad (4.3)$$

A determinação dos parâmetros de regressão da função ajuste do tempo de carregamento reduzido, a_1 , a_2 e a_3 , foi possível pela redução do erro quadrático, conforme a Equação 3.11, repetida a seguir. Vale lembrar que no Capítulo 3 foi sugerida a utilização do Solver para determinação da redução do erro quadrático.

$$erro_{quadrático} = \sum_{i=1}^3 (a_{\xi_p} - a_{\xi_p}^{estimado})^2 \quad (3.11)$$

A partir da Equação 3.11 foram estimados valores para os *shift factors* do tempo de carregamento reduzido ($a_{\xi_p}^{estimado}$), com a finalidade de encontrar a maior redução do erro quadrático. Essa redução no erro possibilitou determinar os parâmetros, a_1 , a_2 e a_3 que apresentaram valores respectivamente de 6,4678, 0,0512 e -7,7335, e possibilitaram soluções satisfatórias para as Equações 4.1, 4.2 e 4.3. O gráfico de relação entre o ξ_p e o a_{ξ_p} é representado pela Figura 4.17.

Figura 4.17 - Gráfico a_{ξ_p} versus ξ_p . *Shift Model* - Mistura C1.



Fonte: Autor deste trabalho.

4.3.3 Análise do princípio da superposição tempo-tensão (t-SS)

O princípio da superposição tempo-tensão (t-SS) está associado à função ajuste de tensão vertical, a qual é aplicada no CP durante os ensaios TSS (TRLPD e MSS). A determinação dos parâmetros de regressão da função ajuste de tensão vertical, b_1 , b_2 e b_3 , possibilitou correlacionar os *shift factors* de tensão vertical (a_{σ_v}) com os níveis de tensão vertical. Dessa forma, observou-se que o aumento da tensão vertical ocasionou aumento do a_{σ_v} . Vale ressaltar que foram determinados três a_{σ_v} , um para cada nível de tensão desvio, a partir da subtração do a_{ε_p} pelo a_{total} (Equação 3.12). Ou seja, o a_{total} é o *shift factor* que associa os dois princípios de superposição avaliados pelo *Shift Model*.

Cada nível de tensão desvio avaliado correspondeu a uma relação σ_v / P_a . Os níveis de tensão desvio adotados nos ensaios MSS foram 483, 690 e 897kPa (70, 100 e 130psi), e o valor da P_a (pressão atmosférica) adotada na modelagem foi de 101,325kPa (14,696psi). Dessa forma, a relação σ_v / P_a torna-se adimensional e quantifica quantas vezes a P_a interagiu nos ensaios TSS. Os parâmetros de regressão da função ajuste de tensão vertical, b_1 , b_2 e b_3 , tornaram-se solução para cada uma das três equações originadas da Equação 3.13, repetida abaixo:

$$a_{\sigma_v} = b_1 \left(\frac{\sigma_v}{P_a} \right)^{b_2} + b_3 \quad (3.13)$$

As três funções ajuste de tensão vertical estão representadas pelas Equações 4.4, 4.5 e 4.6, e representam respectivamente os níveis de tensão desvio de 70, 100, e 130psi, os quais foram adotados para a modelagem, assim como a P_a de 14,696psi.

$$-0,876 = b_1 (5,443)^{b_2} + b_3 \quad (4.4)$$

$$0 = b_1 (7,485)^{b_2} + b_3 \quad (4.5)$$

$$0,803 = b_1 (9,526)^{b_2} + b_3 \quad (4.6)$$

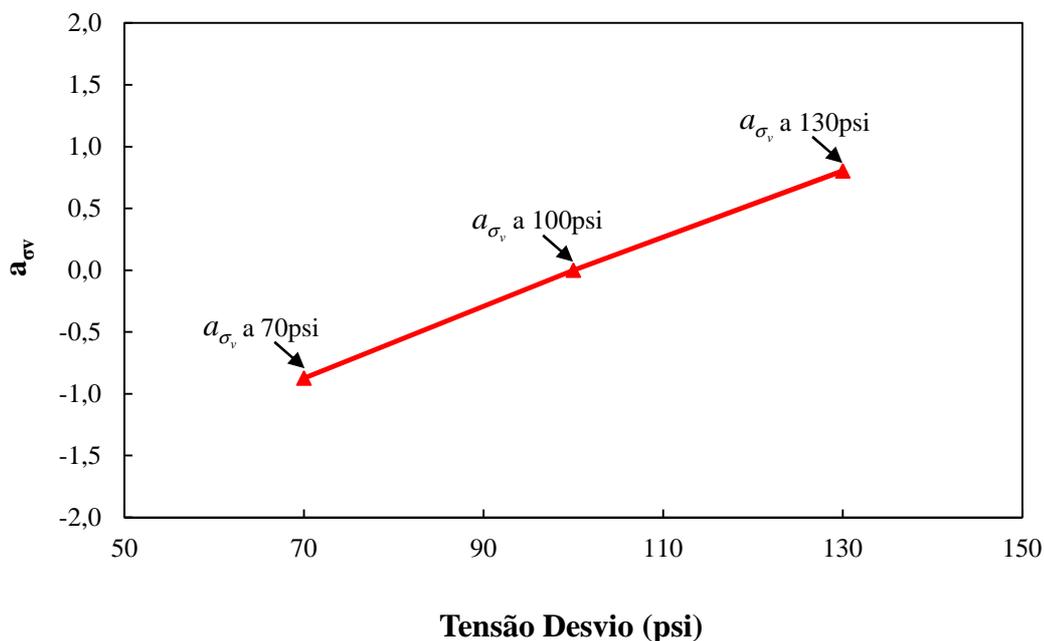
Observa-se que na Equação 4.5 o a_{σ_v} assume valor igual a zero, pois para a tensão desvio de 690kPa (100psi) o a_{ξ_p} tem o mesmo valor do a_{total} . Quando o a_{σ_v} assume o valor igual a zero, significa que não há ajuste nesse nível de tensão desvio, pois o ensaio de Referência foi realizado com tensão desvio de 690kPa (100psi).

Os parâmetros de regressão da função ajuste de tensão, b_1 , b_2 e b_3 , também foram calculados pela redução do erro quadrático, de acordo com a Equação 3.14, repetida abaixo. O Solver foi sugerido para a redução do erro quadrático, conforme discutido no Capítulo 3.

$$erro_{quadrático} = \sum_{i=1}^3 (a_{\sigma_v} - a_{\sigma_v}^{estimado})^2 \quad (3.14)$$

O erro quadrático também foi reduzido a partir de valores para os *shift factors* de tensão vertical estimados ($a_{\sigma_v}^{estimado}$), a partir da Equação 3.14. A aproximação entre os valores de a_{σ_v} e $a_{\sigma_v}^{estimado}$ tornou melhor a redução do erro. Em vista disso, os parâmetros b_1 , b_2 e b_3 , com valores respectivamente de 0,0077, 2,5103 e -1,3507 forneceram soluções satisfatórias para as Equações 4.4, 4.5 e 4.6. A Figura 4.18 representa a relação entre o a_{σ_v} e o nível de tensão desvio.

Figura 4.18 - Gráfico a_{σ_v} versus tensão desvio. *Shift Model* - Mistura C1.



Fonte: Autor deste trabalho.

O *Shift Model* também denomina os parâmetros de regressão a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 e b_3 de coeficientes de ajuste de função, pois estão correlacionados às funções de ajuste do tempo de carregamento reduzido e tensão vertical. Ao término do protocolo de ensaio, deve-se reportar: os valores de temperatura (T_L , T_I e T_H); os níveis de deformação medidos a cada ciclo de carregamento no ensaio de Referência e nos ensaios MSS; os parâmetros B , C e α e os coeficientes de ajuste de função a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 e b_3 .

Os coeficientes de ajuste de função determinados para a Mistura C1 apresentaram valores próximos quando comparados aos da Mistura NY9.5B encontrada no trabalho de Choi (2013). Vale ressaltar que a utilização do *Shift Model* nesse trabalho foi realizada tanto no MATLAB (o qual possui um código no Apêndice B deste documento) quanto no Excel. Sendo assim, alguns critérios de cálculo podem apresentar diferenças não significativas nos resultados. Portanto, a partir dos valores encontrados em literatura e das várias simulações de modelagem realizadas nessa pesquisa, recomenda-se o uso até a quarta casa decimal nos valores dos parâmetros do modelo em questão. A Tabela 4.10 mostra os valores de todos os parâmetros obtidos após a aplicação do *Shift Model* para as misturas C1 e NY9.5B.

Tabela 4.10 - Parâmetros do *Shift Model* - misturas C1 e NY9.5B.

Parâmetro	Mistura	
	C1	NY9.5B
B	0,0024	0,0051
C	1,1452	1,8046
α	0,7760	0,8007
a_1	6,4678	5,6076
a_2	0,0512	0,1087
a_3	-7,7335	-5,7442
b_1	0,0077	0,0034
b_2	2,5101	2,5198
b_3	-1,3507	-0,4262
ε_{vp} (%) no ciclo 600	1,034	1,800

Fonte: Autor deste trabalho.

4.4 Análise das simulações de desempenho de pavimento no programa *Layered Viscoelastic Continuum Damage* (LVECD)

As análises no LVECD foram feitas na Petrobras/Cenpes e os resultados são mostrados a seguir. Foram utilizadas características de clima semelhantes às das regiões Sul e Sudeste do Brasil. As simulações foram realizadas para um período de 10 anos. As características das camadas que compõem o pavimento e as considerações de tráfego estão descritas no Capítulo 3. As simulações foram realizadas para a Mistura C1, a qual permitiu a obtenção dos parâmetros da curva de referência e os coeficientes de ajuste de função do *Shift Model*.

O ensaio de $|E^*|$ foi realizado conforme a AASHTO T 342 - 11 (2011) - *Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)*. O LVECD é um programa que leva em consideração duas abordagens as quais consideram: (i) avaliação das propriedades viscoelásticas lineares (LVE), sendo para isso necessário como *input* os valores dos coeficientes da série de Prony da função $\mathcal{E}(t)$, obtidos a partir do $|E^*|$ e (ii) usa também as LVE para prever as respostas, as quais são conectadas aos parâmetros do *Shift Model*, para assim prever o desempenho do pavimento. Ou seja, trata-se de uma *framework* composta de

duas etapas. A Tabela 4.11 apresenta os valores do $|E^*|$ e ângulo de fase que foram utilizados na análise.

Tabela 4.11 - Valores do $|E^*|$ e ângulo de fase - Mistura C1.

Frequência (Hz)	$ E^* $ (MPa)					Ângulo de Fase (°)				
	Temperatura (°C)					Temperatura (°C)				
	-10	4	21	37	54	-10	4	21	37	54
25	47165	32141	17737	6599	2580	3,92	9,41	17,77	19,59	24,79
10	45487	29282	14712	4748	1656	4,45	11,95	10,54	21,81	23,58
5	43855	27084	12588	3691	1231	3,91	8,85	5,47	13,8	9,82
1	39941	21900	8370	2041	632	5,99	14,84	24,32	11,35	25,43
0,5	38068	19757	6837	1541	498	5,63	15	24,56	8,9	16,4
0,1	33616	15150	4170	905	371	7,21	18,02	26,84	29,18	7,67

Fonte: Autor deste trabalho.

Os resultados do LVECD obtidos a partir das simulações mostraram que a Mistura C1 apresentou níveis de deformações permanentes máximas (viscoplásticas) na trilha de roda inferiores a 2mm. Aceita-se, em geral, valores de até 12,5mm, o qual vem sendo adotado como critério máximo de deformação permanente tanto por grupos de pesquisa norte-americanos (por exemplo a NCSU em suas pistas experimentais no NCAT), quanto por grupos de pesquisas nacionais (por exemplo a Petrobras/Cenpes em suas pistas experimentais na Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ). Valores de deformação na camada asfáltica superiores a 12,5mm equivalem a uma condição de falha na estrutura do pavimento, pois problemas como hidroplanagem podem ocorrer (Choi, 2013; LaCroix, 2013). É importante ressaltar que a análise do LVECD gera valores de deformações com unidades (mm ou cm), uma vez que essas deformações são o produto da espessura do pavimento (mm ou cm) pelas deformações permanentes (as quais não possuem unidade) avaliadas em laboratório.

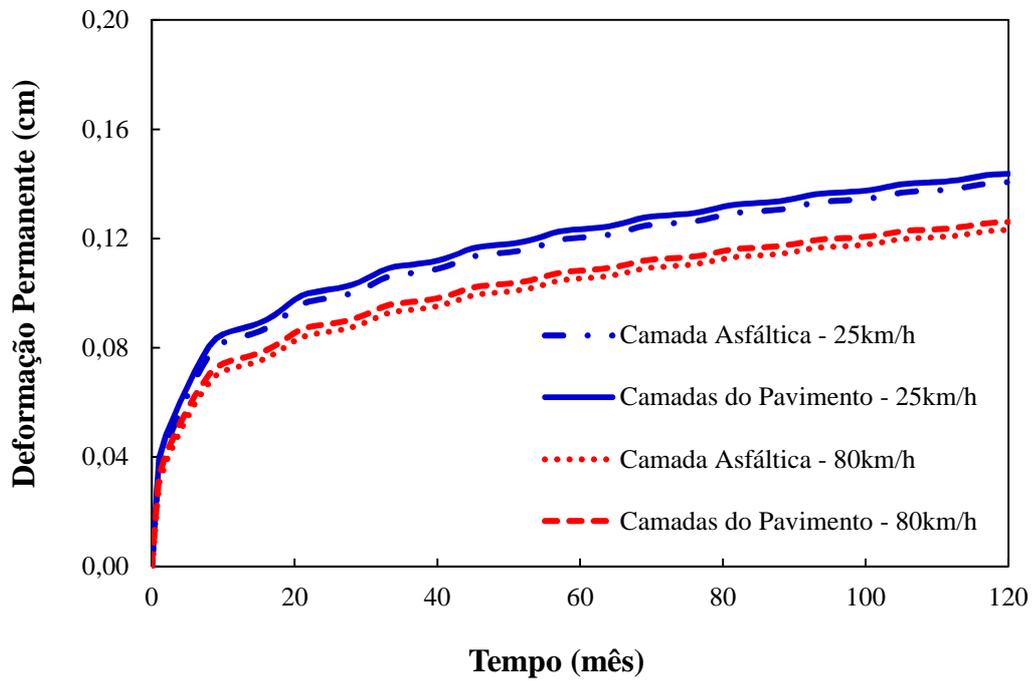
Os resultados apresentados pela simulação do LVECD mostraram que a rigidez das camadas granulares possibilitou observar melhor o comportamento da mistura asfáltica quanto à evolução da deformação permanente, uma vez que os níveis de deformação permanente encontrados nessas sub camadas foram desprezados por apresentarem valores muito baixos. Os valores de deformação apresentados para a velocidade de 80km/h representam a condição de tráfego rápido. A simulação referente à velocidade de 25km/h é considerada tráfego lento.

Porém, 25km/h ainda pode ser considerada uma velocidade elevada quando se tratam de interseções, paradas de ônibus, etc.

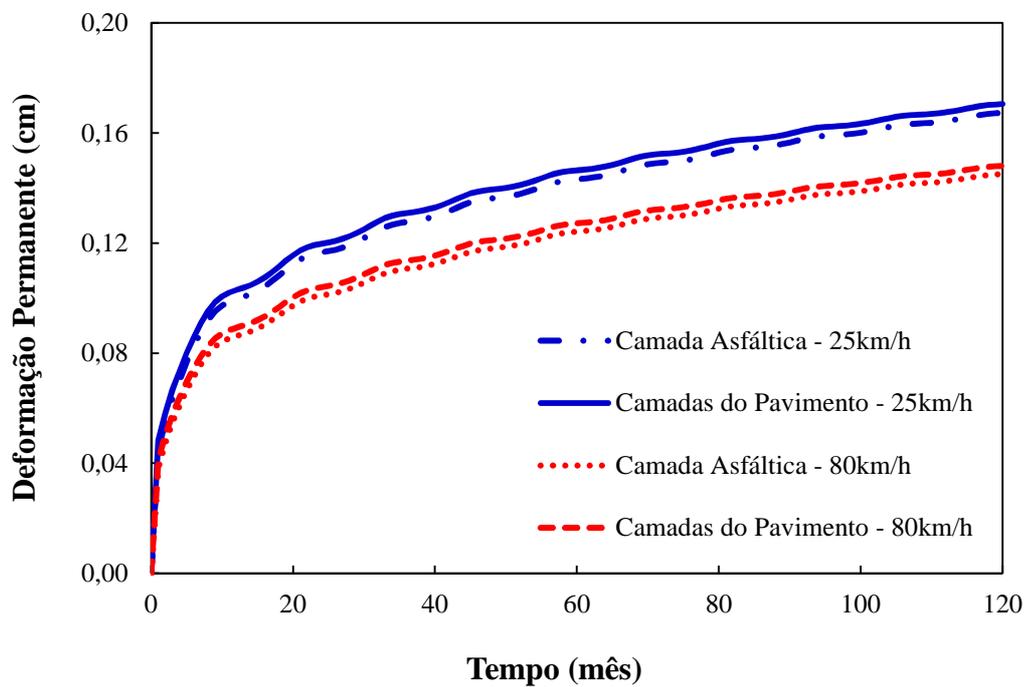
As simulações referentes à região Sul mostraram que tanto os níveis de deformações acumuladas (permanentes) da camada asfáltica quanto os das demais camadas do pavimento (incluindo a própria camada asfáltica) sempre foram maiores na velocidade de 25km/h. Os níveis de deformações permanentes encontrados para cada velocidade são representados por uma curva de desempenho, na qual é possível observar o nível máximo de deformação acumulada na trilha de roda ao final do período de 10 anos. A Figura 4.19 (a) representa as curvas de simulação da região Sul, no que se refere às deformações acumuladas na trilha de roda da camada asfáltica e nas camadas do pavimento.

As simulações realizadas para a região Sudeste apresentaram padrão de comportamento similar às da região Sul quanto aos níveis de deformação acumulados na camada asfáltica e nas camadas do pavimento. Ou seja, os maiores níveis de deformação surgiram na velocidade de 25km/h. As curvas da simulação para deformações acumuladas na trilha de roda da camada asfáltica e nas camadas do pavimento da região Sudeste estão representadas na Figura 4.19 (b).

Figura 4.19 - Deformações acumuladas na trilha de roda da camada asfáltica e nas camadas do pavimento. LVECD: (a) Região Sul e (b) Região Sudeste - Mistura C1.



(a)



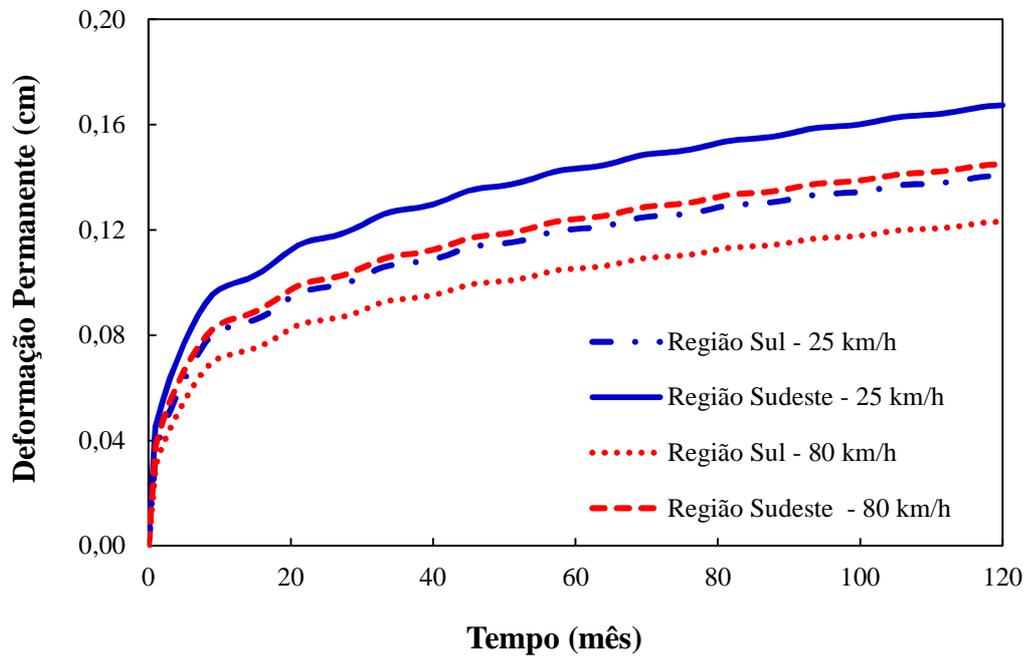
(b)

Fonte: Petrobras/Cenpes (2014).

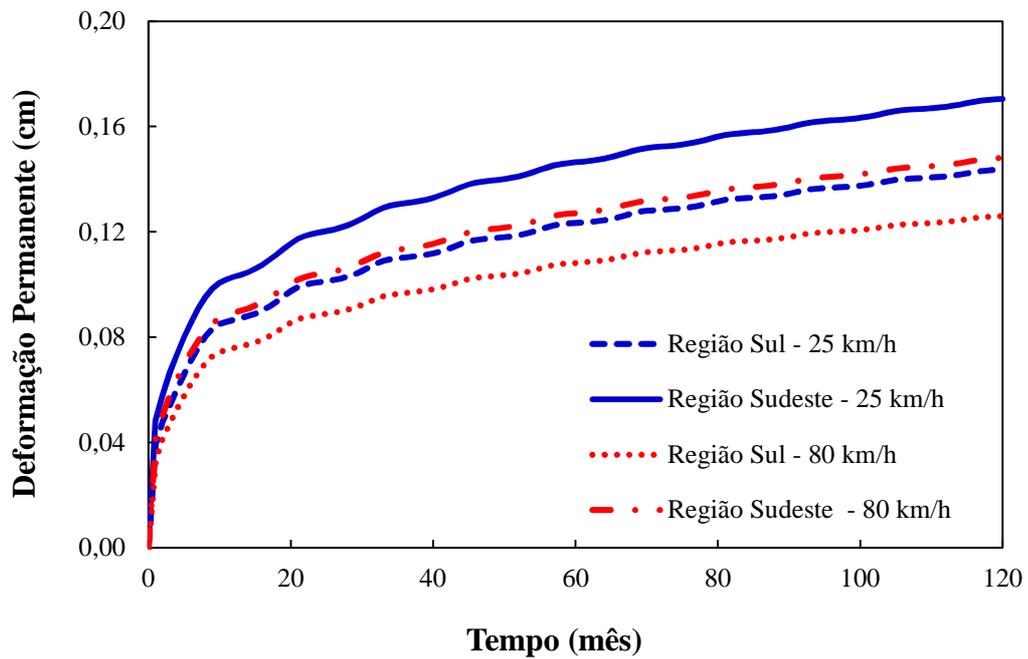
Os níveis de deformação permanente para a camada asfáltica da região Sudeste foram maiores nas mesmas condições de velocidade de tráfego quando comparados aos da região Sul. Na comparação entre a velocidade de 80km/h da região Sudeste com a velocidade de 25km/h da região Sul, os valores de deformações acumuladas também foram maiores para a região Sudeste. Os valores de deformações acumuladas na camada asfáltica das regiões Sul e Sudeste foram reunidos por velocidade e apresentados conforme a Figura 4.20 (a).

As camadas do pavimento também apresentaram comportamento similar aos da camada asfáltica quanto à relação velocidade e região, ou seja, a velocidade de 25km/h para a região Sudeste também apresentou o maior valor de deformação acumulada, assim como a velocidade de 80km/h para a região Sul apresentou o menor valor de deformação acumulada ao final dos 10 anos de simulação. As curvas da deformação acumulada nas camadas do pavimento estão apresentadas para cada região por velocidade de tráfego, conforme a Figura 4.20 (b).

Figura 4.20 - Regiões Sul e Sudeste. LVECD: (a) deformações acumuladas na camada asfáltica e (b) deformações acumuladas nas camadas do pavimento - Mistura C1.



(a)



(b)

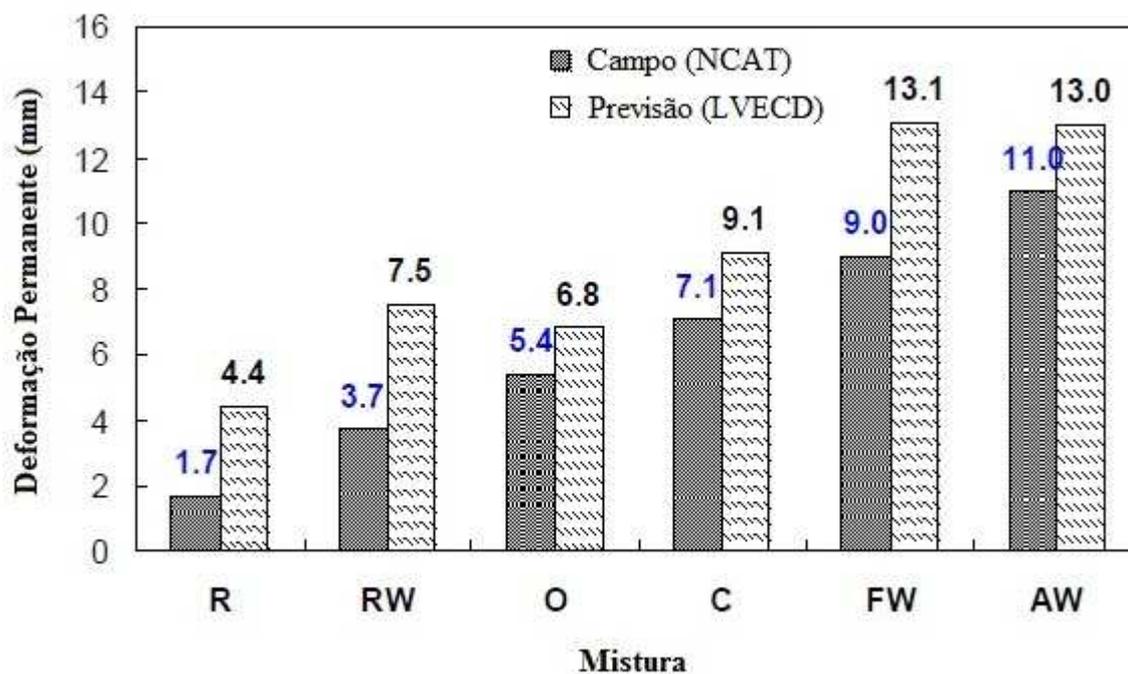
Fonte: Petrobras/Cenpes (2014).

As condições de carregamento (peso veicular), velocidade de tráfego, características das camadas granulares e pressão do pneu foram consideradas as mesmas para

ambas as regiões. Portanto, constata-se que as condições climáticas da região Sudeste exerceram maior influência nos níveis de deformação acumulados ao final do período de 10 anos. As características climáticas estão associadas aos valores mínimos e máximos de temperatura, umidade do ar e velocidade do vento. Vale ressaltar que os dados de temperatura são valores médios da região e não de um local específico.

As análises no LVECD forneceram todos os valores de deformação acumulados na trilha de roda *versus* número de meses para cada região nas velocidades de 25km/h e 80km/h, e tais valores estão no Anexo A deste documento. À vista dos resultados apresentados pelo LVECD, é importante comentar que o *Shift Model* conseguiu capturar os efeitos de temperatura, velocidade e carga dos veículos de acordo com o que era esperado, pois as variadas situações nos ensaios MSS possibilitaram essa captura.

As simulações apresentadas para os níveis de deformação acumulada na trilha de roda para a Mistura C1 estão na faixa de valores para algumas misturas de campo reportadas por LaCroix (2013), visto que no trabalho do referido autor o afundamento medido foi em média 0,66 vezes o afundamento simulado, conforme mostra a Figura 4.21 (o eixo *y* representa a deformação acumulada na trilha de roda da camada de revestimento e o eixo *x* o código da mistura avaliada em campo). A Tabela 4.12 contém um resumo dos valores de deformação acumulada na camada asfáltica e nas camadas do pavimento das regiões Sul e Sudeste para as velocidades de 25km/h e 80km/h, no período de 10 anos.

Figura 4.21 - Afundamentos na trilha de roda medidos *versus* simulados.

Fonte: Adaptada de LaCroix (2013).

Tabela 4.12 - Regiões Sul e Sudeste - deformações acumuladas na trilha de roda: camada asfáltica e camadas do pavimento. LVECD - Mistura C1.

Camada	Deformações Permanentes (mm)			
	Região Sul		Região Sudeste	
	25km/h	80km/h	25km/h	80km/h
Asfáltica	1,41	1,23	1,67	1,45
Pavimento	1,44	1,26	1,71	1,48

Fonte: Petrobras/Cenpes (2014).

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este estudo teve como principal objetivo a aplicação do *Shift Model*, o qual é um modelo viscoplástico para a análise de deformação permanente em misturas asfálticas. Os ensaios TSS (ensaios confinados), aplicados neste trabalho, foram realizados de forma pioneira no Brasil, e por meio deles foi possível avaliar a influência do carregamento triaxial, que representa melhor a condição da mistura asfáltica em campo (condição de confinamento). O ensaio de *creep* dinâmico, que é utilizado para caracterizar a deformação permanente em misturas asfálticas, também foi realizado, uma vez que mostra maior simplicidade de execução. Foram realizadas simulações de curvas de desempenho quanto à deformação permanente no programa LVECD a partir de dados obtidos da aplicação do modelo investigado. Com base nos fundamentos teóricos abordados na revisão bibliográfica e a utilização de quatro misturas do tipo concreto asfáltico, foi adotado um plano experimental envolvendo um protocolo de ensaio, o qual tem como base ensaios confinados, para a posterior comparação dos resultados com os obtidos nos ensaios de *creep* dinâmico sem confinamento. Os resultados e as análises dos dados oriundos da revisão bibliográfica e do plano experimental levaram às seguintes conclusões:

- A adição do polímero Polimul S-74 à Mistura C1 garantiu os melhores resultados nos ensaios mecânicos (*creep* dinâmico e Referência) quanto à resistência à deformação permanente. A modificação do ligante tornou essa mistura resistente o suficiente para que ela não apresentasse FN até o critério de parada de cada ensaio mecânico. Onofre (2012), em sua pesquisa desenvolvida no LMP/UFC, também concluiu que misturas, independentemente dos agregados utilizados (granítico e basáltico), quando modificadas por polímeros e PPA não atingiram o FN nos ensaios de *creep* dinâmico, indicando serem de melhor qualidade quanto à deformação permanente. Assim, a utilização de polímeros assegura que as misturas asfálticas aumentem a resistência quanto à deformação permanente;
- As misturas C2, C3 e R1 não foram modificadas por polímeros e foram compostas respectivamente por agregados de origem gnáissica, fonolítica e granítica. Essas misturas apresentaram rompimento antes dos 600 ciclos no ensaio de Referência (TRLPD), assim como rompimento antes dos 10.000 ciclos no ensaio de *creep* dinâmico sem confinamento. Portanto, verificou-se que

nenhum dos três tipos de agregados foi suficiente para a favorecer resistência quanto à deformação permanente, no que se refere a atingir o critério mínimo de parada em cada ensaio mecânico. Vale ressaltar que as curvas dessas três misturas foram enquadradas na Faixa C do DNIT, que é uma faixa densa e, portanto, indicada na literatura como uma granulometria não das mais adequadas para combater a falha estudada nessa dissertação;

- As curvas do ensaio de Referência e as curvas da modelagem apresentaram boas correlações gráficas, a partir da aplicação parcial do modelo. A obtenção dos coeficientes α , B e C possibilitou compreender de que forma cada parâmetro da curva de referência está associado ao comportamento quanto à deformação permanente. A Mistura C1, que não apresentou ruptura, obteve o maior valor do parâmetro α , e a Mistura C2, que apresentou o menor FN, alcançou o menor valor de α , uma vez que maiores ciclos sem ruptura estão associados a um maior estado estacionário (*steady state*). Portanto, o coeficiente α , o qual está associado à inclinação da reta que representa a curva no estado estacionário, é um parâmetro de grande relevância do modelo. À vista dos resultados analisados, verificou-se que o modelo em questão apresentou maior ganho de deformações viscoplásticas a partir das variações no valor de α ;
- A influência do teor de CAP também apresentou correlação com o parâmetro α . As misturas C1 e R1 dosadas pela metodologia Superpave apresentaram menores teores de CAP. A Mistura C1 com menor teor de CAP (4,5%) teve o melhor comportamento quanto à resistência à deformação permanente, quando comparada às outras misturas. A redução no teor de CAP está associada a maiores ganhos de resistência quanto à deformação permanente, portanto, os valores de α aumentaram à medida que o teor de CAP foi reduzido;
- As misturas com os maiores FN no ensaio de Referência apresentaram os menores valores de deformação. Ou seja, o critério de ruptura, FN, é menor quanto maiores são os níveis de deformação acumulados a cada ciclo de carregamento. Portanto, o *ranking* do ensaio de Referência, em ordem decrescente de FN é dado por C3, R1 e C2. Os resultados de FN para o ensaio

de *creep* dinâmico apresentaram o mesmo *ranking* do ensaio de Referência. A mesma mistura sempre obteve o maior FN e o menor nível de deformação no ensaio de *creep* dinâmico sem confinamento, ou seja, as condições do ensaio de Referência são mais severas. Porém, a condição de confinamento mobiliza o atrito interno do material, o que é favorável ao intertravamento do esqueleto mineral. Os ensaios confinados também apresentam outra vantagem, uma vez que os resultados servem não só para obter um *ranking* de misturas, mas também servem como *input* de um modelo viscoplástico que é capaz de avaliar níveis de deformações em variadas condições de ensaios para, posterior obtenção e utilização de parâmetros integrados ao LVECD, o qual serve para simular o desempenho do pavimento por um período de até 20 anos;

- A utilização do modelo, conforme a especificação AASHTO TP XX-XX - *Determining the Rutting Parameters of Asphalt Concrete from Triaxial Stress Sweep (TSS) Tests*, é uma alternativa inovadora e eficiente para compreender o comportamento das curvas de deformação permanente desde a formação até a ruptura, uma vez que os parâmetros do modelo em questão representaram bem cada região das curvas de deformação. A partir das curvas dos ensaios MSS é possível obter os coeficientes de ajuste de função, os quais serviram como *inputs* no LVECD. Este trabalho apresenta um passo a passo de como realizar a modelagem completa, que serve para a obtenção de todos os parâmetros do modelo; e
- As análises realizadas no programa LVECD para a Mistura C1 mostraram que as curvas de simulação atingiram bons níveis de deformação após 10 anos de vida útil do pavimento (valores menores que 2,0mm). As análises foram feitas para os climas das regiões Sul e Sudeste do Brasil e mostraram que os maiores níveis de deformação estão associados às velocidades mais baixas de tráfego e às condições climáticas mais severas (onde ocorrem maiores mudanças de temperatura). Os maiores valores de deformação acumulados no pavimento foram para a região Sudeste na velocidade de 25km/h. Porém, esse valor maior de deformação acumulada na trilha de roda, para um período de 10 anos, foi bem menor que o critério máximo admitido (12,5mm), o qual vem sendo adotado em

obras rodoviárias no Brasil e nos Estados Unidos. Portanto, a utilização do LVECD representa uma alternativa a mais para a previsão de desempenho de pavimentos.

Portanto, vale ressaltar que existem variados modelos para a avaliação da deformação permanente de misturas asfálticas, no entanto, alguns são muito simples para representar a evolução desta falha, e outros são mais complexos para calibrar e prever a deformação. O modelo aplicado nesta pesquisa mostrou-se capaz de representar o comportamento mecânico de forma satisfatória, uma vez que a curva de ensaio foi bem representada pela curva do modelo. Assim, o modelo, que deve ser acompanhado pelo protocolo de ensaio, representa uma avanço no entendimento de misturas asfálticas nacionais, e pode ser realizado pelos grupos de pesquisa do Brasil, órgãos do governo, empresas privadas, concessionárias e institutos de pesquisa. Os ensaios TSS contribuíram para a compreensão do comportamento quanto à deformação permanente, o que traz um ganho de informações necessárias para a elaboração da primeira norma para a avaliação deste defeito em escala laboratorial no Brasil. A utilização de ensaios confinados para a avaliação quanto à deformação permanente em misturas asfálticas contribui nas discussões da linha de pesquisa de Mecânica dos Pavimentos, o que deve contribuir para futuras análises e aplicações de métodos mecanístico-empíricos de análise e dimensionamento de pavimentos no país.

A utilização de modelos mecânicos e ensaios confinados para a avaliação de deformação permanente em misturas asfálticas é um assunto amplo, com boas perspectivas de aplicação na pavimentação asfáltica nacional, onde estudos adicionais trarão contribuições para o seu melhor entendimento e aplicação. Dessa forma, as recomendações para futuros trabalhos são as seguintes:

- Aplicar a Mistura C1 em campo (circuito de teste ou obras de pavimentação) para que possam ser medidos os níveis de deformações acumuladas na camada asfáltica e obter os fatores campo/laboratório, com o objetivo de avaliar não só os níveis de tensão desvio dos ensaios TSS, mas também a acurácia da análise no LVECD;
- Elaborar um estudo visando avaliar e sugerir mudanças nas condições dos ensaios TSS, no que se refere principalmente aos níveis de tensão desvio e tensão

confinante, uma vez que essa redução permite a aplicação do modelo e a posterior utilização do LVECD para obter as curvas de simulação;

- Estudos rodoviários visando reunir as condições climáticas do estado do Ceará e Brasil, sendo elas: níveis mínimos e máximos de temperatura, umidade do ar, velocidade do vento e também um banco de dados relacionados à temperatura do pavimento em todos os meses do ano. Assim, essas características podem ser inseridas em programas de desempenho de pavimento e tornar as simulações mais próximas de cada realidade;
- Criar um banco de dados a partir das medições em campo de deformações acumuladas na camada asfáltica para as misturas C2, C3 e R1, visto que essas misturas já estão aplicadas em campo. Esse banco de dados irá permitir a obtenção dos fatores campo/laboratório;
- Utilização dos ensaios TSS e do modelo em misturas asfálticas envelhecidas ou com material fresado a fim de comparar o comportamento quanto à deformação permanente deste tipo de mistura, levando em consideração o comportamento de cada parâmetro do modelo;
- Dosagem de novas misturas que atendam o critério de 600 ciclos no ensaio de Referência sem a adição de polímeros no CAP. Pode-se, por exemplo, utilizar métodos como a dosagem Bailey para verificar a possibilidade de misturas mais resistentes à deformação permanente;
- Avaliação de novas curvas granulométricas com agregados de diferentes fontes e TMN, e com diferentes características de forma (angularidade, cubicidade e textura), de modo a investigar o efeito destes aspectos na resistência à deformação permanente determinada a partir do ensaio aqui delineado; e
- Um estudo em conjunto com outras universidades, centros de pesquisa, órgãos públicos e empresas privadas como também as concessionárias para a criação de

um banco de dados dos parâmetros do modelo, a partir dos ensaios confinados, possibilitando assim a melhor compreensão do defeito da deformação permanente na camada asfáltica do pavimento, e como consequência correlacionar melhor as propriedades volumétricas como teor de CAP, VAM, RBV com os parâmetros do modelo em questão. Tal estudo pode contribuir para uma especificação de ensaio nacional para deformação permanente de misturas asfálticas, que leve em consideração o confinamento (ensaios TRLPD), a fim de melhor representar as características do material em campo.

REFERÊNCIAS

AASHTO T 340 (2010) Determining Rutting Susceptibility of Hot Mix Asphalt Using the Asphalt Pavement Analyzer. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.

AASHTO T 322-07 (2011) Standard Method of Test for Determining the Creep Compliance and Strength of Hot-Mix Asphalt (HMA) Using the Indirect Tensile Test Device. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.

AASHTO T 342 - 11 (2011) Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA). American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.

AASHTO T 324 (2011) Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA). American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.

AASHTO T 312 (2012) Standard Method of Test for Preparing and Determining the Density of Hot-Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.

AASHTO M 323-13 (2013) Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.

AASHTO TP XX-XX - Determining the Rutting Parameters of Asphalt Concrete from Triaxial Stress Sweep (TSS) Tests. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.

AFNOR NF P 98-260-2 (1992) Essais Relatifs aux Chaussées, Mesure des Caractéristiques Rhéologiques des Mélanges Hydrocarbonés - Partie 2: Détermination du Module Complexe par Flexion Sinusoïdale, Association Française de Normalisation, AFNOR.

AFNOR NF EN 12 697 - 22 (2004) Mélanges Bitumineux Méthodes d'essai pour Mélange Hydrocarboné à Chaud. - Partie 22: Essai d'orniérage. Association Française de Normalisation, AFNOR.

AFNOR NF EN 12 697 - 33 (2004) Mélanges Bitumineux Méthodes d'essai pour Mélange Hydrocarboné à Chaud - Partie 33: Confection d'éprouvettes au Compacteur de Plaque. Association Française de Normalisation, AFNOR.

Aragão, F. T. S., Lutif, J. E. S., Kim, Y. R. e Soares, J. B. (2007) Avaliação da Zona de Restrição como Critério Limitador em Misturas Asfálticas Utilizadas em Vias de Baixo Volume de Tráfego. In: XXI ANPET, Rio de Janeiro, RJ.

Asphalt Pavement Analyzer. Development of a Rapid Test to Determine Moisture Sensitivity of Hot Mix Asphalt Mixtures. Disponível em:

<http://www.kutri.ku.edu/research/project/moisture-sensitivity-of-hot-mix-asphalt-mixture/index.html>. Acesso em 4 de junho de 2014.

ASTM D 4123-82 (1995) Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures. American Society for Testing and Materials.

ASTM D 3497-79 (2003) Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures. American Society for Testing and Materials.

ASTM D 6925 (2009) Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor. American Society for Testing and Materials.

ASTM D 2990 (2009) Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics. American Society for Testing and Materials.

Ayres, M. Jr. (1997) Development of a Rational Probabilistic Approach for Flexible Pavement Analysis. Tese de Doutorado. University of Maryland, College Park.

Babadopulos, L. F. A. L. (2013) Avaliação do Modelo Viscoelástico Linear Aplicado a Misturas Asfálticas Utilizadas em Revestimentos de Pavimentos no Brasil. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE.

Bahia, H. U. e Faheem, A. (2007) Using the Superpave Gyratory Compactor to Estimate Rutting Resistance of Hot - Mix Asphalt. Transportation Research Board. Número E - C124 - Practical Approaches to Hot-Mix Asphalt Design and Production Quality Control Testing.

Bernucci, L. B., Motta, L. M., Ceratti, J. A. P. e Soares, J.B. (2010) Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. 3ª. Edição. Rio de Janeiro, RJ.

Bessa, I.S. (2012) Avaliação do Processamento Digital de Imagens como Ferramenta para Caracterização de Agregados e Misturas Asfálticas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

Booij, H. C. e Thoone, G. P. J. M. (1982) Generalization of Kramers-Kronig Transforms and Some Approximations of Relations between Viscoelastic Quantities. Rheol Acta 21: 15-24.

Brown, S. F. e Bell, P. S. (1977) The Characteristics of Materials for the Design of Flexible Pavement Structures. Proceedings of the Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. London, U. K.

Brown, E. R., Kandhal, P. S. e Zhang, J. (2001) Performance Testing for Hot Mix Asphalt. Alabama: NCAT Report 01-05A, 79p.

Cardoso, S. H. (1987) Procedure for Flexible Airfield Pavement Design Based on Permanent Deformation. Tese de Doutorado. University of Maryland, MD.

Choi, Y. T. (2013) Development of a Mechanistic Prediction Model and Test Protocol for the Permanent Deformation of Asphalt Concrete. Tese de Doutorado. North Carolina State University, NC.

Choi, Y. T., Subramanian V., Guddati, M. N. e Kim Y. R. (2012) Incremental Model for Prediction of Permanent Deformation of Asphalt Concrete in Compression. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n°. 2296, pp. 24-35. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.

Chowdhury, A., Graw, J. C., Button, J. W. e Little, D. N. (2001) Effect of Aggregate Gradation on Permanent Deformation of Superpave HMA. 80th Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.

Christensen, R.M. (1982) Theory of Viscoelasticity. 2^a ed. New York: Academic.

CNT (2013) Relatório Gerencial - Pesquisa CNT de rodovias 2013. Brasília: CNT: SEST: SENAT.

Cooley, L. A. Jr., Kandhal, P.S., Buchanan, M. S., Fee, F. e Epps, A. (2000) Loaded Wheel Testers in to United States: State of the Practice. NCAT Report 00-04 Transportation Research E-Circular n. E-C016.

Coutinho, B. M., Onofre, F. C., Castelo Branco V. T. F., Soares, J. B. e Mateos, A. (2010a) Estudo Sobre Ensaio de Deformação Permanente em Misturas Asfálticas por Métodos Adotados no Brasil e na Espanha. Instituto Brasileiro de Petróleo Gás e Biocombustíveis. Revista Pavimentação, Vol. 1, p. 1-12. Rio de Janeiro, RJ.

Coutinho, R. P., Pamplona, T. F., Castelo Branco, V. T. F., Holanda, A. S. e Soares, J. B. (2010b) Avaliação de Procedimentos para Construção de Curvas Mestras para Materiais Asfálticos. In: 20^o Encontro de Asfalto - Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, RJ.

Dantas, G. H. S. (2013) Estudo do Emprego do Compactador Giratório Superpave na Compactação de um Solo Argiloso. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. USP. São Carlos, SP.

Daniel, J. S. e Kim, Y. R. (2002) Development of a Simplified Fatigue Test and Analysis Procedure Using a Viscoelastic, Continuum Damage Model. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 71, 619-650, Washington, D.C.

Dessouky, S., Masad, E. e Little, D. N. (2006) Mechanistic Modeling of Permanent Deformation in Asphalt Mixes with the Effect of Aggregate Characteristics. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 75, 535-575.

De Beer, M., Fisher, C. e Jooste, F. J. (1997) Determination of Pneumatic Tire Pavement Interface Contact Stresses under Moving Loads and Some Effects on Pavements with Thin Asphalt Surfacing Layers. Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavement, Vol. I, pp. 179-227. Seattle, Washington.

DNER - ME 043 (1995) Mistura Betuminosas a Quente - Ensaio Marshall Departamento Nacional de Estradas e Rodagens - Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DNER-ME 083 (1998) Agregados - Análise Granulométrica. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DNIT 031 (2006) Pavimentos Flexíveis - Concreto asfáltico. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Especificação de Serviço DNIT ES 031/06.

DNIT 129 (2011) Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado por Polímero Elastomérico - Especificação de Material DNIT 129/2011.

Dongre, R., D'angelo, J. e Copeland, A. (2009) Refinement of Flow Number as Determined by the Asphalt Mixture Performance Tester for Use in Routine QC/QA Practice. Transportation Research Board, Washington, D.C.

Ferry, J. D. (1980) Viscoelastic Properties of Polymers. New York: John Wiley & Sons.

Federal Highway Administration (2002) Superpave Binder Specification. FHWA, 115p. Washington, D.C. www.tfhrc.gov/. (Artigo consultado em Janeiro de 2014).

Franco, F. A. C. P. (2000) Um Sistema para Análise Mecânica de Pavimentos Asfálticos. Dissertação de Mestrado. COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.

Franco, F. A. C. P. (2007) Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos - SISPAV. 315p. Tese de Doutorado. COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.

Francken, L. (1977) Pavement Deformation Law of Bituminous Road Mixes in Repeated Load Triaxial Compression. Proceedings of the Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. I, pp. 483-496. The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.

Gibson, N. H., Schwartz, C. W., Schapery, R. A. e Witczak, M.W. (2003) Viscoelastic, Viscoplastic and Damage Modeling of Asphalt Concrete in Unconfined Compression. Journal of Transportation Research Board, n°. 1860, 3-15. National Research Council, Washington, D.C.

Gibson, N. H. (2006) A Viscoelastoplastic Continuum Damage Model for the Compressive Behavior of Asphalt Concrete. Tese de Doutorado. University of Maryland, College Park.

Gibson, N. H. e Schwartz, C.W. (2006) Three-Dimensional Viscoplastic Characterization of Asphalt Concrete Utilizing Perzyna and HiSS Methodologies Proceedings of the 10th International Conference on Asphalt Pavement, Vol. I, pp. 205-214. Quebec City, Canada.

Gibson, N. H., Kutay, M. E., Keramat, D. e Youtcheff, J. (2009) Multiaxial Strain Response of Asphalt Concrete Measured During Flow Number Simple Performance Test. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 78, pp. 25-66.

Gokhale, S., Choubane, B., Byron, T. e Tia, M. (2006) Rut Initiation Mechanisms in Asphalt Mixtures as Generated Under Accelerated Pavement Testing. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n°. 1940, pp. 136-145. Transportation Research Board, Washington, D.C.

Gomes, I. F. (2006) Implementação de Métodos Explícitos de Integração com Controle de Erro para Modelos Elastoplásticos e Visco-Elastoplásticos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE.

Harman, T., Bukowski, J. R. Moutier, F., Huber, G. e McGennis, R. (2002) History and Future Challenges of Gyratory Compaction - 1939 to 2001. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n°1789. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.

Harvey, J. T. e Popescu L. (2000) Rutting of Caltrans Asphalt Concrete and Asphalt Rubber Hot Mix under Different Wheels, Tires and Temperatures - Accelerated Pavement 217 Testing Evaluation. Pavement Research Center, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, CA.

Hill, J. F. (1973) The Creep of Asphalt Mixes. Journal of Institute of Petroleum. Vol. 59, n°. 570, p. 247-62. London.

Kaloush, K. (2001) Simple Performance Test for Permanent Deformation of Asphalt Mixtures. Tese de Doutorado. Arizona State University, AZ.

Kandhal, P. S. e L. A. Cooley, Jr. (2003) Accelerated Laboratory Rutting Tests: Evaluation of the Asphalt Pavement Analyzer. NCHRP Report 508. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.

Khedr, S. A. (1986) Deformation Mechanism in Asphaltic Concrete. Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 112, n°. 1, pp. 29-45.

Knappet, J. A. e Craig R. F. (2012) Craig's Soil Mechanics, 8th Edition. London: Taylor and Francis.

Lacroix, A. T. (2013) Performance Prediction of the NCAT Test Track Pavements Using Mechanistic Models. Tese de Doutorado. North Carolina State University, NC.

Leahy, R. B. (1989) Permanent deformation characteristics of asphalt concrete. Tese de Doutorado. University of Maryland, MD.

Leahy, R. B. e McGennis, R. B. (1999) Asphalt Mixes: Materials, Design and Characterization. Asphalt Paving Technology, v.68A, Illinois.

Lee, S. (2007) Investigation of the Effects of Lime on the Performance of HMA Using Advanced Testing and Modeling Techniques. Tese de Doutorado. North Carolina State University, NC.

Lekarp, F., Isacson, U. e Dawson, A. (2000b) State of the art. II: Permanent Strain Response of Unbound Aggregates. *Journal of Transportation Engineering ASCE*, Vol. 126 (1), pp. 76-83.

Levenberg, E. (2009) Viscoplastic Response and Modeling of Asphalt-Aggregate Mixes. *Materials and Structures*, Vol. 42, 1139-1151.

Little, D. N., Button, J. W. e Youssef, H. (1993) Development of Criteria to Evaluate Uniaxial Creep Data and Asphalt Concrete Permanent Deformation Potential. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n°1417, p49-57. Transportation Research Board, Washington, D.C.

Localização da pedreira MFT Itaitinga/CE. Disponível em:

<https://www.google.com.br/maps/dir/Fortaleza+-+Cear%C3%A1/Itaitinga+-+CE/@-3.8530966,-38.6612136,11z/data=!3m1!4b1!4m12!4m11!1m3!2m2!1d-38.5266704!2d-3.7318616!1m5!1m1!1s0x7b8a9d2f86bafdb:0x4d31932c8e268df1!2m2!1d-38.5301073!2d-3.9661491!3e0>. Acesso em 5 de agosto de 2014.

Mahmoud, A. F. F. e Bahia, H. (2004) Using the Gyrotory Compactor to Measure Mechanical Stability of Asphalt Mixtures, Wisconsin Highway Research Program. Projeto Número 0092-01-02.

Manual de Pavimentação (2006) DNIT. 274 pp. (Pub., IPR.719). 3ª ed. Rio de Janeiro, RJ.

Maugin, G. (1992) *The Thermomechanics of Plasticity and Fracture*. Cambridge Texts in Applied Mathematics. Cambridge University Press.

Medina, J.; Motta, L.M.G. (2005) *Mecânica dos Pavimentos*. 2ª edição. 574 p. Editora UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.

MEPDG (2004) ARA, Inc., ERES Consultant Division. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Final Report NCHRP Project 1-37A, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C. www.trb.org/mepdg/guide.htm.

Merighi, J. V. e Fortes, R. M. (2003) O Ensaio de Creep Estático - Uma Ferramenta Para Avaliação do Desempenho de Misturas Asfálticas Quanto à Deformação Permanente. 12ª Reunião de Pavimentação Urbana. Aracaju, SE.

Mitsoulis, E. (2007) Flows of Viscoplastic Materials: Models and Computations. *Rheology Reviews*, 135 - 178.

Monismith, C. L., Ogawa, N. e Freeme, C.R. (1975) Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils Due to Repeated Loading, 54th Annual Meeting of TRB, Washington, D.C.

Monismith, C. L., Hicks, R. G., Finn, F. N., Souza, J., Harvey, J., Weissman, S., Deacon J., Coplantz, J. e Paulsen, G. (1994) Permanent Deformation Response of Asphalt Aggregate Mixes. SHRP-A-415, Strategic Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.

Moura, E. (2010) Estudo de Deformação Permanente em Trilha de Roda de Misturas Asfálticas em Pista e em Laboratório. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 299p. São Paulo, SP.

Nascimento, L. A. H., Chacur, M. e Leite, L. F. M. (2008) Uso do Compactador Giratório na Previsão do Desempenho de Misturas Asfálticas. 19º Encontro de Asfalto - IBP, Rio de Janeiro, RJ.

Nascimento, L. A. H. (2008) Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente. Dissertação de Mestrado. COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.

NCHRP - National Cooperative Highway Research Program (2004) Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Final Report NCHRP 1-37 A. Champaign, Illinois.

Nunes, F. R. G. (2006) Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Confeccionadas com Agregados Sintéticos de Argila Calcinada Quanto a Deformação Permanente. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

Onofre, F. C. (2012) Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Produzidas com Ligantes Asfálticos Modificados por Ácido Polifosfórico e Polímeros. Dissertação de Mestrado. PETRAN. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

Perzyna, P. (1963) The Constitutive Equations for Rate Sensitive Materials, Q. Appl. Math., Vol. 20, pp. 321-322.

Perzyna, P. (1966) Fundamental Problems in Viscoplasticity, Adv, Appl. Mech., Academic Press, New York, Vol. 9, pp. 243 - 377.

Petrobras/Cenpes (2014) Análise das Curvas de Simulação no Programa LVECD para as Regiões Sul e Sudeste. Rio de Janeiro, RJ.

Pinto, S. (1991) Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos. Tese de Doutorado. COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.

Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y. e Kennedy, T. W. (1996) Hot Mix Asphalt Materials, Mixture, Design and Construction. 2ª ed. Lanham, Maryland, Napa Education Foundation.

Santos, J. D. G. (1998) Contribuição ao Estudo dos Solos Lateríticos Granulares como Camada de Pavimento. Tese de Doutorado. COPPE. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação, Rio de Janeiro, RJ.

Santos, D. D. (2010) Modelagem Mecânica e Investigação Numérica de Escoamento de Fluidos SMD Empregando um Método Multi-Campo de Garlekin Mínimos-Quadrado. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.

- Schapery, R. A. (1999) Nonlinear Viscoelastic and Viscoplastic Constitutive Equations with Growing Damage. *International Journal of Fracture*, Vol. 97, 33-66.
- Simo, J. C. e Hughes, T.J.R. (1998) *Computacional Inelasticity. Interdisciplinary Applied Mathematics: Mechanics and Materials*. XIV, 392 p.
- Soares, J. B., Moreno, A. M. e Motta, L. M. G. (2009) Aspectos Gerais de Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos de Vários Países e a Relação com um Novo Método Brasileiro. *Revista Pavimentação, ABPV, Ano IV*. Rio de Janeiro, RJ.
- Souza, F. V. e Soares, J. B. (2002) Previsão do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a partir dos Resultados do Ensaio de *Creep* Estático. XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET. Natal, RN.
- Souza, P. C., Vasconcelos, K. L. e Soares, J. B. (2009) Abordagem Mecânica em Projetos de Superestruturas de Estradas de Rodagem. IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço. Associação Brasileira de Pavimentação, Fortaleza, CE.
- Stuart, K.D. e Youtcheff, J.S. (2001) Understanding the Performance of Modified Asphalt Binders in Mixtures: Evaluation of Moisture Sensitivity. Report No. FHWA-RD-02-029. Federal Highway Administration. Washington, D.C.
- Subramanian, V. A. (2011) Viscoplastic Model with Rate-Dependent Hardening for Asphalt Concrete in Compression. Tese de Doutorado. North Carolina State University, NC.
- Subramanian, V. A., Guddati, M. N. e Kim, Y. R. (2013) A Viscoplastic Model for Rate-Dependent Hardening for Asphalt Concrete in Compression. *Mechanics of Materials*, Vol. 59, 142-159.
- Svenson, M. (1980) Ensaio Triaxiais Dinâmicos em Solos Argilosos. Dissertação de Mestrado. COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação, Rio de Janeiro, RJ.
- Tashman, L. (2003) Microstructure viscoplastic continuum model for permanent deformation in asphalt pavements. Tese de Doutorado. Texas A&M University, College Station, TX.
- Tseng, K. H. e Lytton, R. L. (1989) Prediction of Permanent Deformation in Flexible Pavement Materials in Implication of Aggregate in Design, Construction and Performance of Flexible Pavements, STP 106, H. G. Schreuders e C. R. Marek, eds., Philadelphia: ASTM, pp. 154-172.
- Uzan, J. (1996) Asphalt Concrete Characterization for Pavement Performance Prediction. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 65, 573-607.
- Wilshire, R. e Evans, R. (1994) Acquisition and Analysis of Creep Data. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 29, n°. 3. Oxford, U. K.
- Whiteoak, D. (1990) *Shell Bitumen Handbook*. Shell Bitumen UK, London.

Witczak, M. W., Kaloush, K., Pellinen, T., El-Basyouny, M. e Von Quintus, H. (2002) Simple performance test for superpave mix design. NCHRP Report 465. National Research Council, Transportation Research Board. Washington, D.C.

Yoder, E. J. e Witczak, M. W. (1975) Principles of Pavement Design. 2nd Edition (Hardcover).

Yun, T. (2008) Development of a Viscoplastic Constitutive Model Using a Rate-Dependent Yield Criterion for HMA in Compression. Tese de Doutorado. North Carolina State University, NC.

Apêndice A - Procedimento de configuração da UTM - 25 - Ensaios confinados

1. Realizar, utilizando o CGS, a compactação de CP's buscando atingir as dimensões de 150mm de altura (h) e 100mm de diâmetro (D). O Volume de vazios (Vv) do CP deverá ser de $5,5\% \pm 0,5$ independente do Vv para o qual a mistura foi projetada. Ou seja, ainda que se trate de uma mistura cujo projeto exija $Vv = 4\%$, o CP para o ensaio será moldado com $Vv = 5,5\%$;
2. Ligar a UTM - 25 no modo de ensaio de deformação permanente, verificando a posição correta dos LVDT's (*Linear Variable Differential Transformer*) em seus respectivos terminais para este ensaio e alterando-os, caso seja necessário (Figura A.1). Exemplo: o LVDT 99554 deve ficar no terminal A2D;

Figura A.1 - Ajuste dos LVDT's para os ensaios confinados na UTM - 25.

System Set Up											
Communication Allocation Calibration CDAS Loading control											
Function	Input	Gain	Input Description	File Name	Transducer Description	Date	Units	Span	Offset	Curve	
Control-1	A1A	x1	Actuator Lvdvt	A712-01.cal	UTM-25 Actuator LVDT S/N: A...	27/07/07	mm	50	0	No	
Control-1	A1B	x1	Axial force	AA3911.cal	UTM-25 Loadcell S/N: AA3911 ...	29/07/07	kN	50	0	No	
Acq'n	A2C	x1	Vertical Lvdvt #1	99552.cal	D6-0500A S/N: 99552 +/-2.5mm	21/08/07	mm	5	0	Yes	
Acq'n	A2D	x1	Vertical Lvdvt #2	99554.cal	D6-0500A S/N: 99554 +/-2.5...	21/08/07	mm	5	0	Yes	
Acq'n	A1C	x1	Core Temperature	527.cal	PT100 S/N: 527 -15 to +85 0 d...	29/08/07	°C	100	29.426	Yes	
Acq'n	A1D	x1	Skin Temperature	528.cal	PT100 S/N: 528 -15 to +85 0 d...	29/08/07	°C	100	29.426	Yes	
Control-2	A2A	x1	Confine stress	novo W104211.cal	Pressure Tx S/N: W104211 +/-...	02/05/07	kPa	1200	0	No	
Gain	Auto	x1	x4	x16							
Axis 1	A1A	A1B	A1C	A1D							
Axis 2	A2A	A2B	A2C	A2D							
Virtual 1	V1A										
Virtual 2	V2A										

Fonte: Autor deste trabalho.

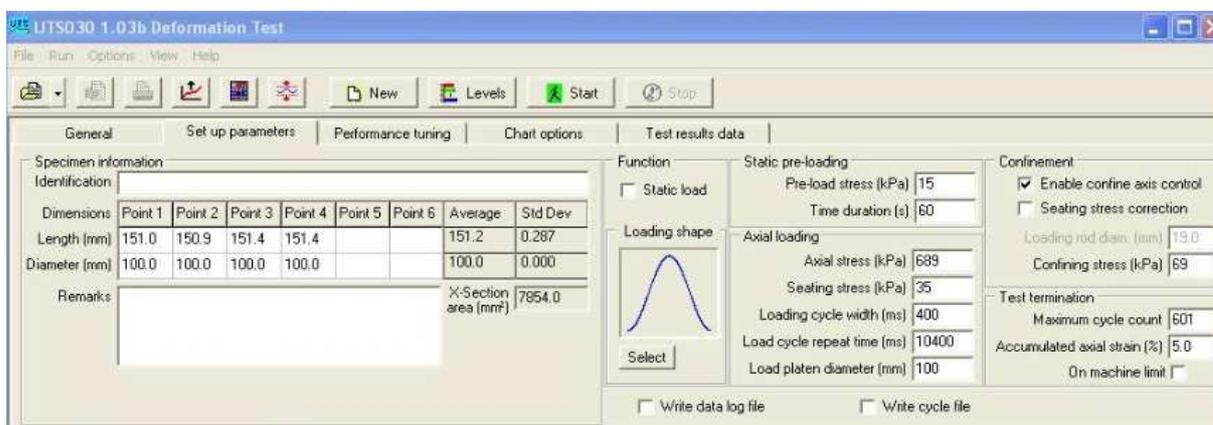
3. Inserir no *software (template* equivalente ao ensaio TRLPD) do ensaio os dados de dimensões do CP (quatro valores de diâmetros e quatro valores de alturas, obtidos em posições diferentes);
4. A partir de agora toma-se como exemplo o ensaio de Referência, uma vez que os ensaios confinados são realizados em diferentes condições de tensão desvio, tempo de carregamento, período de repouso e temperatura. A única

condição que se mantém inalterada nos ensaios confinados é a pressão de confinamento (69kPa ou 10psi). Ajustar os parâmetros do ensaio de Referência:

- a) Tensão = 690kPa (100psi);
- b) Tensão de repouso = 35kPa (5psi);
- c) Tensão de pré-carregamento = 15kPa (2,2psi);
- d) Duração do pré-carregamento = 60s;
- e) Tempo de carregamento = 10s;
- f) Período de repouso = 0,4s
- g) Temperatura de ensaio = T_H ; e
- h) Pressão de confinamento = 69kPa (10psi).

A Figura A.2 exemplifica a configuração do *software* para a execução do ensaio de Referência.

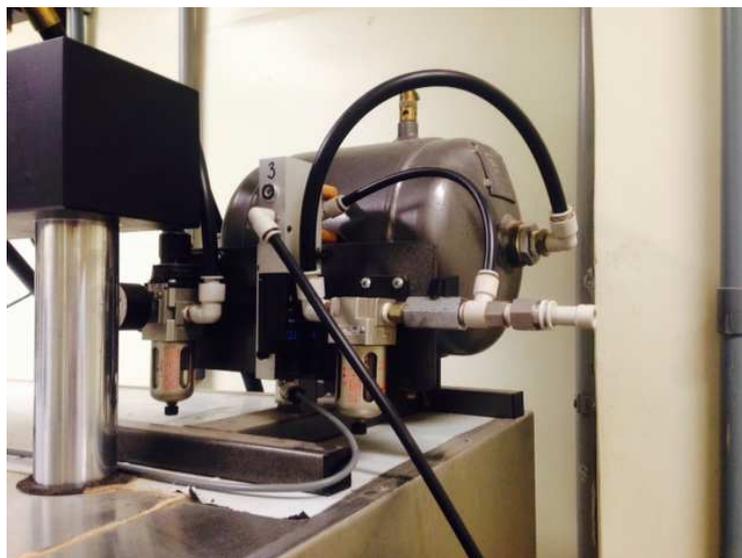
Figura A.2 - Captura de tela do *software* para a execução do ensaio de Referência (TRLPD) na UTM - 25.



Fonte: Autor deste trabalho.

A Figura A.3 mostra o dispositivo de pressurização acoplado à UTM - 25 para a geração da tensão confinante nos ensaios de Referência e MSS.

Figura A.3 - Dispositivo para pressurização na UTM - 25.

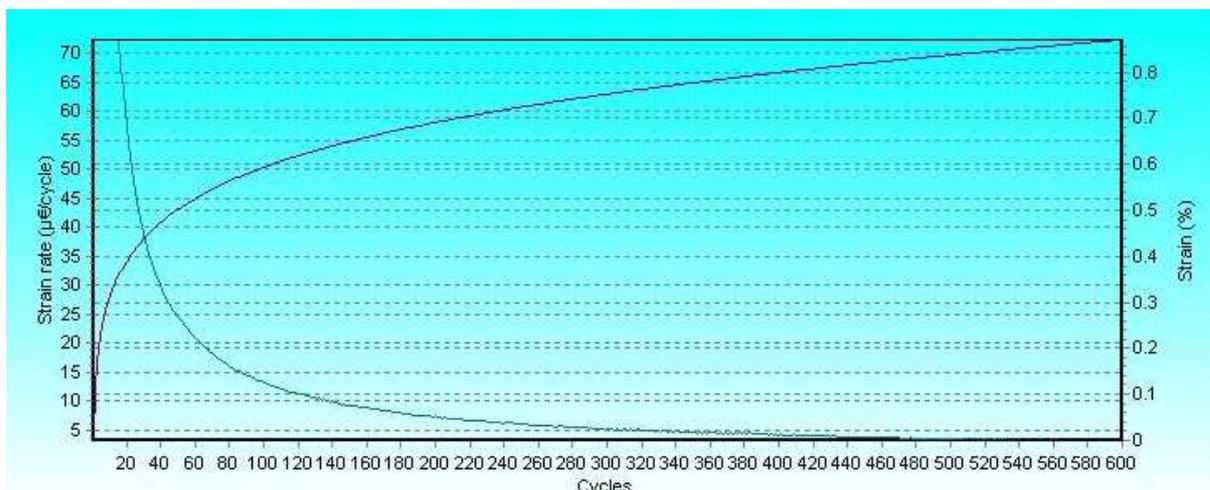


Fonte: Autor deste trabalho.

5. Inserir o CP na UTM - 25 e selecionar a temperatura de ensaio (T_H). Quando o *software* do ensaio indicar que a temperatura do CP atingiu o valor da temperatura T_H , deve-se colocar o CP na câmara de confinamento (Figura 3.11);

6. Inicia-se o processo de confinamento, que dura por volta de 1,5h. Decorrido o tempo de confinamento verificar se o *software* está de acordo com o item 4 acima e adotar como critério de parada os 600 ciclos (condição do ensaio de Referência) de carregamento ou até o CP atingir o FN. As demais condições de cada ensaio confinado estão apresentadas na Tabela 3.16. A Figura A.4 representa o gráfico do ensaio de Referência gerado pelo *software* no decorrer do ensaio. Observa-se que não há ruptura, ou seja, a taxa de deformação não sofreu inflexão, FN;

Figura A.4 - Captura de tela do ensaio de Referência na UTM - 25.



Fonte: Autor deste trabalho.

7. Deve-se realizar este procedimento para pelo menos três CP's, como medida de confiabilidade dos resultados;
8. Exportar os dados do ensaio como: taxa de deformação a cada ciclo de carregamento, deformação permanente a cada ciclo de carregamento, número de ciclos de carregamento e temperatura de ensaio instantânea medida a cada ciclo de carregamento;
9. Plotar o gráfico deformação permanente *versus* número de ciclos para cada ensaio confinado, a partir da média dos valores de 3 CP's; e
10. Aplicar o *Shift Model* conforme descrito no Capítulo 3 desta dissertação.

Apêndice B - Código em MATLAB para a obtenção dos parâmetros do *Shift Model*

O código escrito em MATLAB foi desenvolvido para a obtenção dos parâmetros do *Shift Model*, a partir dos dados dos ensaios TSS (Referência e MSS). Portanto, seguem algumas instruções:

1. Salvar os dados dos ensaios TSS (Referência e MSS) em um arquivo .txt colocando da esquerda para a direita o número de ciclos (1 a 600) e os valores de deformação obtidos das curvas TSS na seguinte ordem: curva de referência, curva MSS - 17°C, curva MSS - 37°C e curva MSS - 47°C. A Figura B.1 exemplifica o formato do arquivo .txt;

Figura B.1 - Valores de deformação permanente e número de ciclos nos ensaios TSS.

Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda
1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.001600	0.000146	0.000242	0.000515
3	0.002180	0.000175	0.000324	0.000710
4	0.002545	0.000194	0.000382	0.000834
5	0.002820	0.000208	0.000424	0.000923
6	0.003045	0.000222	0.000462	0.000996
7	0.003220	0.000232	0.000492	0.001058
8	0.003385	0.000243	0.000521	0.001110
9	0.003530	0.000251	0.000544	0.001155
10	0.003655	0.000260	0.000568	0.001199
11	0.003765	0.000268	0.000587	0.001236
12	0.003875	0.000277	0.000607	0.001269
13	0.003970	0.000282	0.000623	0.001300
14	0.004060	0.000289	0.000640	0.001329
15	0.004145	0.000298	0.000656	0.001358

Labels below the table:

- Ciclo (N)
- Curva de referência - 47°C
- Curva MSS - 17°C
- Curva MSS - 37°C
- Curva MSS - 47°C

Fonte: Autor deste trabalho.

2. No comando “`fid = fopen ()`”, inserir entre nos parênteses o mesmo nome do arquivo .txt com as curvas dos ensaios TSS. Observa-se que o nome do arquivo da Figura B.1 corresponde ao do código em MATLAB desenvolvido neste trabalho; e

3. Executar o comando “Run” para a obtenção automática das curvas tanto dos ensaios TSS quanto a curva do modelo, a partir dos dados dos ensaios TSS, assim como os demais parâmetros do *Shift Model*. Abaixo segue o código:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Clear Data and Figures
clc;
clear;
clf;

% Open and Read from .txt
% It has five columns.
% 1st column is number o cycles
% 2nd column is permanent strain of reference curve
% 3rd column is permanent strain in 17Â°C
% 4th column is permanent strain in 37Â°C
% 5th column is permanent strain in 47Â°C
fid = fopen('ensaio_referencia_tss_teste_mistura_lmp.txt');
a = fscanf(fid, '%g %g %g %g %g', [5 inf]);
a = a';
fclose(fid);

global N;
global epsilonVP;
global epsilonVP17;
global epsilonVP37;
global epsilonVP47;

N = a(:,1);
epsilonVP = a(:,2);
epsilonVP17 = a(:,3);
epsilonVP37 = a(:,4);
epsilonVP47 = a(:,5);
d = length( epsilonVP );

% Conversion from epsilon in percentual to absolute value
(dimensionless)
%{
for i = 1:d
    epsilonVP(i) = epsilonVP(i) / 100.0;
    epsilonVP17(i) = epsilonVP17(i) / 100.0;
    epsilonVP37(i) = epsilonVP37(i) / 100.0;
    epsilonVP47(i) = epsilonVP47(i) / 100.0;
end
%}

```

```

x0 = [ 0.80, 0.0004, 8.00 ];
% x0(1) -> alpha
% x0(2) -> B
% x0(3) -> C

%% Populate epsilonP0
for i = 1:d
    epsilonP0(i) = x0(2) * N(i) / power( (x0(3) + N(i)),
x0(1));
end

%{epsilonP0'

%% plot experimental data
plot( N, epsilonVP .* 100.0, 'black*', 'MarkerSize', 15,
'LineStyle', '-');
hold on;

%% plot initial guess
plot( N, epsilonP0 .* 100.0, 'blueo' );

%% Define upper and lower limits
% x0(1) -> alpha
% x0(2) -> B
% x0(3) -> C
lb = [ 0.50; 0.001; 0.00 ];
ub = [ 0.90; 0.01; 10.00 ];

%% Define optimization options
options = optimoptions(@fmincon, 'Display', 'iter', 'TolFun',
1e-10, 'TolX', 1e-10, 'TolCon', 1e-10, 'MaxFunEvals', 10000,
'MaxIter', 1000);

%% Find optimum x and minimum fval - from SSE arithm
[x, fval] = fmincon(@rmsearithm, x0, [], [], [], [], lb, ub,
[], options);

%{x'

%% Populate epsilonP - from SSE arithm
for i = 1:d
    epsilonP(i) = ( x(2) * N(i) / power( (x(3) + N(i) ), x(1)
) );
end

%% Plot epsilonP - from SSE arithm
plot( N, epsilonP .* 100.0, '--go', 'LineWidth', 4 ); % green
curve

```

```

%% Find optimum x and minimum fval - from SSE log
[x1, fval] = fmincon(@rmselog, x0, [], [], [], [], lb, ub, [],
options);

%{x1'

%% Populate epsilonP - from SSE log
for i = 1:d
    epsilonP1(i) = ( x1(2) * N(i) / power( (x1(3) + N(i) ),
x1(1) ) );
end

%% Plot epsilonP - from SSE log
plot( N, epsilonP1 .* 100.0 , '--ro', 'LineWidth', 4 ); % red
curve

%% Add axis labels
title('Graph of EpsilonVp versus N');
xlabel('N'); % x-axis label
ylabel('Permanent Strain (%)'); % y-axis label
legend('experimental data','initial guess', 'curve fit from
SSE arithm', 'curve fit from SSE log',
'Location','northwest');

h2 = figure;
plot( N, epsilonVP .* 100.0, 'blacko', 'MarkerSize', 6,
'LineStyle', '-', 'LineWidth', 4 );
hold on;
plot( N, epsilonVP17 .* 100.0, 'greeno', 'MarkerSize', 6,
'LineStyle', '-', 'LineWidth', 4 );
plot( N, epsilonVP37 .* 100.0, 'blueo', 'MarkerSize', 6,
'LineStyle', '-', 'LineWidth', 4 );
plot( N, epsilonVP47 .* 100.0, 'redo', 'MarkerSize', 6,
'LineStyle', '-', 'LineWidth', 4 );
title('TSS curves');
xlabel('N'); % x-axis label
ylabel('Permanent Strain (%)'); % y-axis label
legend('Reference', '17Â°C', '37Â°C', '47Â°C', 'Location',
'northwest');

%% Choose alpha, B and C from SSE log optimization
global alpha;
global B;
global C;

alpha = x1(1)
B = x1(2)
C = x1(3)

%% EpsilonVPB and EpsilonVPE dimensionless

```

```

%% it gets from positions 200, 400 and 600
%% when dealing with real data, the protocol test get from
positions 200, 400 and 600
global EpsilonVPB;
EpsilonVPB = [epsilonVP17(1), epsilonVP17(201),
epsilonVP17(401), epsilonVP37(1), epsilonVP37(201),
epsilonVP37(401), epsilonVP47(1), epsilonVP47(201),
epsilonVP47(401) ];
global EpsilonVPE;
EpsilonVPE = [epsilonVP17(200), epsilonVP17(400),
epsilonVP17(600), epsilonVP37(200), epsilonVP37(400),
epsilonVP37(600), epsilonVP47(200), epsilonVP47(400),
epsilonVP47(600) ];

%% Calculate NguessB (N guess Begin)
for i = 1:9
    if( i == 1 || i == 4 || i == 7)
        NguessB(i) = 0.0;
    else
        NguessB(i) = power( B / EpsilonVPB(i), (1 / ( 1 -
alpha ) ) );
    end
end

%% Calculate NguessE (N guess End)
for i = 1:9
    NguessE(i) = power( B / EpsilonVPE(i), (1 / ( 1 -
alpha ) ) );
end

%% Print NguessB and NguessE
fprintf('Calculus of NguessB and NguessE\n\n');
fprintf('i\tNguessB(i)\tNguessE(i)\n');
for i = 1:9
    fprintf('%d\t%d\t\t%d\n', i, NguessB(i), NguessE(i));
end

%% Begin
for i = 1:9
    temp = 1000; % big value
    NRedBegin(i) = 0.0;
    for j = 1:d
        error = abs( EpsilonVPB(i) - B * j / power(C + j,
alpha) );
        if error < temp;
            temp = error;
            NRedBegin(i) = j;
        end
    end
    if i == 1 || i == 4 || i == 7

```

```

        NRedBegin(i) = 0;
    end
end
NRedBegin

%% End
for i = 1:9
    temp = 1000; % big value
    NRedEnd(i) = 0.0;
    for j = 1:d
        error = abs( EpsilonVPE(i) - B * j / power(C + j,
alpha) );
        if error < temp;
            temp = error;
            NRedEnd(i) = j;
        end
    end
end
NRedEnd

%% a total
for i = 1:9
    if( NRedEnd(i) - NRedBegin(i) < 1 )
        atotal(i) = log10( 0.50 / 200 );
    else
        atotal(i) = log10( (NRedEnd(i) - NRedBegin(i)) / 200
);
    end
end
atotal

%% Shift factor of temperature from Arrenius equation
aT = [3.936, 1.222, 0.0587];

%% ksi p
for i = 1:3
    ksip(i) = 0.4 / aT(i);
end
ksip

%% a ksi p
for i = 1:3
    aksip(i) = atotal(2+(i-1)*3);
end
aksip

%% sigmavPa
pa = 14.696;
sigmavPa = [ (70.0 + 10.0) / pa, ( 100.0 + 10.0) / pa, ( 130.0
+ 10.0) / pa ];

```


Anexo A - Dados de deformação acumulada no LVECD para a Mistura C1.

Tabela A.1 - Dados de deformação acumulada. LVECD - Mistura C1.

Simulação LVECD - período de 10 anos								
Tempo (Mês)	Camada Asfáltica (cm)		Camadas do Pavimento (cm)		Camada Asfáltica (cm)		Camadas do Pavimento (cm)	
	25km/h	80km/h	25km/h	80km/h	25km/h	80km/h	25km/h	80km/h
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,03646	0,03049	0,03944	0,03337	0,04514	0,03821	0,04827	0,04122
2	0,04513	0,03872	0,04812	0,04160	0,05517	0,04747	0,05831	0,05048
3	0,05116	0,04434	0,05415	0,04722	0,06358	0,05498	0,06672	0,05799
4	0,05733	0,04989	0,06032	0,05278	0,07030	0,06088	0,07344	0,06389
5	0,06288	0,05480	0,06587	0,05769	0,07692	0,06659	0,08006	0,06960
6	0,06835	0,05956	0,07133	0,06244	0,08250	0,07139	0,08563	0,07440
7	0,07321	0,06376	0,07620	0,06665	0,08775	0,07586	0,09089	0,07887
8	0,07747	0,06744	0,08046	0,07033	0,09200	0,07949	0,09513	0,08250
9	0,08039	0,07000	0,08338	0,07289	0,09537	0,08240	0,09850	0,08541
10	0,08205	0,07151	0,08504	0,07439	0,09746	0,08425	0,10060	0,08726
11	0,08295	0,07234	0,08594	0,07523	0,09883	0,08548	0,10196	0,08849
12	0,08368	0,07302	0,08666	0,07591	0,09975	0,08633	0,10289	0,08934
13	0,08439	0,07369	0,08737	0,07658	0,10056	0,08707	0,10369	0,09008
14	0,08513	0,07439	0,08812	0,07727	0,10147	0,08791	0,10461	0,09092
15	0,08598	0,07517	0,08897	0,07805	0,10277	0,08906	0,10591	0,09207
16	0,08722	0,07628	0,09021	0,07916	0,10426	0,09037	0,10740	0,09338
17	0,08871	0,07759	0,09170	0,08048	0,10619	0,09203	0,10933	0,09504
18	0,09058	0,07920	0,09356	0,08208	0,10819	0,09375	0,11133	0,09676
19	0,09257	0,08091	0,09556	0,08379	0,11041	0,09562	0,11354	0,09863
20	0,09459	0,08263	0,09757	0,08551	0,11242	0,09734	0,11556	0,10035
21	0,09611	0,08395	0,09909	0,08683	0,11417	0,09883	0,11731	0,10184
22	0,09702	0,08477	0,10001	0,08765	0,11532	0,09984	0,11845	0,10285
23	0,09753	0,08524	0,10051	0,08812	0,11609	0,10053	0,11922	0,10354
24	0,09794	0,08562	0,10093	0,08851	0,11662	0,10102	0,11976	0,10403

25	0,09836	0,08601	0,10135	0,08890	0,11709	0,10145	0,12023	0,10447
26	0,09880	0,08642	0,10179	0,08931	0,11764	0,10195	0,12077	0,10496
27	0,09931	0,08689	0,10230	0,08978	0,11843	0,10265	0,12156	0,10566
28	0,10007	0,08757	0,10306	0,09046	0,11935	0,10346	0,12249	0,10647
29	0,10101	0,08840	0,10400	0,09128	0,12057	0,10451	0,12371	0,10752
30	0,10222	0,08944	0,10521	0,09232	0,12188	0,10563	0,12502	0,10864
31	0,10355	0,09058	0,10654	0,09346	0,12337	0,10689	0,12650	0,10990
32	0,10494	0,09176	0,10793	0,09464	0,12476	0,10807	0,12789	0,11108
33	0,10601	0,09268	0,10900	0,09557	0,12599	0,10912	0,12912	0,11213
34	0,10666	0,09327	0,10965	0,09615	0,12681	0,10984	0,12994	0,11285
35	0,10703	0,09361	0,11002	0,09649	0,12736	0,11034	0,13050	0,11335
36	0,10733	0,09389	0,11032	0,09677	0,12775	0,11069	0,13089	0,11371
37	0,10764	0,09417	0,11062	0,09706	0,12810	0,11101	0,13123	0,11402
38	0,10796	0,09447	0,11095	0,09736	0,12850	0,11137	0,13163	0,11439
39	0,10834	0,09482	0,11133	0,09770	0,12908	0,11189	0,13222	0,11490
40	0,10890	0,09532	0,11189	0,09821	0,12977	0,11250	0,13290	0,11551
41	0,10961	0,09594	0,11260	0,09883	0,13069	0,11329	0,13383	0,11630
42	0,11052	0,09673	0,11351	0,09961	0,13168	0,11414	0,13482	0,11715
43	0,11155	0,09760	0,11454	0,10049	0,13283	0,11511	0,13596	0,11812
44	0,11263	0,09852	0,11561	0,10141	0,13391	0,11602	0,13705	0,11904
45	0,11347	0,09925	0,11646	0,10213	0,13488	0,11685	0,13801	0,11986
46	0,11399	0,09971	0,11697	0,10260	0,13553	0,11742	0,13866	0,12043
47	0,11428	0,09998	0,11727	0,10286	0,13597	0,11782	0,13911	0,12083
48	0,11452	0,10020	0,11751	0,10309	0,13628	0,11810	0,13941	0,12111
49	0,11476	0,10043	0,11775	0,10331	0,13655	0,11835	0,13969	0,12137
50	0,11502	0,10067	0,11801	0,10356	0,13687	0,11864	0,14001	0,12166
51	0,11532	0,10095	0,11831	0,10383	0,13734	0,11906	0,14048	0,12207
52	0,11578	0,10136	0,11877	0,10424	0,13790	0,11955	0,14104	0,12256
53	0,11635	0,10186	0,11934	0,10474	0,13865	0,12019	0,14179	0,12320
54	0,11710	0,10250	0,12009	0,10538	0,13946	0,12089	0,14260	0,12390
55	0,11794	0,10322	0,12093	0,10610	0,14040	0,12168	0,14354	0,12470
56	0,11883	0,10398	0,12182	0,10686	0,14130	0,12244	0,14443	0,12546

57	0,11954	0,10458	0,12252	0,10747	0,14210	0,12313	0,14524	0,12614
58	0,11997	0,10497	0,12296	0,10785	0,14265	0,12361	0,14578	0,12662
59	0,12021	0,10519	0,12320	0,10808	0,14302	0,12394	0,14615	0,12695
60	0,12042	0,10538	0,12340	0,10827	0,14328	0,12418	0,14641	0,12719
61	0,12062	0,10557	0,12361	0,10846	0,14351	0,12439	0,14665	0,12740
62	0,12084	0,10577	0,12383	0,10866	0,14378	0,12464	0,14692	0,12765
63	0,12109	0,10601	0,12408	0,10889	0,14418	0,12499	0,14731	0,12800
64	0,12148	0,10635	0,12447	0,10924	0,14465	0,12540	0,14778	0,12841
65	0,12197	0,10678	0,12495	0,10966	0,14528	0,12595	0,14842	0,12896
66	0,12260	0,10732	0,12559	0,11021	0,14597	0,12654	0,14911	0,12955
67	0,12332	0,10794	0,12631	0,11082	0,14678	0,12722	0,14992	0,13023
68	0,12409	0,10859	0,12707	0,11147	0,14755	0,12787	0,15069	0,13088
69	0,12469	0,10911	0,12768	0,11200	0,14824	0,12846	0,15138	0,13147
70	0,12507	0,10944	0,12805	0,11233	0,14871	0,12887	0,15185	0,13189
71	0,12528	0,10964	0,12827	0,11252	0,14903	0,12916	0,15217	0,13217
72	0,12545	0,10980	0,12844	0,11269	0,14926	0,12937	0,15240	0,13238
73	0,12563	0,10997	0,12862	0,11285	0,14946	0,12955	0,15260	0,13257
74	0,12582	0,11014	0,12881	0,11303	0,14970	0,12977	0,15283	0,13278
75	0,12604	0,11035	0,12903	0,11323	0,15004	0,13007	0,15318	0,13309
76	0,12638	0,11065	0,12937	0,11353	0,15045	0,13043	0,15359	0,13345
77	0,12680	0,11102	0,12979	0,11390	0,15101	0,13091	0,15414	0,13392
78	0,12736	0,11150	0,13035	0,11438	0,15161	0,13143	0,15475	0,13444
79	0,12799	0,11204	0,13098	0,11492	0,15232	0,13203	0,15546	0,13504
80	0,12867	0,11261	0,13165	0,11549	0,15300	0,13260	0,15613	0,13561
81	0,12920	0,11307	0,13219	0,11595	0,15361	0,13312	0,15675	0,13614
82	0,12953	0,11336	0,13252	0,11625	0,15403	0,13349	0,15716	0,13650
83	0,12972	0,11354	0,13271	0,11642	0,15431	0,13374	0,15745	0,13675
84	0,12987	0,11368	0,13286	0,11657	0,15451	0,13393	0,15765	0,13694
85	0,13003	0,11383	0,13302	0,11671	0,15469	0,13409	0,15783	0,13710
86	0,13020	0,11398	0,13319	0,11687	0,15490	0,13428	0,15804	0,13729
87	0,13040	0,11417	0,13339	0,11705	0,15520	0,13455	0,15834	0,13756
88	0,13070	0,11443	0,13369	0,11732	0,15557	0,13487	0,15871	0,13788

89	0,13107	0,11476	0,13406	0,11765	0,15607	0,13530	0,15920	0,13831
90	0,13157	0,11519	0,13456	0,11808	0,15661	0,13576	0,15974	0,13877
91	0,13214	0,11567	0,13512	0,11856	0,15724	0,13630	0,16038	0,13931
92	0,13274	0,11619	0,13573	0,11907	0,15785	0,13681	0,16098	0,13982
93	0,13322	0,11660	0,13621	0,11948	0,15840	0,13728	0,16153	0,14029
94	0,13352	0,11686	0,13651	0,11975	0,15877	0,13761	0,16191	0,14062
95	0,13369	0,11702	0,13668	0,11991	0,15903	0,13784	0,16216	0,14085
96	0,13383	0,11715	0,13682	0,12004	0,15921	0,13800	0,16234	0,14101
97	0,13397	0,11728	0,13696	0,12017	0,15937	0,13815	0,16251	0,14116
98	0,13412	0,11742	0,13711	0,12031	0,15956	0,13832	0,16269	0,14133
99	0,13430	0,11759	0,13729	0,12047	0,15983	0,13857	0,16297	0,14158
100	0,13457	0,11783	0,13756	0,12071	0,16016	0,13886	0,16330	0,14187
101	0,13491	0,11813	0,13790	0,12101	0,16061	0,13924	0,16375	0,14225
102	0,13536	0,11851	0,13835	0,12140	0,16110	0,13966	0,16424	0,14267
103	0,13587	0,11895	0,13886	0,12184	0,16168	0,14015	0,16481	0,14316
104	0,13642	0,11942	0,13941	0,12230	0,16223	0,14061	0,16537	0,14363
105	0,13686	0,11979	0,13985	0,12268	0,16273	0,14104	0,16587	0,14405
106	0,13713	0,12004	0,14012	0,12292	0,16307	0,14134	0,16621	0,14435
107	0,13729	0,12018	0,14027	0,12306	0,16330	0,14155	0,16644	0,14456
108	0,13741	0,12030	0,14040	0,12318	0,16347	0,14170	0,16661	0,14471
109	0,13754	0,12042	0,14053	0,12330	0,16362	0,14183	0,16675	0,14485
110	0,13768	0,12054	0,14067	0,12343	0,16379	0,14199	0,16693	0,14500
111	0,13785	0,12069	0,14083	0,12358	0,16404	0,14221	0,16718	0,14523
112	0,13809	0,12091	0,14108	0,12380	0,16434	0,14248	0,16748	0,14549
113	0,13841	0,12119	0,14139	0,12407	0,16475	0,14283	0,16789	0,14584
114	0,13882	0,12154	0,14181	0,12443	0,16520	0,14322	0,16834	0,14623
115	0,13929	0,12194	0,14228	0,12483	0,16573	0,14366	0,16887	0,14667
116	0,13979	0,12237	0,14278	0,12526	0,16623	0,14409	0,16937	0,14710
117	0,14019	0,12272	0,14318	0,12560	0,16670	0,14448	0,16983	0,14749
118	0,14044	0,12294	0,14343	0,12582	0,16701	0,14476	0,17015	0,14777
119	0,14059	0,12307	0,14357	0,12595	0,16722	0,14495	0,17036	0,14796
120	0,14070	0,12318	0,14369	0,12606	0,16738	0,14509	0,17051	0,14810

Fonte: Petrobras/Cenpes (2014).