

FELIPE DO CANTO PIVETTA

**ANÁLISE DE REGENERAÇÃO EM MISTURAS ASFÁLTICAS
ATRAVÉS DA MECÂNICA DO DANO CONTÍNUO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Lélío Antônio Teixeira Brito
Coorientador: Luis Alberto Herrmann do Nascimento

Porto Alegre
Dezembro 2018

FELIPE DO CANTO PIVETTA

**ANÁLISE DE REGENERAÇÃO EM MISTURAS ASFÁLTICAS
ATRAVÉS DA MECÂNICA DO DANO CONTÍNUO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, Dezembro de 2018

Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito
Ph.D. pela University of Nottingham
Orientador

Eng. Luis Alberto Herrmann do Nascimento
Ph.D. pela North Carolina State University
Coorientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Washington Peres Núñez
(UFRGS)
Ph.D. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Eng. Douglas Martins Mocelin
(UFRGS)
Msc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Por toda dedicação, investimento, confiança e amizade,
dedico este trabalho ao meu tutor,
Lélio Antônio Teixeira Brito.

AGRADECIMENTOS

A trajetória que termina com o TCC envolve inúmeras pessoas, muitos aprendizados e incontáveis motivos pelos quais eu possa agradecer. De diversas formas, sou grato a muitas das pessoas que já fizeram parte do meu caminho, mas que hoje não fazem mais parte da minha rotina. Entretanto, sem diminuir a importância de todos estes que contribuíram para este caminho coroado pelo TCC, separo este espaço para agradecer àqueles que participaram ou participam de forma mais ativa no período em que este trabalho foi desenvolvido. Por isso, agradeço:

Em primeiro lugar, pelo apoio incondicional e carinho sempre abundante, aos meus pais, Stella e Ângelo. Sem vocês eu não teria nada e, muito pior, não seria ninguém.

De forma especial, aos meus orientadores: Lélío Brito e Luis Alberto Nascimento, pela confiança em mim depositada e pelas discussões técnicas sempre relevantes. Por me guiarem e acreditarem no meu potencial. Por serem exemplo de que a humildade e o trabalho duro podem e devem, sempre, andar juntos.

Àqueles que o “Ka” colocou no meu caminho e que entraram no meu coração sem me dar escolha: Matheus Scherer, Nelson Andrade, Daniel Manica, Thaís Peruch, Lucas Zappe, Virgínia Bordignon e Wilson Hirt. Perto ou longe, vocês são parte do mais nobre e do mais íntimo que eu tenho. Minha fidelidade, minha dedicação e meu carinho é de vocês.

Aos colegas de laboratório com quem tive o prazer de trabalhar com maior proximidade e com quem aprendo diariamente: Douglas Mocelin, Gracieli Colpo, Débora Cardoso, Natalia Mensch, Larissa Montagner, Camila Kern, Maria Bernadette Correa, Matheus Freitas e Rodrigo Santos. A presença de vocês é inspiradora e um estímulo à perseverança, à evolução pessoal e ao comprometimento com a pesquisa. Tem sido uma honra.

Aos demais colegas de laboratório e de curso, que tornam a faculdade inesquecível. Em especial: César Andriola, Bárbara Griebeler da Motta, Eduarda Fontoura, João Paulo Mérico, Douglas Engelke e Larissa Guerra. Se todos fossem como vocês, ninguém se sentiria longe de casa.

Ao programa PETER, pela orientação, financiamento e estímulo. Se todos os cursos tivessem programas assim, o nível superior brasileiro seria referência mundial.

A toda a equipe do CENPES da PETROBRAS, um exemplo de excelência e profissionalismo em pesquisa. Em especial ao bem-humorado Ulisses Figueiredo.

*“There’s no harm in hoping for the best...
... as long as you’re prepared for the worst.”*

Stephen King

RESUMO

O fenômeno de fadiga em materiais asfálticos está entre as grandes causas de deterioração de pavimentos asfálticos e é objeto de estudo de muitos trabalhos que se preocupam com a sua descrição. Embora este seja um fenômeno bastante estudado, existem parcelas de sua compreensão que permanecem pouco claras. Uma camada de revestimento asfáltico no início de sua vida de serviço sofre com trincamento de pequenas dimensões, ou microtrincamento, em cujo espaço, ao serem aplicados períodos de solitação nula (chamados de períodos de repouso), se manifesta o efeito da regeneração que atua de maneira a fechar estas microtrincas, recuperando propriedades do material e extendendo a vida de fadiga do mesmo. O presente trabalho aplica a mecânica do dano contínuo em uma abordagem mecanística da descrição do fenômeno de regeneração, adaptando o ensaio de fadiga à tração direta para a inserção de períodos de repouso em meio aos ciclos de carregamento, na expectativa de se explorar as características do material frente a este fenômeno. Sabe-se que a regeneração, ou *healing*, é uma propriedade dependente da temperatura, da duração do período de repouso e do histórico de dano sofrido pelo material. Desta forma, o protocolo de caracterização propõe um conjunto de 9 ensaios em combinações de temperatura e período de repouso aplicados em diferentes condições de integridade do material. Os resultados deste conjunto de condições permitem a construção da denominada curva mestra de regeneração que, através da calibração de uma variável de estado de regeneração desenvolvida para este fim, permite a previsão da capacidade de regeneração de misturas asfálticas para quaisquer condições em que a mecânica do dano contínuo seja válida. A metodologia proposta foi aplicada a três misturas com diferentes composições em termos de ligante asfáltico e granulometria, avaliando-se não somente os resultados, mas também os métodos aplicados na caracterização. Ao final do trabalho são apresentadas as curvas mestras de regeneração calibradas para as três misturas ensaiadas. Os resultados se mostraram satisfatórios e coerentes e o protocolo proposto, embora passível de evoluções, se mostrou adequado para a avaliação realizada, permitindo a modelagem de uma propriedade, até então, carente em metodologias de previsão.

Palavras-chave: regeneração asfáltica; fadiga; mecânica do dano contínuo; modelagem.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeito esperado em modificações reológicas do ligante asfáltico.....	18
Figura 2 – Representação esquemática das regiões de comportamento mecânico conceitual em função do nível de deformação aplicado e do número de ciclos, para materiais viscoelásticos	21
Figura 3 – Representação esquemática das regiões de comportamento mecânico conceitual em função do nível de deformação aplicado e do número de ciclos, para misturas asfálticas.....	22
Figura 4 – Elementos básicos constitutivos de modelos viscoelásticos por análogos mecânicos – Mola de Hooke e Amortecedor de Newton	23
Figura 5 – Resposta dos análogos mecânicos à solicitação de grau em tensão e em deformação. a) Mola Hookeana; b) Amortecedor Newtoniano; c) elemento Viscoelástico (VE) ideal.	25
Figura 6 – Modelos de análogos mecânicos: a) Maxwell, b) Kelvin-Voigt, c) Kelvin-Voigt Generalizado e d) Maxwell Generalizado	26
Figura 7 – a) Representação do modelo generalizado de Kelvin-Voigt com sua descrição através da série de Prony para Função Compliância; b) Representação do modelo generalizado de Maxwell com sua descrição através da série de Prony para o Módulo de Relaxação.....	27
Figura 8 – a) Comportamento tensão vs deformação de material viscoelástico sob ciclos de carregamento e descarregamento no domínio viscoelástico linear; b) Comportamento tensão vs pseudo-deformação de material viscoelástico sob ciclos de carregamento e descarregamento no domínio viscoelástico linear.	31
Figura 9 – Resultado teórico de ensaio módulo de relaxação com varredura de frequência para 6 temperaturas distintas e temperatura de referência T_R	35
Figura 10 – Processo gráfico de construção da curva mestra do módulo de relaxação para a temperatura de referência T_R no espaço log-log.....	36
Figura 11 – Hipótese do processo de fechamento de trincas.....	39
Figura 12 – Detalhamento do processo de fechamento de trincas em material asfáltico	40
Figura 13 – Esquema do processo de humedecimento em uma região de interface polímero-polímero. As regiões sombreadas indicam zonas permeadas de raio r que deve crescer com a evolução do tempo.....	42
Figura 14 – Comportamento em regeneração de uma amostra de ligante em função da temperatura (T_i) e do tempo de condicionamento (t_i).....	48
Figura 15 – a) Representação esquemática de repousos do tipo <i>Group-Rest</i> ; b) Representação esquemática de repousos do tipo <i>Pulse-Rest</i>	50
Figura 16 – Aparato utilizado para o ensaio de healing no Reômetro de Cisalhamento Dinâmico	51
Figura 17 – Resultado do comportamento à fadiga de uma amostra de mastique submetida a períodos de repouso em ensaio de cisalhamento torsional cíclico	52
Figura 18 – Modelo esquemático de montagem de ensaio para healing em flexão à três pontos	53
Figura 19 – Equipamento utilizado no ensaio de Flexão à Quatro Pontos com representação real e esquemática.....	54

Figura 20 – Equipamento utilizado no ensaio de Fadiga à Tração Direta, com representação real e esquemática.....	55
Figura 21 – Resultado da aplicação de períodos de repouso em mistura asfáltica representados no espaço C vs N para fins de avaliação de <i>healing</i>	56
Figura 22 – Composição granulométrica das misturas avaliadas.....	58
Figura 23 – Resultados do ensaio de módulo dinâmico para as misturas avakuadas. a) Módulo Dinâmico vs Frequência Reduzida para misturas caracterizadas; b) Ângulo de fase vs Frequência reduzida para misturas caracterizadas.....	60
Figura 24 – Representação esquemática do procedimento de corte de topo e base dos corpos de prova.	62
Figura 25 – Processo de colagem dos corpos de prova. a) Recobrimento da superfície com cola epóxi; b) Cura da cola por 24h em gabarito.	63
Figura 26 – Corpo de prova instalado em configuração prévia ao procedimento experimental.	64
Figura 27 – Fluxograma de ensaios realizados para obtenção dos dados necessários de cada corpo de prova.	65
Figura 28 – Modelo de prensa hidráulica utilizado - MTS © 810 UTM <i>Test System</i> (modelo 318.25).....	66
Figura 29 – Fluxograma do processo iterativo do ensaio <i>Fingerprint</i>	68
Figura 30 – Períodos de repouso reduzidos nas condições de ensaio.	72
Figura 31 – Representação esquemática das regiões de carregamento aplicado com variação na taxa de aquisição de dados.....	73
Figura 32 – Identificação do ponto de ruptura no ensaio de fadiga à tração direta com períodos de repouso.....	74
Figura 33 – Valores usuais para K_1 em função do fator de forma (β) e do parâmetro de dano (α), extraído do procedimento normativo de ensaio de Fadiga à Tração Direta, AASHTO TP 107-14.....	78
Figura 34 – Curva C vs S com <i>healing</i> , obtida através de ensaio cíclico de fadiga à tração direta com períodos de repouso de 270 segundos na temperatura de 30° C.	80
Figura 35 – Curva C vs N ou C vs S com períodos de repouso, com representação de parâmetros para cálculo dos índices de regeneração.....	82
Figura 36 – Exemplo de deslocamento de trecho da curva de dano característico com regeneração.....	83
Figura 37 – Curva C vs S com períodos de repouso após translação.	84
Figura 38 – Representação esquemática do deslocamento horizontal aplicado à curva de dano característica após um período de repouso.	86
Figura 39 – a) C vs N para ensaio com aplicação de repousos em um mesmo ponto de integridade; b) Número de ciclos necessários para atingimento da integridade de repouso para cada repouso aplicado.....	88
Figura 40 – Valores de índice de regeneração para cada uma das condições de ensaio em função da variável de dano recuperado acumulado (S_{acum}).	89

Figura 41 – Valores de índice de regeneração deslocados horizontalmente, com aproximação em forma de potência decrescente.....	90
Figura 42 – Valores de SF otimizados manualmente em função do período de repouso reduzido, com aproximação em forma de potência decrescente.	92
Figura 43 – Resultados de ensaio de curvas características de dano deslocadas a partir de variações de dano - mistura 10148. a) Períodos de Repouso de 270, 30 e 10 segundos em 30° C; b) Períodos de Repouso de 270, 30 e 10 segundos em 20° C; c) Períodos de Repouso de 270, 60 e 10 segundos em 15° C.	94
Figura 44 – Resultados de ensaio de curvas características de dano deslocadas a partir de variações de dano para mistura 13213. a) Períodos de Repouso de 270, 30 e 10 segundos em 30° C; b) Períodos de Repouso de 270 e 30 segundos em 20° C; c) Períodos de Repouso de 270, 60 e 10 segundos em 15° C.	96
Figura 45 – Resultados de ensaio de curvas características de dano deslocadas a partir de variações de dano para mistura 11885. a) Períodos de Repouso de 270, 30 e 10 segundos em 30° C; b) Períodos de Repouso de 270 e 30 segundos em 20° C; c) Períodos de Repouso de 270, 60 e 10 segundos em 15° C.	98
Figura 46 – Resultados da modelagem das curvas características de dano deslocadas - mistura 10148. a) Períodos de Repouso de 270, 30 e 10 segundos em 30° C; b) Períodos de Repouso de 270, 30 e 10 segundos em 20° C; c) Períodos de Repouso de 270, 60 e 10 segundos em 15° C.	102
Figura 47 – Resultados da modelagem das curvas características de dano deslocadas - mistura 13213. a) Períodos de Repouso de 270, 30 e 10 segundos em 30° C; b) Períodos de Repouso de 270 e 30 segundos em 20° C; c) Períodos de Repouso de 270, 60 e 10 segundos em 15° C.	104
Figura 48 – Resultados da modelagem das curvas características de dano deslocadas - mistura 11885. a) Períodos de Repouso de 270, 30 e 10 segundos em 30° C; b) Períodos de Repouso de 270, 30 e 10 segundos em 20° C; c) Períodos de Repouso de 270, 60 e 10 segundos em 15° C.	106
Figura 49 – Índices de regeneração vs variável de dano recuperado acumulado para mistura 10148.	108
Figura 50 – Índices de regeneração vs variável de dano recuperado acumulado para mistura 13213.	108
Figura 51 – Índices de regeneração vs variável de dano recuperado acumulado para mistura 11885.	109
Figura 52 – Valores médios de índices de regeneração para mistura 10148.....	110
Figura 53 – Valores médios de índices de regeneração para mistura 13213.....	111
Figura 54 – Valores médios de índices de regeneração para mistura 11885.....	111
Figura 55 – Modelagem de SF para mistura 10148.	112
Figura 56 – Modelagem de SF para mistura 13213.	113
Figura 57 – Modelagem de SF para mistura 11885.	113
Figura 58 – Curva Mestre de <i>healing</i> calibrada para mistura 10148.	114
Figura 59 – Curva Mestre de <i>healing</i> calibrada para mistura 13213.	115
Figura 60 – Curva Mestre de <i>healing</i> calibrada para mistura 11885.	115

Figura 61 – Curvas Mestras de <i>healing</i> calibradas das misturas 10148, 13213 e 11885.	117
Figura 62 – Curvas de <i>SF</i> calibradas para as misturas 10148, 13213 e 11885.	118

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Funções utilizadas para modelagens viscoelásticas e <i>Presmoothing</i>	28
Quadro 2 – Resumo das implicações do princípio da correspondência elástico-viscoelástico e da teoria do trabalho potencial no equacionamento de materiais viscoelásticos com e sem dano	34
Quadro 3 – Características das misturas avaliadas	57
Quadro 4 – Limites da Faixa B do DNIT	59
Quadro 5 – Parâmetros de modelagem das misturas estudadas.	61
Quadro 6 – Condições de ensaio aplicadas na metodologia proposta.	71
Quadro 7 – Períodos de repouso reduzidos nas condições de ensaio.	71
Quadro 8 – Dados de deformação solicitante, variação de dano e variação de número de ciclos nos períodos de repouso aplicados para mistura 10148	95
Quadro 9 – Dados de deformação solicitante, variação de dano e variação de número de ciclos nos períodos de repouso aplicados para mistura 13213	97
Quadro 10 – Dados de deformação solicitante e variação de dano e número de ciclos nos períodos de repouso aplicados para mistura 11885	99
Quadro 11 – Constantes de modelagem das curvas de dano característica deslocadas para mistura 10148	101
Quadro 12 – Constantes de modelagem das curvas de dano característica deslocadas para mistura 13213	103
Quadro 13 – Constantes de modelagem das curvas de dano característica deslocadas para mistura 11885.	105
Quadro 14 – Quadro resumo de valores médios e desvio padrão para índice de regeneração calculado sobre a curva original (%HS) e sobre curva deslocada (%HS_oc).	110
Quadro 15 – Constantes de calibração do modelo proposto de <i>healing</i> para as misturas avaliadas.	116

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 MATERIAIS ASFÁLTICOS.....	16
2.1.1 Ligante Asfáltico	17
2.1.2 Mastique.....	18
2.1.3 Mistura Asfáltica.....	19
2.2 VISCOELASTICIDADE.....	19
2.2.1 Comportamento Dependente Do Tempo	20
2.2.2 Modelagem Por Análogos Mecânicos.....	23
2.2.3 S-VECD.....	28
2.2.3.1 Princípio da Correspondência elástico-viscoelástico.....	29
2.2.3.2 Teoria do Trabalho Potencial na mecânica do Dano Contínuo	32
2.2.3.3 Princípio da Superposição tempo-Temperatura (t-TS).....	34
2.3 <i>HEALING</i>	37
2.3.1 Definição	37
2.3.1.1 Rearranjo superficial (“ <i>Surface Rearrangement</i> ”)	40
2.3.1.2 Aproximação superficial (“ <i>Surface Approach</i> ”):	41
2.3.1.3 Humedecimento (“ <i>Wetting</i> ”)	41
2.3.1.4 Difusão (“ <i>Diffusion</i> ”);	42
2.3.1.5 Aleatorização (“ <i>Randomization</i> ”).....	43
2.3.2 Características que afetam o <i>Healing</i>.....	44
2.3.2.1 Fatores Internos	44
2.3.2.1.1 Características do ligante asfáltico	44
2.3.2.1.2 Características da mistura asfáltica	45
2.3.2.1.3 Uso de aditivos ou modificadores	46
2.3.2.2 Fatores Externos	47
2.3.2.2.1 Temperatura.....	48
2.3.2.2.2 Período de Repouso.....	49
2.3.2.2.3 Carregamento	49
2.4 METODOLOGIAS RELEVANTES NA AVALIAÇÃO DAS RESPOSTAS A PERÍODOS DE REPOUSO	50
2.4.1 Cisalhamento Dinâmico.....	51
2.4.2 Ensaio de Flexão à Três pontos.....	52

2.4.3 Ensaio de Flexão à Quatro pontos	53
2.4.4 Ensaio de Fadiga à Tração Direta	54
3. MATERIAIS E MÉTODOS	56
3.1 MISTURAS AVALIADAS E PREPARAÇÃO DO ENSAIO	57
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	64
3.2.1 Ensaio Fingerprint	66
3.2.2 Ensaio FTD - <i>Healing</i>	69
3.3 TRATAMENTO DE DADOS	74
3.3.1 C vs S com períodos de repouso	75
3.3.2 Cálculo do Índice de Regeneração.....	80
3.3.3 Modelagem do Estado de <i>Healing</i>	86
3.3.3.1 Variável de estado de dano acumulado (<i>Sacum</i>).....	87
3.3.3.2 Curva mestra de <i>healing</i>	89
4. RESULTADOS	92
4.1 CURVAS DE <i>HEALING</i> DESLOCADAS.....	93
4.1.1 Mistura 10148	94
4.1.2 Mistura 13213	96
4.1.3 Mistura 11885	98
4.1.4 Análises e comparações	99
4.2 MODELAGEM DE C vs S COM DESLOCAMENTO	100
4.2.1 Mistura 10148	101
4.2.2 Mistura 13213	103
4.2.3 Mistura 11885	105
4.3 MODELAGEM DE <i>HEALING</i>	107
4.3.1 Índice de <i>Healing</i> das misturas avaliadas	107
4.3.2 Curva Mestra de <i>Healing</i>	112
4.3.3 Análises e comparações	116
5. CONCLUSÕES.....	119
REFERÊNCIAS	123

1. INTRODUÇÃO

O método de dimensionamento de pavimentos brasileiro proposto pelo engenheiro Murillo Lopes de Souza é largamente utilizado desde sua publicação em 1981 guiando e orientando a construção de pavimentos flexíveis em todo o território nacional. Este método, inquestionavelmente eficiente dentro de sua proposta, sugere dimensões e características das camadas de um pavimento para que este seja capaz de suportar as solicitações distribuindo os esforços e minimizando os efeitos de deformação permanente da camada de subleito.

Entretanto, com o desenvolvimento tecnológico dos veículos de transporte que utilizam o modal rodoviário decorrente do progresso econômico do país e da crescente demanda de transporte de bens, ocorre uma evolução das solicitações em nível de pavimento. Estas alterações dos níveis de serviço nos pavimentos geram outros aspectos, além da deformação permanente na camada de subleito, que devem ser considerados quando se avalia a qualidade do projeto de um pavimento. Dentro dos diversos aspectos patológicos que afetam um pavimento, podem-se citar dois fenômenos como principais causas de imperfeições nos revestimentos asfálticos: o efeito de fadiga e o efeito de deformação permanente. Ambos estes fenômenos geram desconforto ao usuário e reduzem a vida útil dos pavimentos.

Os fenômenos responsáveis pela deterioração de um pavimento asfáltico são objeto de estudo de numerosos trabalhos que procuram, através de uma correta compreensão da mecânica do dano, descrever o comportamento do material frente às solicitações impostas ao longo da vida de serviço de um pavimento.

Dentre os possíveis fenômenos, conforme mencionado anteriormente, destaca-se o dano/comportamento à fadiga que inicia logo nos primeiros ciclos de carregamento. O dano por fadiga em materiais betuminosos ocorre através do desenvolvimento de trincas de pequenas dimensões (micro trincas) que evoluem conforme as solicitações são continuadas. Este, é um fenômeno de complexa descrição pois envolve o conhecimento das condições de solicitação, das características da mistura e do histórico de carregamento imposto ao material.

A literatura indica diversas formas de manifestação da fadiga em um material, dentre os quais encontra-se a queda relativa de sua rigidez. A variação de rigidez de materiais betuminosos sob solicitações é um efeito também complexo que envolve fenômenos como dissipação de energia

por aquecimento, não-linearidade, tixotropia e dano. Dentre estes efeitos, quando o carregamento aplicado é dotado de períodos de solitação nula (também chamados de períodos de repouso), manifesta-se a denominada capacidade de regeneração (ou “*healing*”) presente em materiais viscoelásticos e comum a materiais como polímeros, metais e cerâmicas.

A regeneração consiste na recuperação de algumas das características originais do material e ocorre através do selamento ou fechamento das trincas que surgem quando o material é solitado. Este efeito é identificado, por exemplo, através de uma recuperação da rigidez perdida durante o carregamento, após os períodos de repouso. Este, também é um efeito complexo, pois muitos dos fenômenos que geram quedas na rigidez do material são reversíveis – aquecimento, tixotropia, etc. - podendo ser dissipados ocasionando, também, uma alteração na rigidez do material.

Embora este efeito possa vir a representar uma significativa variação no número de ciclos até a ruptura do material, ele é normalmente desconsiderado em níveis de simulação por software e possíveis previsões de comportamento quando se avalia a vida útil de um pavimento. O alto custo financeiro e as dificuldades operacionais relacionadas a manutenção e reabilitação de pavimentos podem ser aliados à capacidade de prolongar a vida útil de pavimentos sem uma intervenção direta, o que torna o estudo da capacidade de regeneração de pavimentos bastante atrativo em termos de sustentabilidade em revestimentos asfálticos.

Estudos mais recentes, principalmente a partir de 2000, entendem que a capacidade de regeneração dos materiais betuminosos pode ser utilizada na obtenção de revestimentos asfáltico de maior durabilidade e explorando esta capacidade. Dentre as diversas metodologias propostas, destaca-se o uso do modelo baseado na Mecânica do Dano Contínuo para materiais viscoelásticos (VECD – “*Viscoelastic Continuum Damage*”).

O VECD e o VECD simplificado (S-VECD – “*Simplified Viscoelastic Continuum Damage*”), oferecem uma abordagem eficiente de previsão de comportamento que faz parte do estado da arte na caracterização mecânica de misturas asfálticas (NASCIMENTO, 2015). Estes modelos propõem a análise de misturas asfálticas através da denominada curva *C vs S*, que relaciona a pseudo-rigidez do material (*C*) com uma variável de estado interno (ISV – “*Internal State Variable*”) representativa do dano (*S*). Esta curva, também chamada de curva característica de dano, acessa propriedades fundamentais dos materiais asfálticos e é única para cada tipo de mistura, não dependendo das condições de carregamento utilizadas para obtê-la (ASHOURI,

2014; KARKI; LI; BHASIN, 2015; NASCIMENTO et al., 2014; PALVADI; BHASIN; LITTLE, 2012; UNDERWOOD; BAEK; KIM, 2012; UNDERWOOD; KIM; GUDDATI, 2010; ZEIADA et al., 2016).

Entende-se que, embora os efeitos de dano em um material possam ser abordados fenomenologicamente (CASTRO; SÁNCHEZ, 2006; DAI; WANG; HASAN, 2013; GARCIA et al., 2014; GÓMEZ-MEIJIDE et al., 2016; HUANG; LV; XIAO, 2016; KIM; LITTLE; LYTTON, 2003; LIU et al., 2012; LUO; LIU; ZHANG, 2016; PANG et al., 2012; QIU et al., 2012b.), a análise através da curva característica de dano, por representar características fundamentais do material, oferece resultados abrangentes capazes de descrever, de maneira eficiente e independente das condições de serviço, o comportamento do material (KARKI; LI; BHASIN, 2015; KIM; LITTLE; LYTTON, 2003; QIU, 2012; SI; LITTLE; LYTTON, 2002).

Neste cenário, este trabalho propõe uma abordagem mecânica do fenômeno de regeneração. Diferentemente das abordagens empíricas que almejam a descrição das condições de campo através de sua representação em laboratório, a abordagem proposta tem um foco mecânico, na expectativa de se capturar propriedades intrínsecas do material, capazes de descrever a capacidade de regeneração em quaisquer condições de campo. Este processo será realizado através da adaptação do protocolo de ensaio utilizado no cálculo da curva característica de dano para misturas asfálticas, inserindo períodos de repouso em diferentes condições de período de repouso e temperatura.

O objetivo geral deste trabalho é propor um modelo capaz de descrever o comportamento regenerativo, aplicando a teoria do VECD na representação da variação de rigidez causada por períodos de repouso.

O atendimento ao objetivo geral deste trabalho será realizado através dos seguintes objetivos específicos:

- Desenvolvimento de uma metodologia adaptada do ensaio de fadiga à tração direta proposta pela normativa americana AASHTO TP 107, incluindo inserção de períodos de repouso;
- Quantificação da capacidade de regeneração de misturas asfálticas através da variação de dano decorrente de períodos de repouso;

- Aplicação da mecânica do dano contínuo na proposta de uma variável de estado capaz de descrever a capacidade de regeneração das misturas asfálticas a partir das condições instantâneas;
- Desenvolvimento de curvas capazes de descrever a capacidade regenerativa do material para qualquer condição de temperatura, período de repouso e estado instantâneo de integridade;
- Aplicação do modelo teórico proposto a três misturas com diferentes composições, incluindo calibração das constantes dos modelos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é apresentado um apanhado de informações coletadas na literatura, necessárias para compor a compreensão dos efeitos de regeneração intrínseca de materiais asfálticos que, por vezes, será tratada por seu termo em inglês, *healing*.

A sessão 2.1 apresenta a caracterização dos materiais asfálticos responsáveis, ultimamente, pela manifestação do fenômeno de regeneração em pavimentos asfálticos. A sessão 2.2 aborda a caracterização dos materiais pelo ponto de vista mecanicista, apresentando os análogos mecânicos que compõem a base da modelagem viscoelástica, bem como uma breve apresentação dos princípios fundamentais aplicados na modelagem Viscoelástica Simplificada na mecânica do dano contínuo. Na sessão 2.3, é apresentado o fenômeno de regeneração pela ótica de autores que o estudaram em outros materiais além dos asfálticos. Por fim, na sessão 2.4, são investigados, em uma lista não-exaustiva, ensaios que tentam qualificar e/ou quantificar a capacidade de regeneração.

2.1 MATERIAIS ASFÁLTICOS

Esta sessão caracteriza três dos possíveis níveis de materiais asfálticos em que se pode experimentalmente verificar o efeito de self-healing. Segundo Babadopulos (2017):

“Materiais asfálticos” é um termo genérico utilizado para se referir a materiais que apresentam ligante asfáltico. Três dos principais tipos de materiais asfálticos podem ser identificados: misturas asfálticas, mastiques e ligantes asfálticos. Estes materiais

diferem em sua composição pelo seu percentual de ligante asfáltico (cerca de 5% em massa para o caso de misturas asfálticas, até 100% para o caso de ligante asfáltico puro) e pelo tamanho de seu maior agregado (de alguns nanômetros no caso de ligante asfáltico até cerca de 20 mm para o caso de misturas asfálticas). ” (BABADOPULOS, 2017, p. 8, tradução nossa)

2.1.1 Ligante Asfáltico

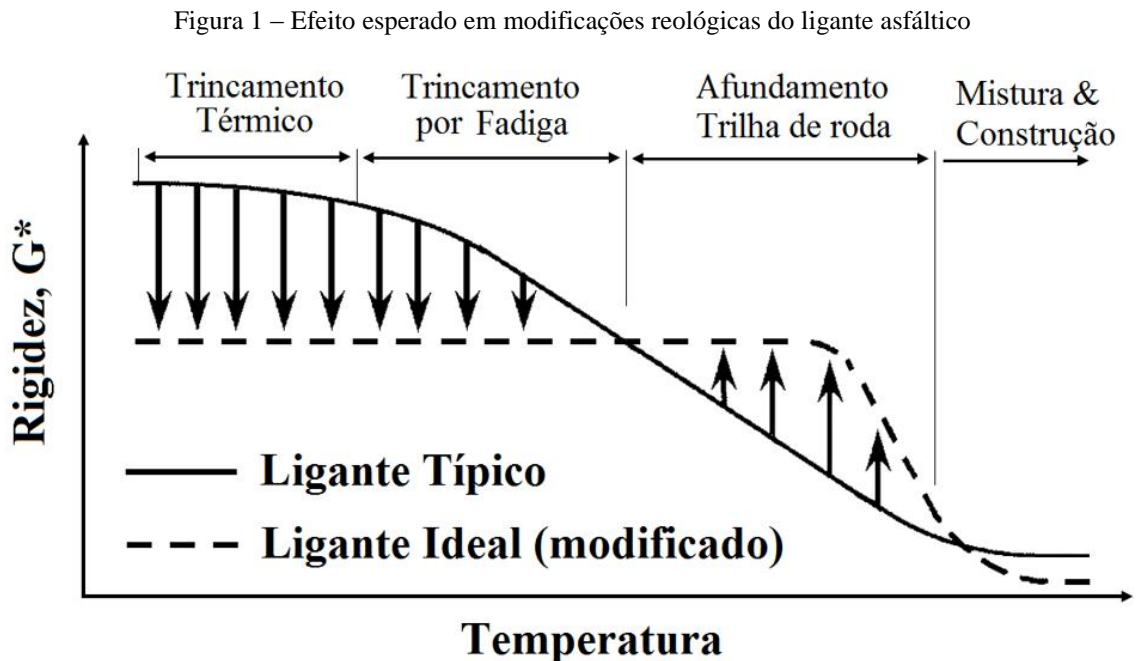
Ligantes asfálticos, também conhecidos como CAP's (Cimento Asfáltico de Petróleo), são uma das possíveis frações retiradas do petróleo ou encontrados na natureza. Este material tem sua aplicabilidade em diversos ramos da construção civil, por ser não-volátil, adesivo e impermeável. Bernucci e colaboradores (2010, p. 25) definem asfalto como “mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo de forma natural ou por destilação, cujo principal componente é o betume, podendo conter ainda outros materiais, como oxigênio, nitrogênio e enxofre, em pequena proporção”. “[...] mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo de forma natural ou por destilação, cujo principal componente é o betume, podendo conter ainda outros materiais, como oxigênio, nitrogênio e enxofre, em pequena proporção.”

A diferenciação entre betume e ligante asfáltico era de maior importância, em termos técnicos, quando alcatrão (substância com propriedades similares à do ligante asfáltico, porém com potencial cancerígeno) era utilizado. Desde que o alcatrão caiu em desuso, betume e ligante asfáltico passaram a ser tratados como sinônimos (BERNUCCI et al., 2010) embora, tecnicamente, isto não seja realidade.

O ligante asfáltico ou, dependendo da literatura, simplesmente asfalto, é um material de comportamento viscoelástico que, a baixas temperaturas, se comporta como um sólido e, em altas temperaturas, como líquido. A descrição e caracterização de materiais viscoelásticos será realizada em maior detalhe na sessão 2.2.

Existem diversos tipos de ligantes asfálticos, normalmente classificados em convencionais, modificados (com adição de polímeros, por exemplo, também chamados de AMPs - asfalto modificado por polímero) e asfalto borracha. Estas modificações realizadas nos ligantes asfálticos tem como objetivo melhorar seu desempenho frente às solicitações impostas, por exemplo, modificando as características originais do ligante virgem. A Figura 1 apresenta o comportamento típico de um ligante asfáltico em termos reológicos e o comportamento ideal

em uma curva de rigidez vs temperatura, indicando os tipos de defeitos que ocorrem em função qualitativa da temperatura.



Fonte: adaptado de Bahia (2009, p. 30)

2.1.2 Mastique

Mastique é a denominação dada para o composto formado pela mistura de ligante asfáltico e agregado mineral de pequenas dimensões (passante na peneira de 0,075 mm de abertura nominal). Este agregado de pequenas dimensões normalmente é chamado de “*filler*”. Babadopulos (2017) apresenta, adequadamente, uma das possíveis formas de se definir o mastique asfáltico:

[...] mastiques também podem ser vistos como a suspensão das partículas de filler mineral em ligante asfáltico, onde a variação nas propriedades do ligante asfáltico para as propriedades de mastique são derivadas da fração volumétrica de filler, como nas teorias clássicas de inclusão de sólidos em fluidos (Einstein 1906; Goddard & Miller, 1967). Nestes casos, as partículas minerais são vistas como material de preenchimento inerte, que modifica a reologia do mastique. (BABADOPULOS, 2017, p. 10, tradução nossa)

Quando frações de agregado mineral de maiores dimensões são inclusas na mistura, define-se como masticue, o material que realiza a ligação entre estes agregados de maiores dimensões.

2.1.3 Mistura Asfáltica

Misturas asfálticas são fundamentalmente composições de ligante asfáltico e agregado pétreo em granulometria variada, incluindo agregados de pequenas dimensões (menores que 0,075 mm) até tamanhos bastante mais significativos (normalmente na ordem de 20 mm). Embora seja esta a composição básica de uma mistura asfáltica, existem diversas formas de se realizar esta composição, de forma a atender as características necessárias em um determinado projeto que, normalmente envolvem os conceitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga (mecânica e/ou térmica), entre outras (BERNUCCI et al., 2008).

Quando uma mistura asfáltica é compactada, esta passa a ser chamada de concreto asfáltico e, quando utilizado como camada de revestimento em uma rodovia, tem como objetivo estrutural a transmissão de solicitações oriundas dos veículos que ali trafegam até as camadas inferiores de forma a permitir a dissipação de tensões sem causar danos à estrutura deste pavimento.

Misturas asfálticas são materiais de comportamento complexo, envolvendo parcelas com respostas recuperáveis (elásticas), respostas dependentes do histórico de carregamento (viscosas) e respostas não-recuperáveis (plásticas) que se relacionam dentro da estrutura. Esta combinação de respostas deste tipo de material o caracteriza como um composto viscoelastoplástico. No escopo deste trabalho o material será tratado através da ótica viscoelástica, considerando que nas condições avaliadas o comportamento plástico será de menor influência.

2.2 VISCOELASTICIDADE

Os materiais em engenharia são comumente modelados de forma a terem representadas suas características dominantes, ou seja, para situações específicas e de condições controladas, desprezam-se respostas de menor influência no comportamento global, simplificando-se

problemas generalizados e possivelmente bastante complexos em problemas mais restritos com o objetivo de obter respostas representativas com menor esforço.

Nesta sessão, são apresentadas questões relativas ao comportamento dos materiais viscoelásticos quando estes são submetidos a carregamentos de tensão/compressão, com o objetivo de caracterizar este comportamento. Para tanto, serão apresentados modelos constitutivos através de análogos mecânicos capazes de representar as respostas do material em tensão/deformação, trazendo-se estes materiais à uma ótica mais próxima de seu comportamento real, bem como o referencial teórico por trás da técnica de modelagem do comportamento viscoelástico com Dano Contínuo (VECD).

2.2.1 Comportamento Dependente Do Tempo

Materiais viscoelásticos são aqueles que apresentam comportamento dependente do tempo (ASHOURI , 2014; KIM (Ed.), 2009; SCHAPERLY,1989), ou seja, sua resposta depende não somente das condições instantâneas de carregamento, mas também de todo o histórico de carregamento já submetido, diferentemente de materiais puramente elásticos em que a resposta do material depende somente das condições instantâneas. Esta característica é, por alguns autores, chamada de “memória” do material.

Como as características de interesse neste estudo são, principalmente, tensão e deformação, as equações (1) e (2) definem duas propriedades que relacionam tensão e deformação no domínio tempo, dependendo das condições de solicitação (“*input*”) e resposta (“*output*”):

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon} \quad (1)$$

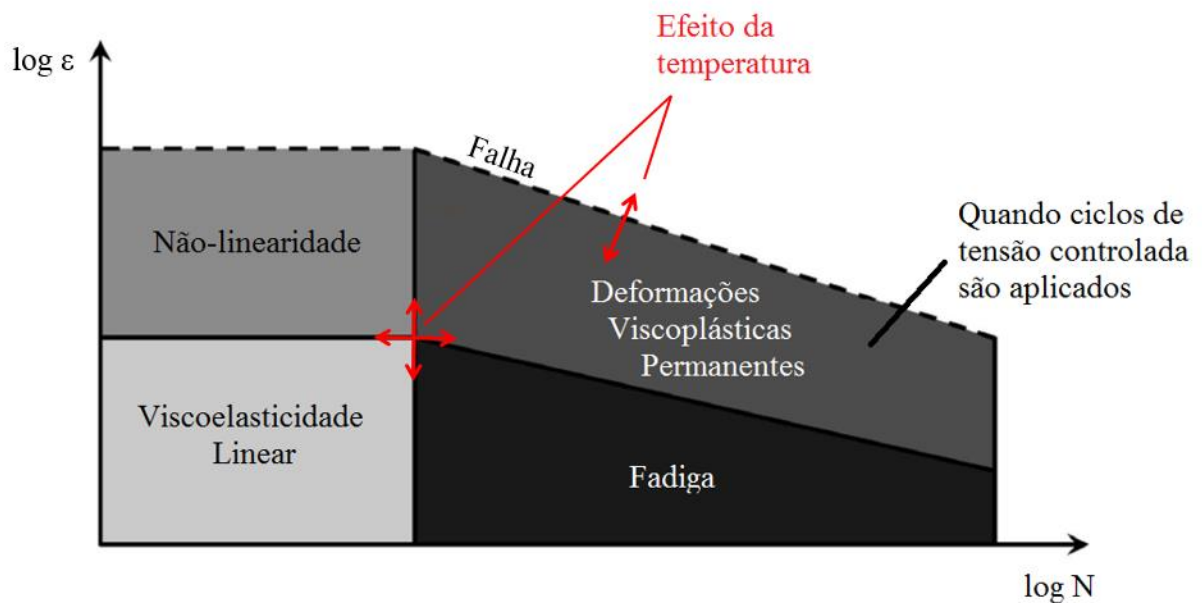
Onde: $E(t)$ = Módulo de Relaxação [MPa] ; $\sigma(t)$ = Tensão aplicada (input) [MPa]; ε = deformação medida (output) []; t = tempo [s].

$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma} \quad (2)$$

Onde: $D(t)$ = Função compliância [MPa⁻¹]; $\varepsilon(t)$ = Deformação aplicada (input) []; σ = Tensão medida (output) [MPa]; t = tempo [s].

Assim como outros materiais, as respostas de materiais asfálticos possuem comportamento variável (linear elástico, linear viscoelástico, não-linear viscoelástico, plástico, dano), dependendo das características das solicitações aplicadas (temperatura, frequência, amplitude, número de ciclos, forma de carregamento) (BABADOPULOS, 2017). A Figura 2 ilustra estas diferentes possíveis regiões de respostas, para um ensaio cíclico em uma amostra teórica de ligante asfáltico. Variações de temperatura modificariam a abrangência das regiões, deslocando também a linha que caracteriza a ruptura do material.

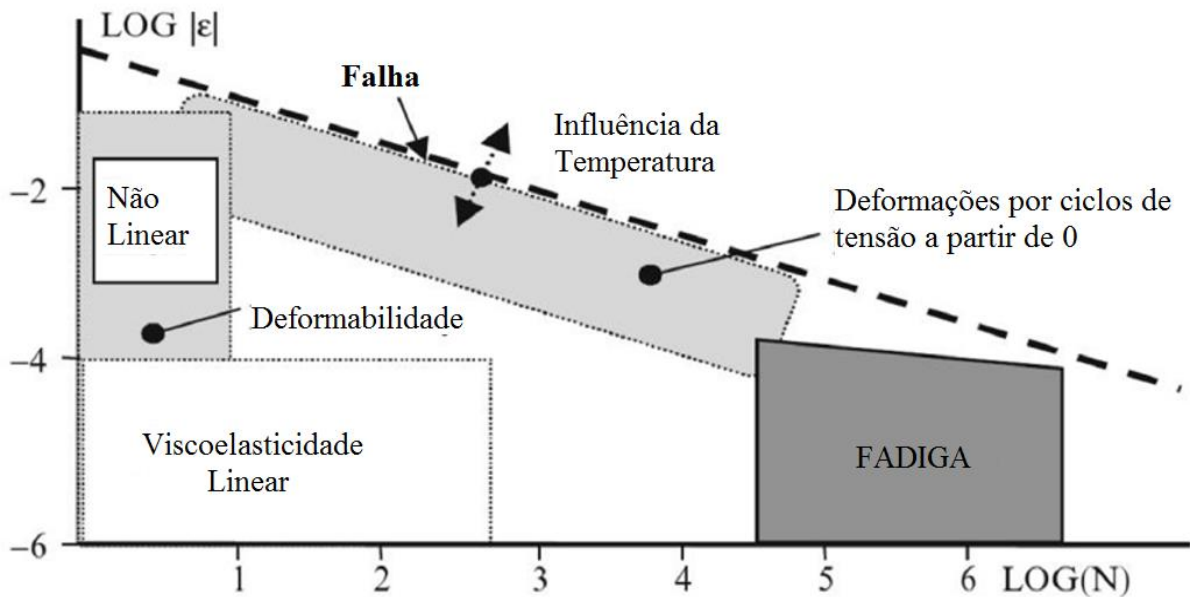
Figura 2 – Representação esquemática das regiões de comportamento mecânico conceitual em função do nível de deformação aplicado e do número de ciclos, para materiais viscoelásticos



Fonte: adaptado de Mangiafico (2014 p. 26)

A Figura 3 apresenta as regiões de comportamento mecânico esperado em um ensaio cíclico para uma amostra teórica de mistura asfáltica. A diferença de comportamento entre o apresentado na Figura 2 e na Figura 3, encontra-se no esqueleto mineral que adiciona uma parcela de deformação plástica às misturas asfálticas, inexistente em ligante asfáltico puro.

Figura 3 – Representação esquemática das regiões de comportamento mecânico conceitual em função do nível de deformação aplicado e do número de ciclos, para misturas asfálticas



Fonte: Adaptado de Mangiafico (2014 p. 27)

Um material encontra-se em seu domínio viscoelástico linear, quando atende aos princípios da superposição e da linearidade. São eles:

- Superposição: A deformação gerada pelo somatório de um número qualquer de tensões tem igual magnitude ao somatório das deformações gerada por cada uma destas tensões individualmente aplicadas. A equação (3) traduz esta propriedade:

$$\varepsilon\left(\sum_{i=1}^N \sigma_i\right) = \sum_{i=1}^N \varepsilon(\sigma_i) \quad (3)$$

Onde ε = deformação medida; σ = tensão aplicada.

- Linearidade: A amplificação de uma determinada tensão aplicada por um fator constante β , resultada em uma amplificação de igual magnitude na deformação resultante. A equação (4) traduz esta propriedade:

$$\varepsilon(\beta \cdot \sigma) = \beta \cdot \varepsilon(\sigma) \quad (4)$$

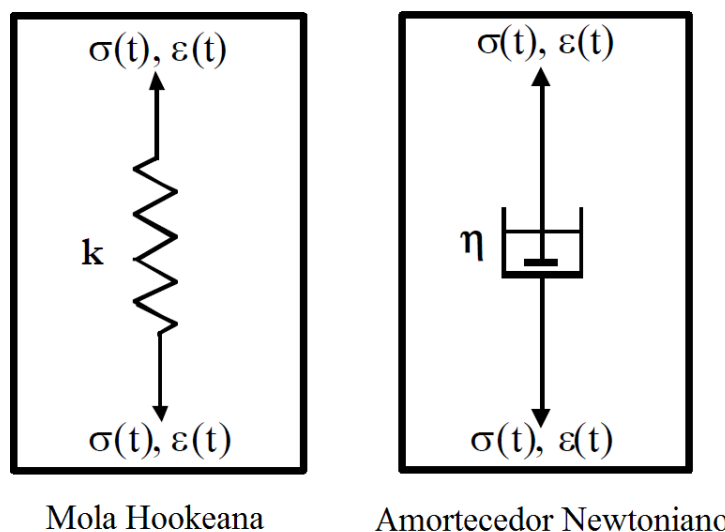
Onde: ε = deformação medida []; σ = tensão aplicada [MPa]; β = fator amplificador [].

2.2.2 Modelagem Por Análogos Mecânicos

O equacionamento descritivo do comportamento em tensão/deformação para materiais viscoelásticos lineares pode ser obtido de duas formas: uso de análogos mecânicos – molas e amortecedores – em associações adequadas ou através de propriedades matemáticas que governam todos os sistemas lineares (SCHAPERY; PARK, 1999). No escopo deste trabalho são apresentadas apenas as derivações da abordagem através de análogos mecânicos.

A Figura 4 apresenta os dois elementos básicos constitutivos dos modelos mecânicos para descrição de materiais viscoelásticos: a mola Hookeana representando um elemento perfeitamente elástico com constante elástica “k”, e o amortecedor Newtoniano representando um elemento perfeitamente viscoso com viscosidade “ η ”.

Figura 4 – Elementos básicos constitutivos de modelos viscoelásticos por análogos mecânicos – Mola de Hooke e Amortecedor de Newton



Fonte: o Autor (2018)

A mola Hookeana tem seu comportamento descrito através da equação (5):

$$\sigma_m = k \cdot \varepsilon_m \quad (5)$$

Onde: σ_m = Tensão na mola [Pa]; k = constante elástica da mola [Pa]; ε_m = deformação na mola [].

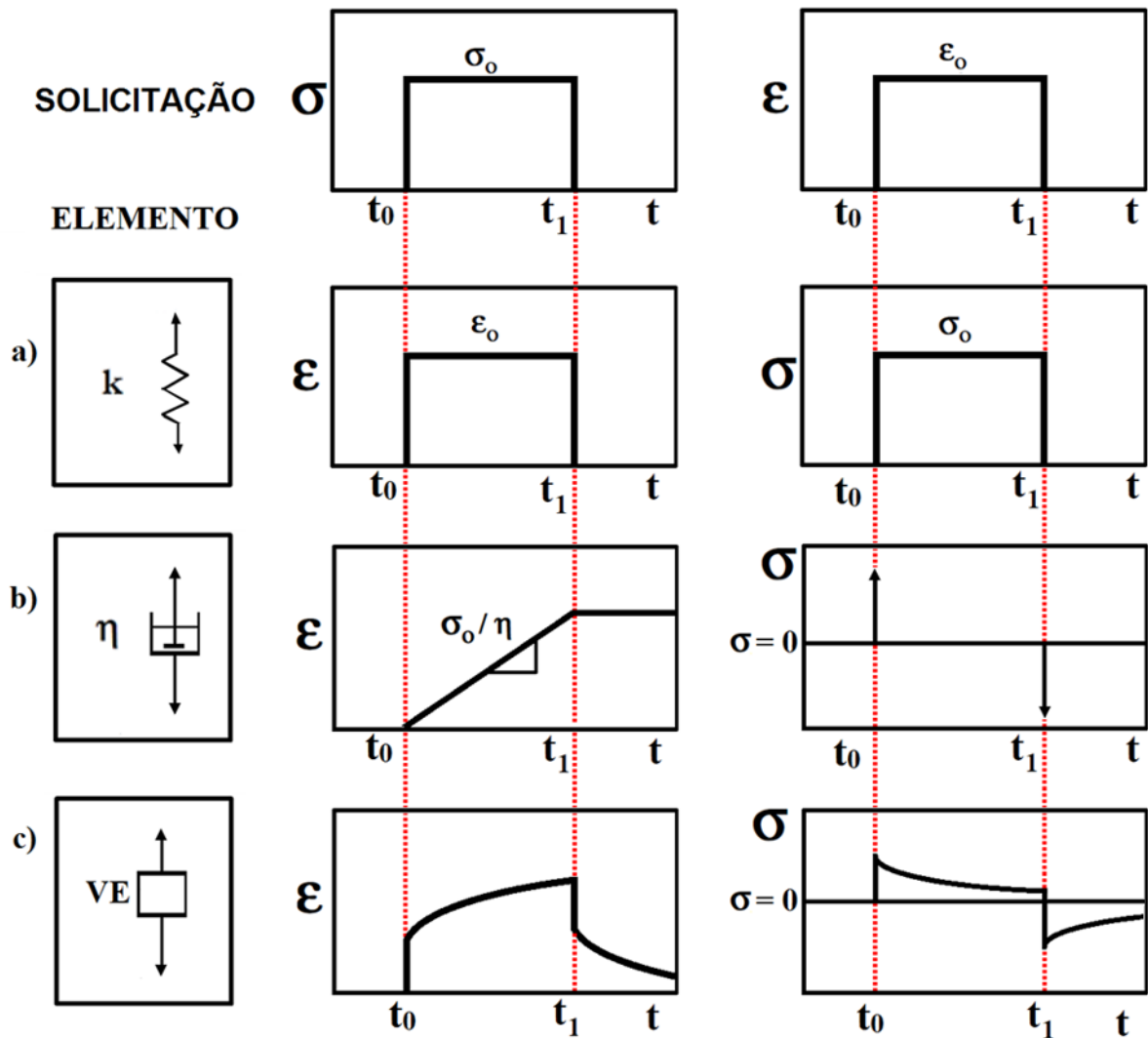
O amortecedor Newtoniano, por sua vez, tem seu comportamento descrito através da equação (6):

$$\sigma_a = \eta \cdot \frac{d\varepsilon_a}{dt} \quad (6)$$

Onde: σ_a = Tensão no amortecedor [Pa]; η = viscosidade do amortecedor [Pa.s]; ε_a = deformação no amortecedor []; t = tempo [s].

As Figura 5 a) e b) apresentam as respostas dos análogos mecânicos para dois inputs distintos, um deles em tensão controlada, medindo-se a resposta em deformação e outro em deformação controlada, medindo-se a resposta em tensão. A Figura 5 c) apresenta as respostas esperadas de um elemento idealmente Viscoelástico.

Figura 5 – Resposta dos análogos mecânicos à solicitação degrau em tensão e em deformação. a) Mola Hookeana; b) Amortecedor Newtoniano; c) elemento Viscoelástico (VE) ideal.



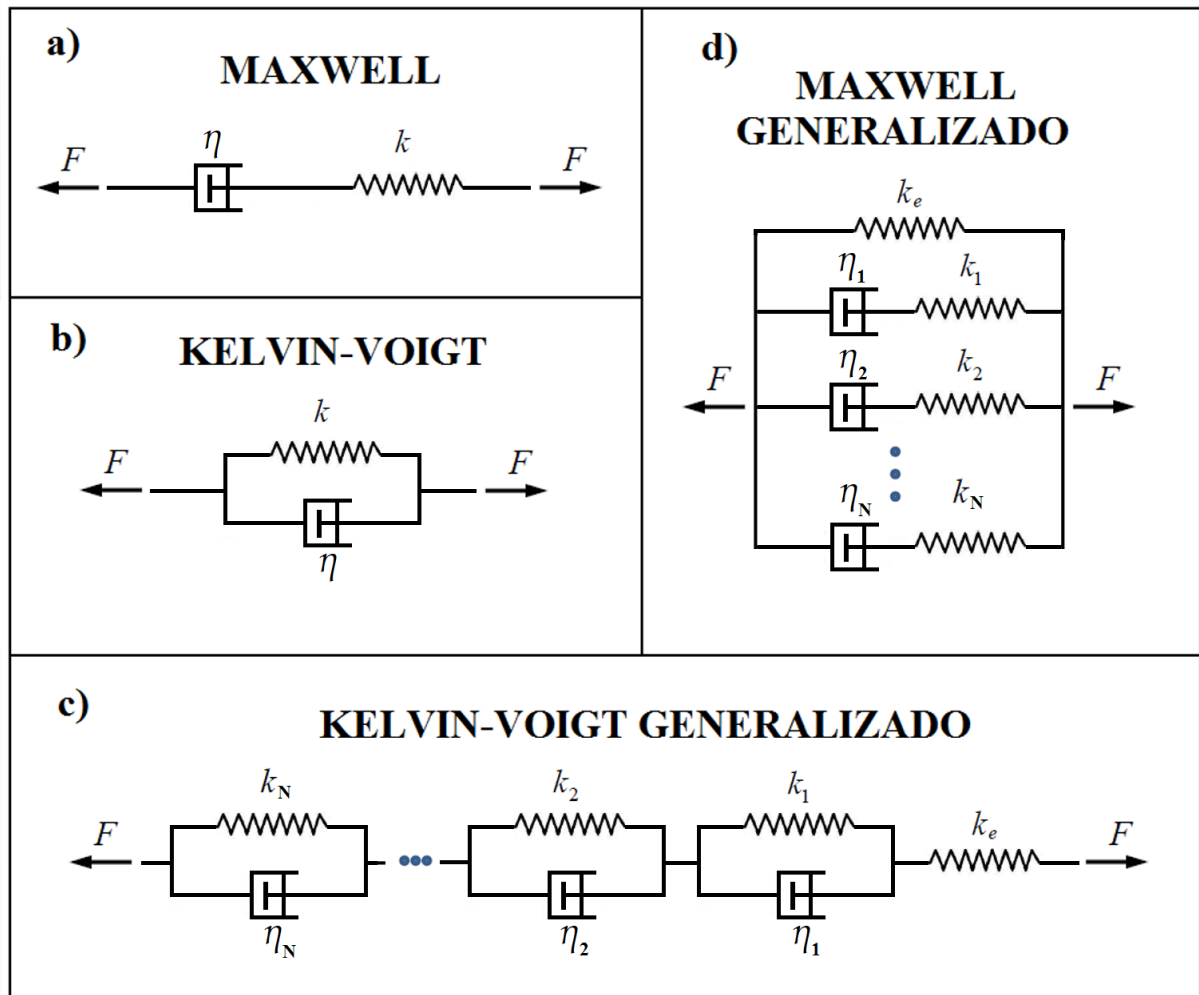
Fonte: o Autor (2018)

Realizando-se associações variadas (série e paralelo) de molas de Hook e amortecedores de Newton (KIM (Ed.), 2009), diversos modelos tentam modelar idealmente o comportamento viscoelástico, para que, através das equações constitutivas, se consiga descrever analiticamente as respostas da representação deste material.

O desenvolvimento clássico desta construção do análogo mecânico viscoelástico apresenta a associação em série de mola e amortecedor (Modelo de Maxwell para Fluidos), a associação em paralelo destes elementos (Modelo de Kelvin-Voigt) e associações destes modelos (Modelo

Generalizado de Kelvin-Voigt – MGKV – e Modelo Generalizado de Maxwell – MGM) conforme apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Modelos de análogos mecânicos: a) Maxwell, b) Kelvin-Voigt, c) Kelvin-Voigt Generalizado e d) Maxwell Generalizado



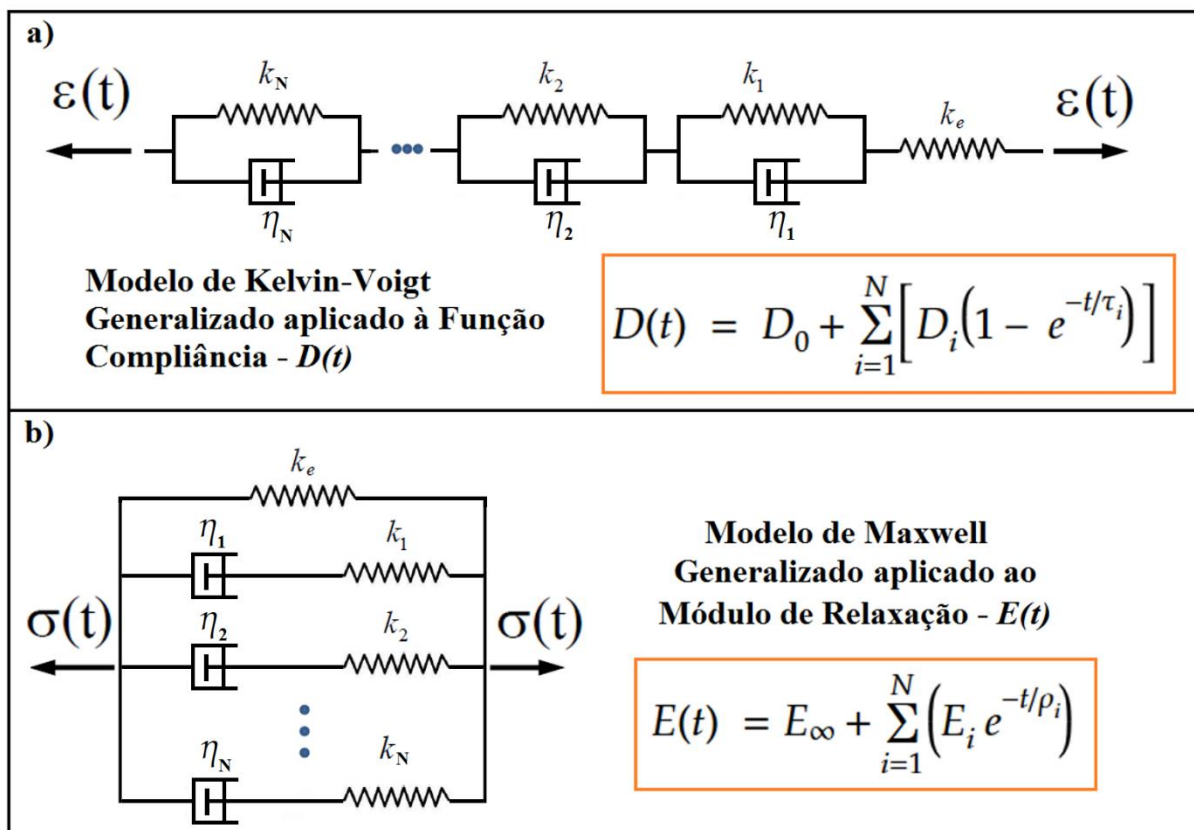
Fonte: o Autor (2018)

Estes modelos, embora formem a base para a descrição mecânica de materiais viscoelásticos, não são representações ideais do comportamento destes, podendo por vezes serem mais ou menos adequados para a representação de um determinado comportamento. Por exemplo, o modelo generalizado de Kelvin-Voigt representa de maneira mais eficiente o comportamento do material quando este for solicitado em deformação do que o modelo generalizado de Maxwell. Por outro lado, o modelo generalizado de Maxwell oferece uma representação melhor que o modelo generalizado de Kelvin-Voigt, quando este for solicitado em tensão.

A representação matemática destes modelos consiste em um somatório de exponenciais decrescentes onde o número de termos é determinado pela quantidade de conjuntos mola-amortecedor utilizados na representação por análogos mecânicos. A esta representação se dá o nome de “Série de Prony”. Este tipo de função é tradicionalmente utilizado para representação das propriedades de materiais viscoelásticos devido à boa capacidade de representação e à simplicidade do tratamento numérico de funções exponenciais (SCHAPERLY, 1962).

A Figura 7 apresenta, respectivamente, representações por séries de Prony do modelo clássico mais adequado para o comportamento sob solicitações de deformação (Kelvin-Voigt generalizado), descrevendo a Função Compliância do mesmo, e do modelo clássico mais adequado para o comportamento sob solicitações de tensão (Maxwell Generalizado), descrevendo o módulo de relaxação do mesmo.

Figura 7 – a) Representação do modelo generalizado de Kelvin-Voigt com sua descrição através da série de Prony para Função Compliância; b) Representação do modelo generalizado de Maxwell com sua descrição através da série de Prony para o Módulo de Relaxação.



Fonte: o Autor (2018)

Embora a representação por séries de Prony seja matemática e computacionalmente adequada para a descrição de propriedades viscoelásticas, por vezes se utilizam outras funções para modelar este tipo de comportamento (ABU AL-RUB, et al., 2010; KIM (Ed.), 2009; KIM; LITTLE; LYTTON, 2003; MOCELIN, 2018; PARK; KIM; SCHAPERLY, 1996; SCHAPERLY; PARK, 1999) . Um destes casos, é na denominada técnica de “*Presmoothing*” (KIM (Ed.), 2009), onde se realiza uma modelagem prévia, com o objetivo de suavizar a curva de dados a serem modelados, minimizando dispersões, eliminando eventuais coeficientes de Prony negativos (que não possuem significado físico em uma representação por análogos mecânicos) e reduzindo oscilações. O Quadro 1 apresenta um compilado de outras funções capazes de substituir a série de Prony e/ou, também, utilizadas em técnicas como a citada anteriormente (*Presmoothing*).

Quadro 1 – Funções utilizadas para modelagens viscoelásticas e *Presmoothing*

$F(t) = C_1 t^n$	(Potência)
$F(t) = C_1 + C_2 t^n$	(Potência Generalizada)
$F(t) = C_1 + \frac{C_2 - C_3}{\left(1 + \frac{C_4}{t}\right)^n}$	(Potência Modificada)
$\text{Log}(F(t)) = C_1 + \frac{C_2 - C_3}{\left(1 + \frac{C_4}{t}\right)^n}$	(Função Sigmoidal)

* C_1, C_2, C_3, C_4 e n são constantes de calibração.

Fonte: o Autor (2018)

2.2.3 S-VECD

A abordagem através da mecânica do dano contínuo viscoelástico simplificado – *Simplified-Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD) – apresenta um protocolo de análise do

comportamento à fadiga de misturas asfálticas. Este protocolo é baseado no modelo de dano contínuo viscoelástico – *Viscoelastic Continuum Damage* (VECD) – aplicado a misturas asfálticas, apresentado por Kim, Daniel e Wen (2002). Esta simplificação do VECD consiste em modificar o procedimento de ensaio original que opera de forma monotônica (carregamento constante) para operar em carregamento cíclico, reduzindo a carga solicitada dos equipamentos utilizados que, para o protocolo original, possui valores muito elevados, chegando próximo ao limite dos equipamentos utilizados.

Autores como Christensen e Bonaquist (2005, 2009) e Kutay (2008) trabalharam em modelos que permitissem esta alteração nos ensaios, obtendo sucesso parcial, pois seus modelos apresentavam algumas incompatibilidades teóricas na adaptação. Underwood et al. (2010) apresentam uma solução que corrige estas deficiências teóricas existentes nos modelos anteriores (NASCIMENTO, 2015), expandindo a aplicabilidade e reduzindo o tempo necessário para a caracterização da mistura.

Para que seja possível apresentar corretamente o protocolo de análise simplificado utilizado como base neste trabalho, é importante recapitular os princípios teóricos por trás do VECD. O VECD é uma abordagem mecanicista que modela o comportamento de materiais viscoelásticos em tensão/deformação cobrindo os efeitos de viscoelasticidade linear e de dano causado por micro trincas na estrutura do material, baseando-se em três princípios: o princípio da correspondência elástico-viscoelástico, a teoria do trabalho potencial de Schapery, baseado na mecânica do dano contínuo (KIM (Ed.), 2009; MOCELIN, 2018; NASCIMENTO, 2015) e o princípio da superposição tempo-temperatura. Estes princípios são abordados com maior detalhe nas seções 2.2.3.1, 2.2.3.2 e 2.2.3.3 respectivamente.

2.2.3.1 Princípio da Correspondência elástico-viscoelástico

O princípio da correspondência elástico-viscoelástico consiste na simplificação matemática de problemas que envolvem equações viscoelásticas em problemas com representação através de equações elásticas (KIM (Ed.), 2009; NASCIMENTO, 2015). Isto é possível através do uso das chamadas pseudo-variáveis que simplificam o equacionamento dos efeitos de tensão/deformação de materiais viscoelásticos em equações de equivalência elástica. A Figura 8 ilustra o efeito desta abordagem, onde a Figura 8 a) representa o comportamento descrito pela equação (7) e a Figura 8 b) representa o comportamento descrito pela Equação (10).

$$\sigma = \int_0^{\xi} E(\xi - \tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau \quad (7)$$

Onde: σ = Tensão [Pa]; ξ = tempo reduzido [s]; $E(t)$ = Módulo de Relaxação [Pa]; τ = variável de integração [s]; ε = deformação [m/m]; t = tempo físico [s].

A variável tempo reduzido (ξ) é dada pela Equação (8), que está relacionada ao princípio da superposição tempo-temperatura, que terá uma abordagem mais profunda na seção 2.2.3.3.

$$\xi = \frac{t}{a_T} \quad (8)$$

Onde: ξ = tempo reduzido [s]; t = tempo físico [s]; a_T = *shift-factor* [].

A pseudo-deformação é definida através da Equação (10):

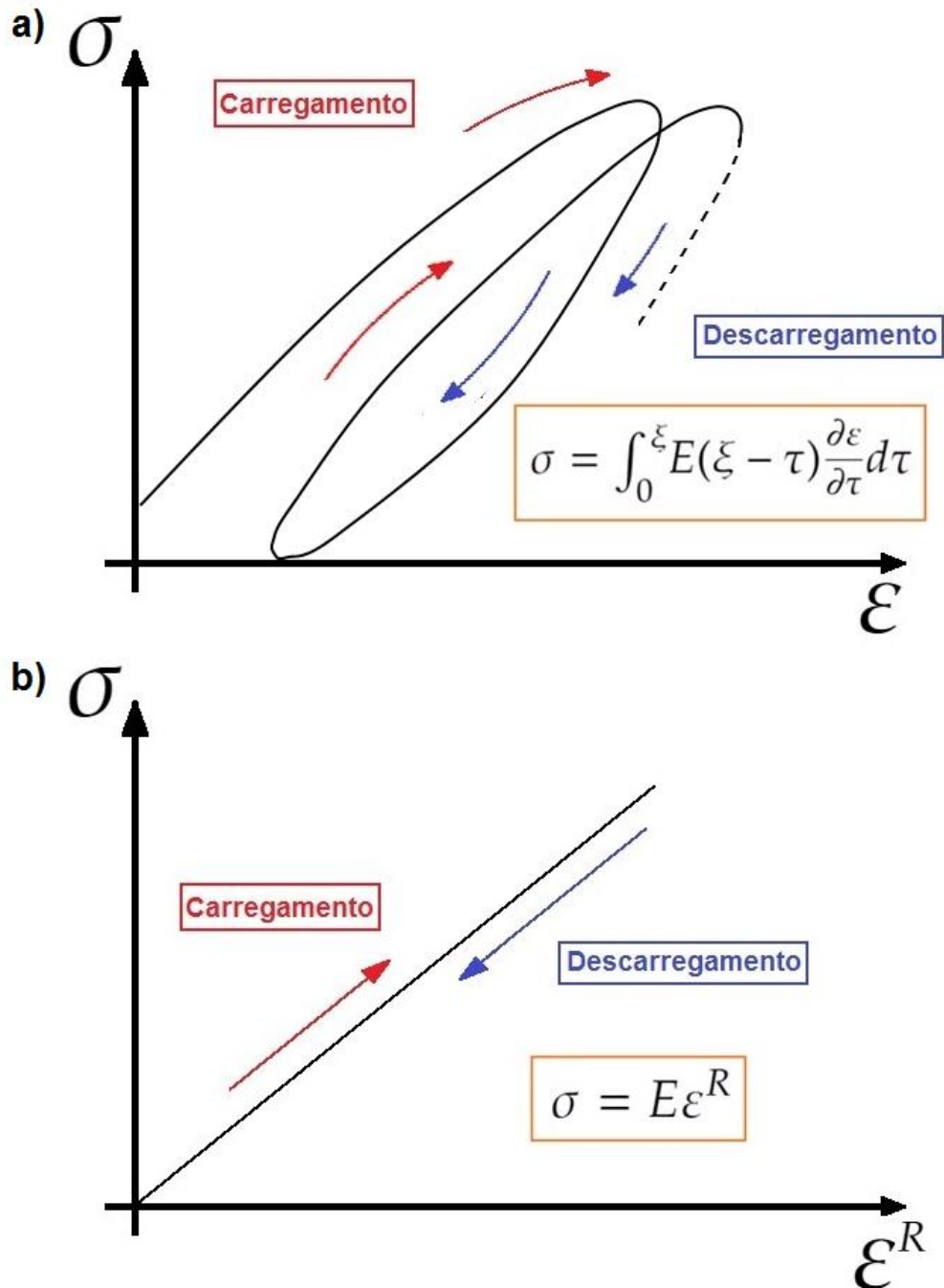
$$\varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \int_0^{\xi} E(\xi - \tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau \quad (9)$$

Onde: ε^R = pseudo-deformação []; E_R = Módulo de referência [Pa]; $E(t)$ = Módulo de Relaxação [Pa]; τ = variável de integração [s]; ε = deformação [m/m]; t = tempo físico [s].

Desta forma, a Equação (7) pode ser reescrita na forma da Equação (10) que, embora tenha o mesmo formato da equação que descreve o comportamento tensão vs deformação para materiais elásticos, descreve o comportamento de materiais viscoelásticos quando estes encontram-se no domínio viscoelástico linear, através do uso da pseudo-variável de deformação – pseudo-deformação (ε^R).

$$\sigma = E_R \varepsilon^R \quad (10)$$

Figura 8 – a) Comportamento tensão vs deformação de material viscoelástico sob ciclos de carregamento e descarregamento no domínio viscoelástico linear;
 b) Comportamento tensão vs pseudo-deformação de material viscoelástico sob ciclos de carregamento e descarregamento no domínio viscoelástico linear.



(Fonte: adaptado de 2009 KIM pg. 169)

Ultimamente, esta simplificação permite a obtenção de respostas viscoelásticas através do procedimento de conversão da resposta elástica análoga (KIM et al., 2009; SCHAPERY, 1984). A solução deste problema reside então, no cálculo da pseudo-deformação que, através da

equação (9) pode se tornar bastante custosa em termos computacionais, pois a integral é calculada por partes para cada intervalo de tempo que precede o intervalo de interesse (KIM et al., 2009). Uma maneira mais eficiente de resolver este problema é através do uso de variáveis de estado, descrevendo o comportamento de cada elemento de Maxwell (Figura 6 – a). A utilização desta técnica transforma a abordagem de convolução da equação (9) em um processo algébrico descrito pelas equações (11), (12) e (13).

$$\varepsilon^R(n+1) = \frac{1}{E_R} \left[\eta_0^{n+1} + \sum_{i=1}^m \eta_i^{n+1} \right] \quad (11)$$

Onde: ε^R = Pseudo-Deformação [MPa^{-1}]; n = identificador do intervalo de tempo; E_R = Módulo de Referência [MPa]; η_0^{n+1} = variável de estado para resposta puramente elástica do modelo de Maxwell Generalizado no instante $n+1$; η_i^{n+1} = variável de estado para o i -ésimo elemento de Maxwell no instante $n+1$; m = Número de elementos de Maxwell no modelo.

$$\eta_0^{n+1} = E_\infty(\varepsilon^{n+1} - \varepsilon^0) \quad (12)$$

$$\eta_i^{n+1} = e^{-\Delta t/\rho_i} \eta_i^n + E_i e^{-\Delta t/2\rho_i} (\varepsilon^{n+1} - \varepsilon^n) \quad (13)$$

Onde: η_0^n = variável de estado para resposta puramente elástica do modelo de Maxwell Generalizado no n -ésimo instante []; η_i^n = variável de estado para o i -ésimo elemento de Maxwell no n -ésimo instante []; E_∞ = Módulo de equilíbrio para longos períodos [MPa]; ε^n = deformação no n -ésimo instante []; ε^0 = deformação no instante inicial []; Δt = intervalo entre o n -ésimo instante e o $(n+1)$ -ésimo instante [s]; ρ_i = tempo de relaxação do i -ésimo elemento de Maxwell [s].

2.2.3.2 Teoria do Trabalho Potencial na mecânica do Dano Contínuo

A Teoria do Trabalho Potencial foi proposta por Schapery (1990) e consiste na descrição da redução das propriedades do material em função do nível de dano que ocorre no material através de variáveis de estado-interno. Esta redução de propriedades é descrita através da denominada curva característica de dano do material, ou curva C vs S , onde o parâmetro C é denominado

pseudo-rigidez (“*pseudostiffness*”) ou integridade e S é a variável de estado-interno de acúmulo de dano. Teoricamente, a integridade do material varia do valor unitário (para materiais não-danificados) até zero (para materiais completamente danificados), embora a falha do material ocorra antes de a integridade chegar a zero (BABADOPULOS et al., 2016). O processo para o cálculo da curva de dano característico para materiais asfálticos através do S-VECD é descrito, por exemplo no trabalho de Underwood, Baek e Kim (2012), e será melhor explorada na seção de materiais e métodos deste trabalho.

Fundamentalmente, os elementos desta teoria estão baseados nas equações (14), (15) e (16) que são, respectivamente, a Função Densidade de Deformação, a Relação Tensão-Deformação e a Lei de Evolução do Dano (ASHOURI, 2014; KIM (Ed.), 2009; NASCIMENTO, 2015):

$$W = W(\varepsilon, S_m) \quad (14)$$

$$\sigma = \frac{\partial W}{\partial \varepsilon} \quad (15)$$

$$-\frac{\partial W}{\partial S_m} = \frac{\partial W_S}{\partial S_m} \quad (16)$$

Onde: σ = tensor de tensões [MPa]; ε = tensor de deformações []; S_m = variável de estado-interno de dano []; W_S = energia dissipada devido ao dano.

A partir desta formulação, descreve-se o efeito de dano no material. Se as perdas energéticas por efeitos termodinâmicos forem desconsideradas, a energia dissipada por dano causado ao material é equivalente à diferença entre a chamada energia de deformação (“*Strain Energy*”) e o trabalho realizado sobre o sistema (NASCIMENTO, 2015).

Esta teoria ganha abrangência e significância, quando combinada com o princípio da correspondência elástico-viscoelástico que abrange as características hereditárias de materiais viscoelásticos que seriam descritas por uma integral de convolução, através do uso das pseudo-variáveis onde a energia de deformação passa a ser uma pseudo-energia de deformação (NASCIMENTO, 2015).

Desta forma, o Quadro 2 sumariza as modificações de equacionamento na descrição do modelo levando em conta o uso do princípio da correspondência elástico-viscoelástico e da teoria do trabalho potencial.

Quadro 2 – Resumo das implicações do princípio da correspondência elástico-viscoelástico e da teoria do trabalho potencial no equacionamento de materiais viscoelásticos com e sem dano

	Material Elástico	Material Viscoelástico
Sem Dano	$\sigma = E\varepsilon$	$\sigma = E_R\varepsilon^R$
Com Dano	$\sigma = C(S)\varepsilon$	$\sigma = C(S)\varepsilon^R$

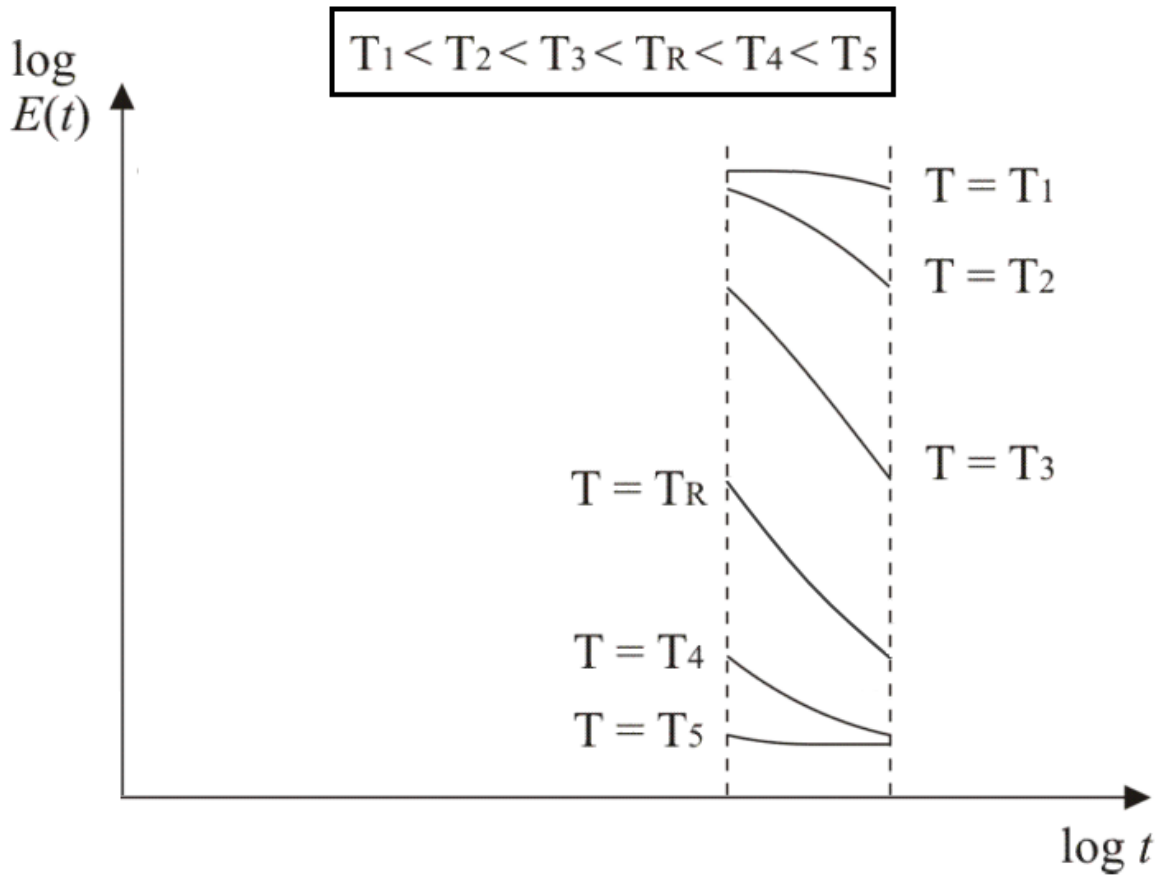
Fonte: o Autor (2018)

2.2.3.3 Princípio da Superposição tempo-Temperatura (t-TS)

O comportamento, assim como as propriedades, de misturas asfálticas são grandezas em geral dependentes tanto da temperatura quanto do tempo. Isto significa que devem ser esperados resultados diferentes em termos de performance de pavimentos com projetos semelhantes quando estes se encontram em locais com características térmicas ou de velocidade de tráfego distintas.

O princípio da superposição tempo-Temperatura propõe uma relação entre estas variações de comportamento em função da temperatura e da frequência de carregamento, de forma que se possa prever as características do material para qualquer conjunto temperatura-frequência a partir do conhecimento das propriedades desse material em uma temperatura e frequência de referência. Na prática, isto se determina a partir de um ensaio de alguma propriedade de interesse (como módulo de relaxação, por exemplo) com varredura de frequência e temperatura, conforme indicado na Figura 9.

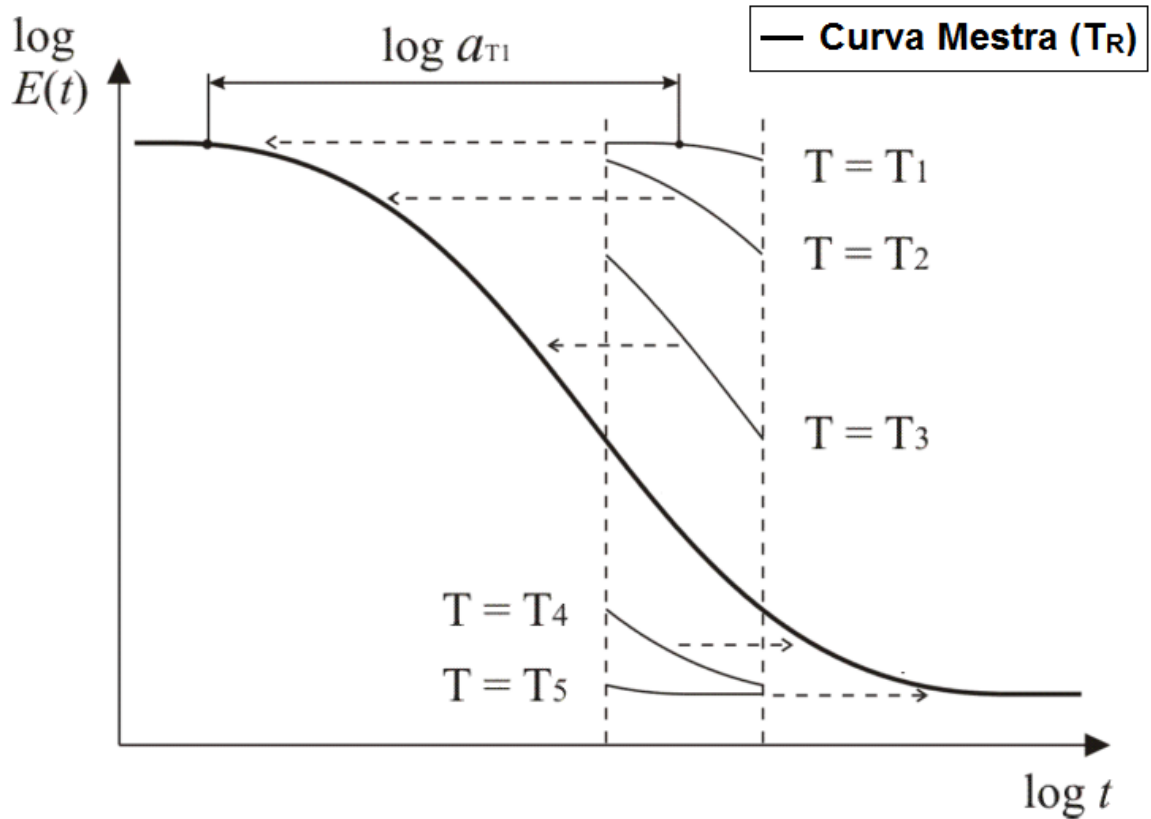
Figura 9 – Resultado teórico de ensaio módulo de relaxação com varredura de frequência para 6 temperaturas distintas e temperatura de referência T_R .



Fonte: adaptado de Souza (2005, p. 45)

Com a caracterização apresentada na Figura 9, para cada temperatura, multiplica-se o trecho por um fator a_{T_i} , denominado *shift-factor* daquela temperatura (T_i), tal que este seja capaz de fornecer continuidade na curva em relação às temperaturas adjacentes. A Figura 10 ilustra este procedimento.

Figura 10 – Processo gráfico de construção da curva mestra do módulo de relaxação para a temperatura de referência T_R no espaço log-log.



Fonte: adaptado de Souza (2005, p. 45)

Quando a translação de temperatura no espaço tempo é possível (como no caso da Figura 10), o material é classificado como Termoreologicamente Simples (TRS – “*Thermorheologically Simple*”) que, em outros termos, significa que os efeitos de frequência e temperatura em suas propriedades podem ser descritos através de um único parâmetro dado pela equação (17). Este é o caso de misturas asfálticas que se encontram em seu domínio viscoelástico linear (ASHOURI, 2014; KIM (Ed.), 2009; NASCIMENTO, 2015).

$$\xi = \int_0^t \frac{1}{a_T} dt \quad (17)$$

Onde: ξ = tempo reduzido [s]; t = tempo físico [s]; a_T = *shift-factor* [].

O comportamento do *shift-factor* (a_T) pode ser modelado através de diversas equações, conforme indica a proposta normativa AASHTO TP 107-14. Uma alternativa simplificadora deste processo é através de um modelo polinomial de segunda ordem, descrito pela Equação (18). Esta modelagem é utilizada para se estimar o valor do *shift-factor* em temperaturas diferentes daquelas em que o ensaio foi realizado, entretanto, restritas aos limites superiores e inferiores de temperatura ensaiados.

$$\log(a_T) = a_1.T^2 + a_2.T + a_3 \quad (18)$$

Onde: a_T = *Shift-factor* para a temperatura T []; a_i = constantes de calibração do modelo []; T = Temperatura do material [° C].

2.3 HEALING

Nesta sessão serão abordadas informações relevantes para a compreensão do efeito modelado neste estudo.

2.3.1 Definição

Tradicionalmente, a capacidade de *healing* de misturas asfálticas (e de outros materiais que a possuem) é mencionada para descrever uma recuperação intrínseca de propriedades dos materiais que foram modificados a partir de solicitações que danificaram a estrutura do material. Conforme Wool (2008):

Materiais com a capacidade de *self-healing* são polímeros, metais, cerâmicas e seus compósitos que, quando danificados por solicitações térmicas, mecânicas, balísticas ou outras, possuem a habilidade de regenerar e recuperar o material ao seu estado original de propriedades. (2008, p. 400, tradução nossa)

Qiu (2012) apresenta uma definição semelhante para materiais que apresentam *self-healing*:

Normalmente, as propriedades dos materiais são degradadas com o tempo, devido à introdução de dano (como micro trincamento) em escala microscópica que tende a crescer e levar ultimamente à falha do material. Um material com *self-healing* é um material com a habilidade intrínseca de regenerar (parcialmente) o dano que ocorre durante sua vida de serviço. (QIU, 2012, p. 12, tradução nossa)

E, para materiais asfálticos em particular, acrescenta:

A recuperação de rigidez do material, a extensão da vida de fadiga e a recuperação da resistência foi identificada pela primeira vez na década de 1960 em um ensaio de fadiga com períodos de repouso (1967, Bazin; 1970, Raithby; 1972, Van Dijk; 1979, Francken). Desde então, essa é a definição do fenômeno de *self-healing* para materiais asfálticos, ou seja, a recuperação das propriedades no material e redução de trincas (QIU, 2012, p. 12, tradução nossa)

Embora aparentemente simples, estas definições apresentam algumas particularidades que podem levar, erroneamente, à interpretação de ocorrência deste efeito. Existem outros fenômenos, de manifestação transitória, que possuem consequências semelhantes nas propriedades do material (AYAR; MORENO-NAVARRO; RUBIO-GÁMEZ, 2016; BABADOPULOS, 2017; MANGIAFICO, 2014). Ayar, Moreno-Navarro e Rubio-Gámez (2016) esclarece:

Ponto chave, na maioria dos estudos não salientado, é que a capacidade de regeneração de materiais asfálticos se refere apenas a minimização de micro trincas e eventual recuperação parcial de propriedades. Subsequentemente, todos os tipos de recuperação de propriedades em materiais asfálticos não devem ser considerados como um processo de regeneração. (2016, p. 29, tradução nossa)

Estes autores estão se referindo a fenômenos transitórios de natureza dissipativa, estudados por Babadopulos (2017) através de módulo de Young axial complexo (E^*) e módulo complexo de cisalhamento (G^*):

Os efeitos de diferentes fenômenos - não-linearidade, tixotropia, auto aquecimento, dano - produzem alterações nos parâmetros medidos (E^* e G^*). Portanto, medindo-se estas propriedades do material se torna possível avaliar o efeito destes diferentes fenômenos (BABADOPULOS, 2017, p. 12, tradução nossa).

Estes efeitos são manifestações intrínsecas de efeito não permanente que não colaboram, portanto, para uma extensão na vida de fadiga do material, de forma que Ayar, Moreno-Navarro e Rubio-Gámez (2016, p. 29, tradução nossa) reforçam que “[...] fenômenos recuperáveis não contribuem com o prolongamento da vida útil de pavimentos asfálticos havendo uma forte necessidade de diferenciar a recuperação real da recuperação originada por respostas viscoelásticas intrínsecas.”

Os mecanismos que governam os processos de *self-healing* em materiais asfálticos são pouco claros, deixando em aberto uma definição formal do efeito (AYAR; MORENO-NAVARRO; RUBIO-GÁMEZ, 2016; QIU; VAN DE VEN; MOLENAAR, 2013). Ainda assim, sabe-se que

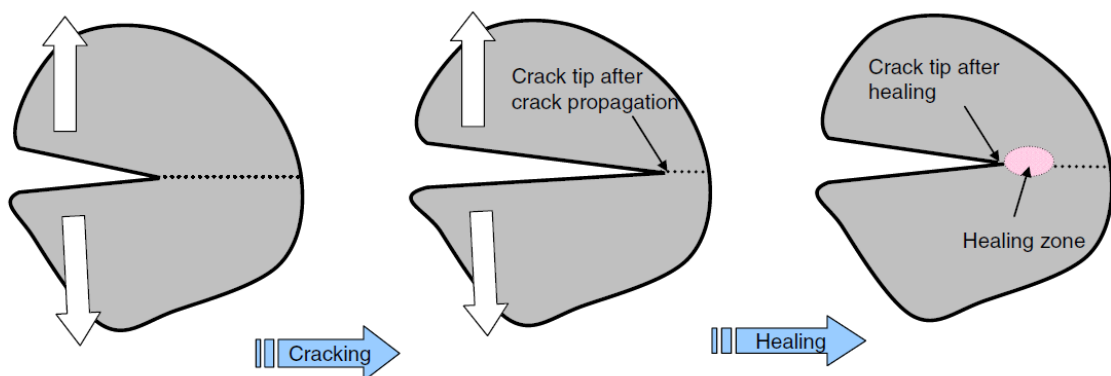
este fenômeno atua no fechamento de trincas de pequenas dimensões, denominadas “micro trincas”. É nesta etapa, de pequeno afastamento entre interfaces de uma trinca que a regeneração se manifesta, reaproximando as superfícies e levando o material a se aproximar de suas características prévias ao dano. Este processo acontece quando as solicitações que geram as trincas são interrompidas e o material se encontra em uma etapa denominada período de repouso.

Qiu, Van de Ven e Molenaar (2013) apresentam a seguinte descrição de self-healing:

Durante o processo de trincamento, a trinca se propaga devido a repetição de carga e outros efeitos. Quando a carga é removida e um período de repouso é aplicado, a trinca é submetida a regeneração. Hipoteticamente, o processo de regeneração pode ser tratado como o processo reverso do trincamento. Para diferentes períodos de regeneração e diferentes temperaturas de regeneração, o self-healing pode ser visto como um processo de recuperação de fissuras, que diminui as dimensões da trinca em uma zona de regeneração (QIU; VAN DE VEN; MOLENAAR, 2013, p. 864, tradução nossa).

A Figura 11 apresenta uma representação esquemática do processo de propagação de uma trinca e do consequente processo de regeneração que ocorre nesta trinca, com a regeneração limitada à denominada zona de regeneração.

Figura 11 – Hipótese do processo de fechamento de trincas

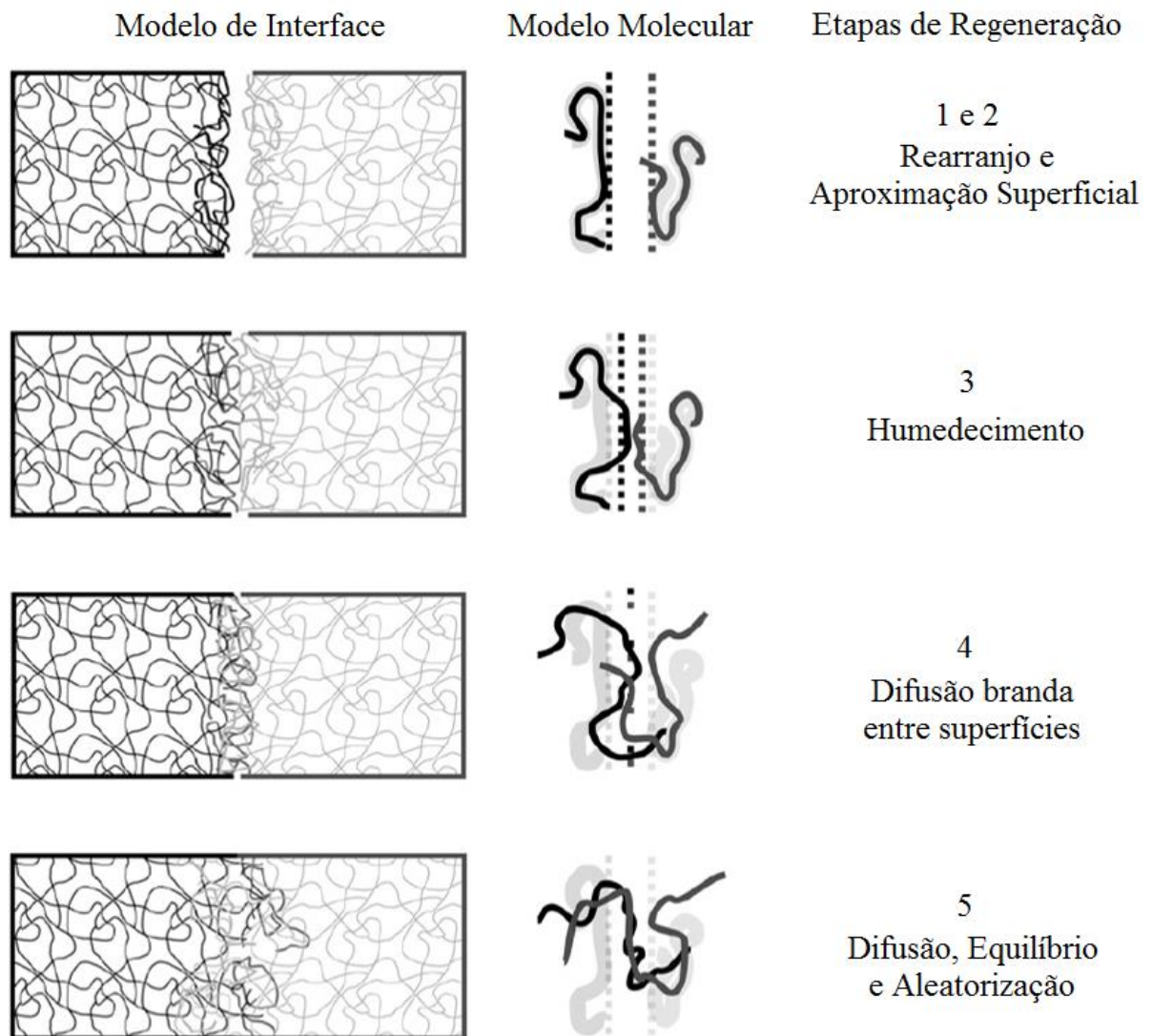


Fonte: Qiu, Van de Ven e Molenaar (2013, p. 865)

Embora o processo de fechamento de trincas possa ser visto desta maneira simplificada, outros autores oferecem uma descrição mais detalhada deste processo, dividindo-o em cinco etapas

sequenciais, representados na Figura 12, que descrevem os processos de regeneração de trincas e do dano em nível microscópico.

Figura 12 – Detalhamento do processo de fechamento de trincas em material asfáltico



Fonte: adaptado de Qiu (2012, p. 37)

2.3.1.1 Rearranjo superficial (“*Surface Rearrangement*”)

Quando o processo de dano/trincamento é iniciado, desenvolvem-se superfícies devido a separação do material. Estas superfícies possuem características próprias de rugosidade e

forma, que podem variar de acordo com as condições de temperatura e solicitações. Conforme essas condições se modificam (ou não), estas superfícies de fratura se rearranjam em nível molecular tendo consequências na capacidade de regeneração do material. Quando este processo está ocorrendo, diz-se que o material se encontra na etapa de rearranjo superficial. Nesta etapa, reações químicas, como oxidação, podem ocorrer causando também consequências na capacidade de regeneração do material

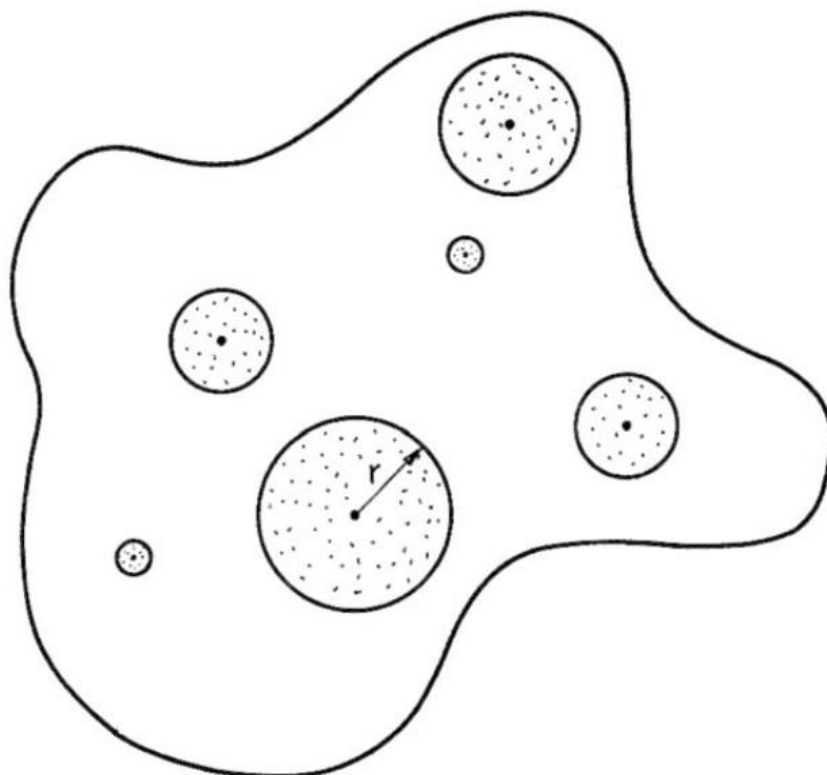
2.3.1.2 Aproximação superficial (“*Surface Approach*”):

Como o nome sugere, nesta etapa ocorre a aproximação das superfícies originadas pelo dano/trincamento sendo assim uma etapa crucial para o desenvolvimento do processo de *self-healing*, que ocorre unicamente entre superfícies que estiverem em contato. Embora em laboratório as condições de reaproximação de superfícies que definem uma trinca (de grandes ou pequenas dimensões) possam ser controladas a partir de determinadas condições de tensão programadas por ensaio, este é um evento de difícil previsão uma vez que, por exemplo, detritos desagregados no processo de trincamento poderiam se colocar entre as superfícies impedindo que o fluido responsável pelo fechamento da trinca atue.

2.3.1.3 Humedecimento (“*Wetting*”)

Por vezes, o processo de *self-healing* ocorre em materiais compostos por dois ou mais materiais. Não necessariamente os materiais constituintes do compósito final devem apresentar propriedades regenerativas para que o material como um todo apresente esta capacidade. É o caso, por exemplo, de misturas asfálticas, onde a capacidade de *self-healing* é exclusiva do ligante asfáltico e os agregados pétreos não manifestam esta capacidade. A recuperação de propriedades como resistência e rigidez só inicia quando o material com propriedades regenerativas de uma das superfícies começa a permear a superfície oposta. Este processo, denominado “Humedecimento” (tradução direta do termo em inglês “*Wetting*”), inicia de maneira aleatória nas superfícies em contato e inicialmente em pequenas dimensões. Sua evolução depende das características do material e do tempo de exposição entre as superfícies até que as regiões coalesçam e ocupem toda a superfície possível. A Figura 13 apresenta um esquema do processo de humedecimento em um determinado momento.

Figura 13 – Esquema do processo de humedecimento em uma região de interface polímero-polímero. As regiões sombreadas indicam zonas permeadas de raio r que deve crescer com a evolução do tempo.



Fonte: adaptado de Wool (2008, p. 406)

A literatura indica que embora a recuperação de propriedades inicie nesta etapa, este efeito não é muito pronunciado, tendo maior intensidade na etapa de difusão. Entretanto, esta etapa é responsável pela velocidade com que a recuperação de propriedades desenvolvida na etapa de difusão irá ocorrer. Nas palavras de Wool (2008) que verificou este efeito em polímeros:

Na ausência de difusão na interface polímero-polímero, o processo de humedecimento recupera pouca resistência do material. Contudo, para a recomposição da matriz polimérica em um substrato sólido, como uma fibra composta, a etapa de humedecimento determina a taxa de evolução do ganho de resistência, em conjunto com a etapa de rearranjo superficial de grupos adesivos (WOOL, 2008, p. 407, tradução nossa).

2.3.1.4 Difusão (“*Diffusion*”);

Durante a etapa de *Wetting*, surge o contato entre as superfícies da fissura no qual as cadeias moleculares que formam a coesão do material permanecem restritas e limitadas pela superfície

de ruptura. Uma vez que este contato seja realizado, estas cadeias moleculares iniciam o processo de difusão no qual, aleatoriamente, ultrapassam a interface de ruptura fazendo com que esta comece a deixar de existir. Este é um processo gradual, onde o ganho de resistência e rigidez se torna progressivamente mais significativo, conforme as diversas cadeias que compõem o material ultrapassam a região onde existia a interface.

É importante ressaltar, que este ganho de resistência se manifesta em termos de tração, de forma que eventuais esforços de compressão na região trincada iriam apenas aumentar (se possível) o contato entre as superfícies, não solicitando as cadeias moleculares no sentido de romper as ligações em formação. Wool (2008) indica que tensões de maior intensidade também podem “mascarar” o nível atual de regeneração do material:

É importante destacar que se as tensões solicitantes aumentam ao ponto que rupturas aleatórias da rede estrutural do material começam a dominar o processo de deformação, ao invés da separação das cadeias, então a regeneração da trinca irá parecer completa, independentemente da extensão do processo de difusão. Isto ocorre quando as taxas de carregamento forem elevadas e as menores cadeias não se separam e as rupturas de ligação permeiam a interface, rompendo ambas as cadeias menores e as cadeias matriciais (Wool, 2008, p. 407, tradução nossa).

2.3.1.5 Aleatorização (“*Randomization*”).

Nesta etapa final do *self-healing*, as cadeias e ligações formadas durante a difusão se posicionam aleatoriamente na estrutura do material e, segundo Wool e O’connor (1981), “A etapa de aleatorização envolve completa perda de memória da interface de fissura” (WOOL; O’CONNOR, 1981, p. 5982, tradução nossa), indicando que ao final deste processo, qualquer resquício de existência de trinca deixa de existir na estrutura do material.

Estas etapas foram propostas por Wool e O’Connor em 1981 de forma que Wool (2008) conclui:

Esta aproximação (em cinco etapas), se provou bem-sucedida em separar as multi-convolucionadas dependências do tempo dos diferentes mecanismos que controlam a regeneração de trincas e seus consequentes processos moleculares (WOOL, 2008, p. 405, tradução nossa).

2.3.2 Características que afetam o *Healing*

Assim como outras características das misturas asfálticas, incluindo número de ciclos até a falha (estrutural ou funcional), resistência à deformação permanente e resistência à fadiga, a capacidade de regeneração de um pavimento ou de uma mistura é dependente de uma série de fatores que influenciam individualmente e em conjunto a capacidade total de regeneração de uma determinada mistura asfáltica. Estes fatores podem ser separados em fatores internos – aqueles que fazem parte das características da mistura – e fatores externos – aqueles que fazem parte das condições de serviço ou carregamento (AYAR; MORENO-NAVARRO; RUBIO-GÁMEZ, 2016; QIU, 2012).

2.3.2.1 Fatores Internos

Ayar, Moreno-Navarro e Rubio-Gámez (2016) separam de maneira generalizada os fatores internos em três subgrupos que permitem o esclarecimento do efeito das propriedades de cada um destes subgrupos no efeito global da mistura de maneira neutra a respeito dos fatores externos. Esta abordagem se mostra adequada em termos de organização.

2.3.2.1.1 Características do ligante asfáltico

Diversos autores (ASHOURI, 2014; LV et al., 2017; QIU, 2012b) sugerem que o ligante asfáltico representa um dos papéis mais importante dentre as características do material, frente àquilo que diz respeito a capacidade de regeneração. Por este motivo, muitas das pesquisas que envolvem o estudo da regeneração de pavimentos se preocupam com a caracterização desta propriedade em nível de ligante asfáltico u mastique (DAI; WANG; HASAN, 2013; GARCIA et al., 2012; HUANG; LV; XIAO, 2016; LV et al., 2017; PANG et al., 2012; PLANCHE, 2003; QIU, 2014; SHEN; CHIU; HUANG, 2010; TAN et al., 2012; TANG et al., 2016).

Por sua vez, as propriedades do ligante asfáltico que influenciam o potencial regenerativo com maior relevância são as seguintes:

- Rigidez: ligantes asfálticos com menor rigidez apresentam tendência a terem melhor desempenho em termos de recuperação de propriedades por healing AYAR; MORENO-NAVARRO; RUBIO-GÁMEZ, 2016; QIU, 2012);

- Penetração: ligantes asfálticos com menor resistência à penetração possuem melhores resultados de healing;
- Viscosidade: ligantes asfálticos menos viscosos são capazes de fluir mais facilmente entre trincas, otimizando o efeito de healing. Autores como Dai, Wang e Hasan (2013), Garcia et al. (2014), Gomez-Meijide et al. (2016), Liu et al. (2011), Liu et al. (2012), Liu, Wu e Schlangen (2013) e Norambuena-Contreras e Garcia (2016) exploram esta característica, aumentando a temperatura de misturas asfálticas e reduzindo a viscosidade do ligante asfáltico da composição. Esta técnica utiliza fibras metálicas para um aquecimento por indução magnética localizada, a fim de potencializar a capacidade de regeneração em pavimentos;
- Composição química: Little et al. (1999), explorando as características químicas dos ligantes asfálticos, sustenta que compostos com baixo conteúdo anfotérico (comportamento dual de ácido ou base, dependendo das substâncias em contato) e alto conteúdo aromático (hidrocarbonetos com anéis benzênicos) tem melhor comportamento regenerativo;
- Envelhecimento/oxidação: Zhang, Yu e Wu (2012) sustentam que o ligante asfáltico também é suscetível ao efeito de envelhecimento, presente em diversos compostos orgânicos. O envelhecimento em ligantes asfálticos ocorre por oxidação que tende a tornar as amostras mais rígidas em relação a amostras virgens, piorando a capacidade de regeneração (LITTLE et al.,1999). Contraditoriamente, o estudo apresentado por Van Den Bergh (2011) indica que amostras de concreto asfáltico envelhecidas em laboratório apresentaram resultados de regeneração superiores a amostras virgens da mesma mistura, enquanto amostras envelhecidas em campo apresentam resultados de regeneração prejudicados, conforme a previsão de Little et al. (1999), indicando uma possível falha no processo de envelhecimento em laboratório.

2.3.2.1.2 *Características da mistura asfáltica*

Uma vez que as frações minerais não possuem capacidade de regeneração, esta propriedade em misturas asfálticas é oriunda puramente do ligante asfáltico. Neste ponto, pode-se intuir que misturas com maior teor de ligante e que proporcionem maior contato entre moléculas de ligante, serão misturas mais nobres quanto à propriedade de regeneração. De fato, Ayar,

Moreno-Navarro e Rubio-Gámez (2016), que realiza uma revisão do estado da arte sobre o tema, indicam, através dos trabalhos de Abo-Qudais e Suleiman (2005); Grant (2001); Kim e Roque (2006); Lee, Daniel e Kim (2000); Lee, Morrison e Hesp (1995); Luo (2012); Molenaar (2007) e Van Gooswiligen, de Hilster e Robertus, (1994) que:

- Teor de ligante: misturas com maior teor de ligante possuem maior taxa de regeneração;
- Tamanho de agregados: Misturas com maiores quantidades de agregado graúdo desenvolvem sua regeneração em velocidades maiores que misturas com maiores quantidades de agregado fino;
- Granulometria: Misturas do tipo SMA (“*Stone Matrix Asphalt*”) que possuem granulometria descontínua em algumas peneiras, promovendo maior contato entre agregados graúdos, apresentam resultados superiores de regeneração;
- Volume de Vazios: misturas com menor volume de vazios tem, melhor comportamento regenerativo, de forma independente das características da mistura – tipo de ligante, envelhecimento e temperatura.

2.3.2.1.3 *Uso de aditivos ou modificadores*

Conscientes dos benefícios oriundos do uso de materiais que originalmente não fazem parte de misturas asfálticas, autores como Canestrari (2015); García et al. (2013); Kim (2006); Lee, Daniel e Kim (2000); Little (1999); Newman (2004) Qiu (2012b); Shen e Carpenter (2007), entre outros, realizaram estudos a fim de caracterizar o efeito do uso destes materiais modificadores na capacidade de regeneração das misturas. Dentre os materiais avaliados pelos autores citados, encontram-se polímeros, cales e cápsulas com agentes rejuvenescedores e seus efeitos são os seguintes:

- Polímeros: os dois principais tipos de polímeros que constam na literatura consultada são os polímeros do tipo Borracha de Butadieno Estireno (SBR – “*Styrene Butadiene Rubber*”) e Estireno Butadieno Estireno (SBS – “*Styrene Butadiene Styrene*”). O efeito do polímero SBR estudado por Lee, Daniel e Kim (2000) é positivo em termos de regeneração quando comparado a amostras sem este modificador. Quanto ao polímero do tipo SBS, existe contrassenso nas conclusões de estudos que correspondem ao seu

impacto quanto à capacidade de *healing*, onde autores como Canestrari (2015); Shen e Carpenter (2007); e Shen, Chiu e Huang (2010) indicam um efeito positivo do polímero naquilo que tange a capacidade de regeneração, enquanto autores como Little (1999) e Qiu (2012b) indicam uma redução na manifestação dos efeitos relacionados à recuperação de propriedades em misturas que utilizam este tipo de polímero (AYAR; MORENO-NAVARRO; RUBIO-GÁMEZ, 2016).

- Cal hidratada: Little (1999) e Si, Little e Lytton (2002b) indicam que, além dos benefícios do efeito da cal hidratada em propriedades como resistência à deformação permanente, resistência à tração, Módulo de Resiliência, coesão e envelhecimento de misturas asfálticas (BOCK, 2012), este tipo de aditivo também apresenta comportamento potencializador da capacidade de regeneração em misturas asfálticas.
- Cápsulas com agentes rejuvenescedores: dentro dos possíveis materiais a serem inseridos em misturas asfálticas, alguns autores (CHUNG et al. (2015); GARCIA; JELFS; AUSTIN, 2015; GARCÍA; SCHLANGEN; VAN DE VEN, 2011; SU; QIU; SCHLANGEN, 2013) exploram a inserção de cápsulas contendo agentes rejuvenescedores de ligante asfáltico (AYAR; MORENO-NAVARRO; RUBIO-GÁMEZ, 2016). Esta técnica conta com o rompimento destas cápsulas em determinado momento da vida útil de um pavimento, liberando o agente rejuvenescedor, de forma a reabilitar o ligante localmente diminuindo seu estado de oxidação, permitindo que este flua em direção às trincas próximas à região de influência do agente rejuvenescedor, efetivamente acentuando a capacidade de regeneração da mistura e recuperação de propriedades.

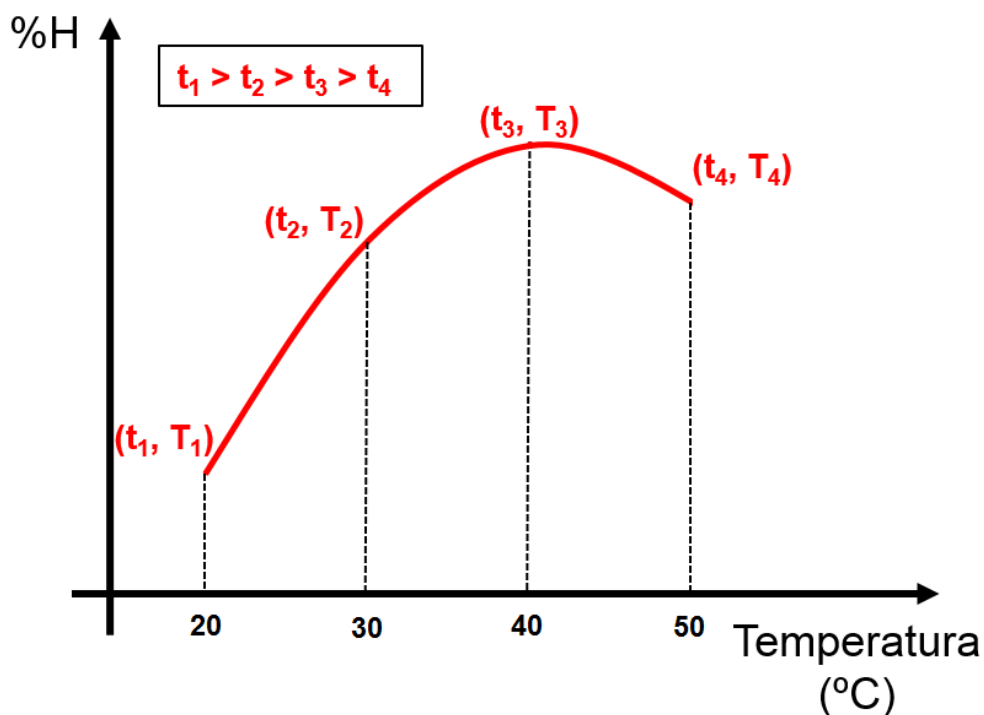
2.3.2.2 Fatores Externos

Os fatores externos de influência na capacidade de regeneração de materiais viscoelásticos, mais especificamente asfálticos, são aqueles que estão relacionados às condições de serviço e de solicitação, ou seja, independentes das características construtivas, mas que afetam intensificando ou atenuando o efeito regenerativo.

2.3.2.2.1 Temperatura

Possivelmente um dos fatores externos de maior influência, o efeito da temperatura é explorado por autores como Daniel e Kim (2001), Grant (2001), Kim e Roque (2006) e Tang et al. (2016) que, identificando a forte correlação entre temperatura e capacidade de regeneração de ligantes asfálticos e/ou misturas asfálticas, acordam que temperaturas maiores resultam em melhores resultados de regeneração. A Figura 14 apresenta o comportamento de regeneração para um determinado ligante dado através de uma taxa de regeneração (denotada por %H) em função da temperatura de aquecimento (T_i) por um tempo t_i (TANG et al., 2016).

Figura 14 – Comportamento em regeneração de uma amostra de ligante em função da temperatura (T_i) e do tempo de condicionamento (t_i)



Fonte: adaptado de Tang (2016, p. 1031)

A informação presente na Figura 14 encontra-se parcialmente completa, pois a capacidade de regeneração (neste caso denotada por %H) não é dependente somente da temperatura, mas também do tempo em que o material passa naquela temperatura (conforme será descrito na seção 2.3.2.2.2). O comportamento decrescente da capacidade de regeneração neste caso, após a temperatura T_3 no período t_3 sugere a possibilidade de aplicação do princípio da superposição tempo-Temperatura descrito na seção 2.2.3.3 para relações de regeneração.

2.3.2.2.2 *Período de Repouso*

Define-se período de repouso como o intervalo de tempo entre dois pulsos de solicitação no qual uma amostra é submetida a um carregamento nulo. Diversos autores (ASHOURI, 2014; BAZIN, 1967; BONNAURE, 1982; CASTRO; SÁNCHEZ, 2006; KIM, 2002; QIU, 2012; VAN DIJK, 1972) reconhecem que para maiores períodos de repouso, sem variações em outras condições de ensaio, a tendência é de resultados melhores na recuperação das propriedades originais dos materiais. Castro e Sánchez (2006) indicam ainda, que períodos de repouso superiores a dez vezes o período de carregamento tem significância decrescente em termos de prolongamento de vida de fadiga.

2.3.2.2.3 *Carregamento*

Em conjunto com as características do tipo de carregamento aplicado em amostras asfálticas, é importante verificar o estado de dano instantâneo em que o carregamento está sendo aplicado. Carregamentos de maior amplitude são responsáveis por maior acúmulo de dano em corpos asfálticos sendo assim mais prejudiciais à capacidade de regeneração que carregamentos com menor amplitude. Solicitações de tração são também responsáveis por maior acúmulo de dano, favorecendo a coalescência de trincas de pequenas dimensões em trincas de maiores dimensões e limitando o *healing* (LUO, 2012; QIU, 2012). Quanto à forma de onda do carregamento, (CASTRO; SÁNCHEZ, 2006) realiza uma comparação dos efeitos na regeneração com o período de repouso, indicando que a capacidade de recuperar as propriedades do material ao seu estado não danificado é mais sensível ao período de repouso que à forma de onda.

Neste ponto, é importante identificar que o estado presente de dano do material é responsável por uma grande parcela da efetividade de *healing*. Lembrando que este efeito se manifesta quando o trancamento do material se encontra em pequenas dimensões, corpos com menor quantidade de trincas apresentam melhor capacidade regenerativa que corpos mais danificados, quando estes são de mesma composição.

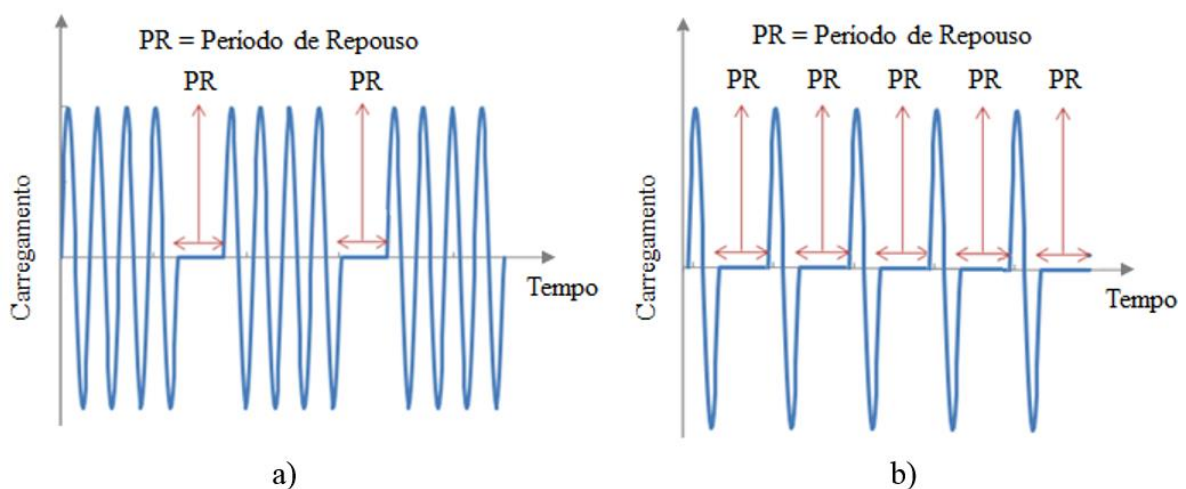
2.4 METODOLOGIAS RELEVANTES NA AVALIAÇÃO DAS RESPOSTAS A PERÍODOS DE REPOUSO

Ao longo das últimas décadas, o fenômeno de *healing* vem sendo estudado através de diversas metodologias que buscam, através de diferentes propriedades, parâmetros e ensaios, descrever este comportamento de forma a encontrar uma representação fiel ao fenômeno. Esta seção apresenta um apanhado das metodologias até o momento desenvolvidas, com o objetivo de estudar a capacidade de regeneração em materiais asfálticos.

Dentre os possíveis estudos da capacidade de regeneração, pode ser conveniente separar em grupos aqueles estudos realizados que tem características em comum. Uma das possíveis divisões, realizada por Qiu (2012) é pelo grupo de material asfáltico, ou seja, ensaios realizados em ligantes e mastiques, misturas asfálticas e/ou pavimentos.

Outra possível forma de separação de ensaios é através do tipo de período de repouso aplicado, que pode ser realizado de maneira intermitente em ensaios cíclicos, ou seja, após cada ciclo um pequeno período de repouso, ou de maneira intercalada onde os períodos de repouso são maiores, porém aplicados com menor frequência. Ashouri (2014) chama estes tipos de período de repouso de *Group-Rest* (para repouso intermitentes a grupos de carregamento - Figura 15.a) e *Pulse-Rest* (para repouso intercalados com cada ciclo de solicitação - Figura 15.b).

Figura 15 – a) Representação esquemática de repouso do tipo *Group-Rest*;
b) Representação esquemática de repouso do tipo *Pulse-Rest*



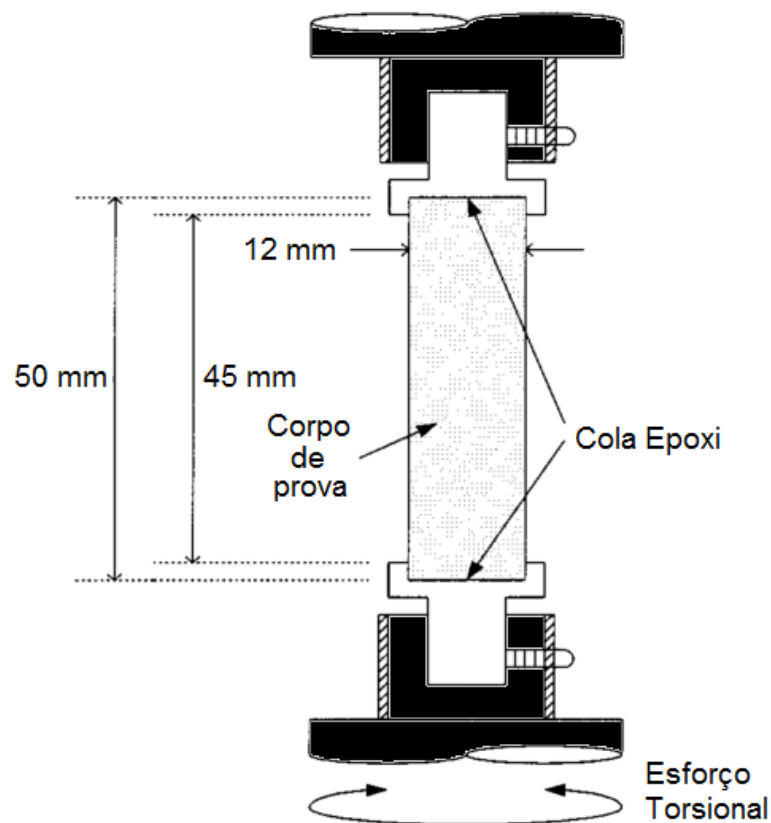
Fonte: adaptado de Ashouri (2014)

Nesta seção, entretanto, serão apresentados de maneira breve os principais ensaios utilizados para caracterização ou estudo de regeneração, identificando-os a respeito dos grupos citados anteriormente (tipo de material ou forma de repouso).

2.4.1 Cisalhamento Dinâmico

Este método, estudado por Kim, Daniel e Wen (2002), consiste na aplicação de um esforço torsional cíclico sob deformação controlada, em nível de mastic ou ligante asfáltico. As amostras fabricadas no estudo referenciado são amostras cilíndricas que, conforme Kim, Daniel e Wen (2002), difere de alguns estudos realizados anteriormente, por motivos de simplificação do estado de tensão e análise de dados. A Figura 16 indica o esquema de ensaio utilizado.

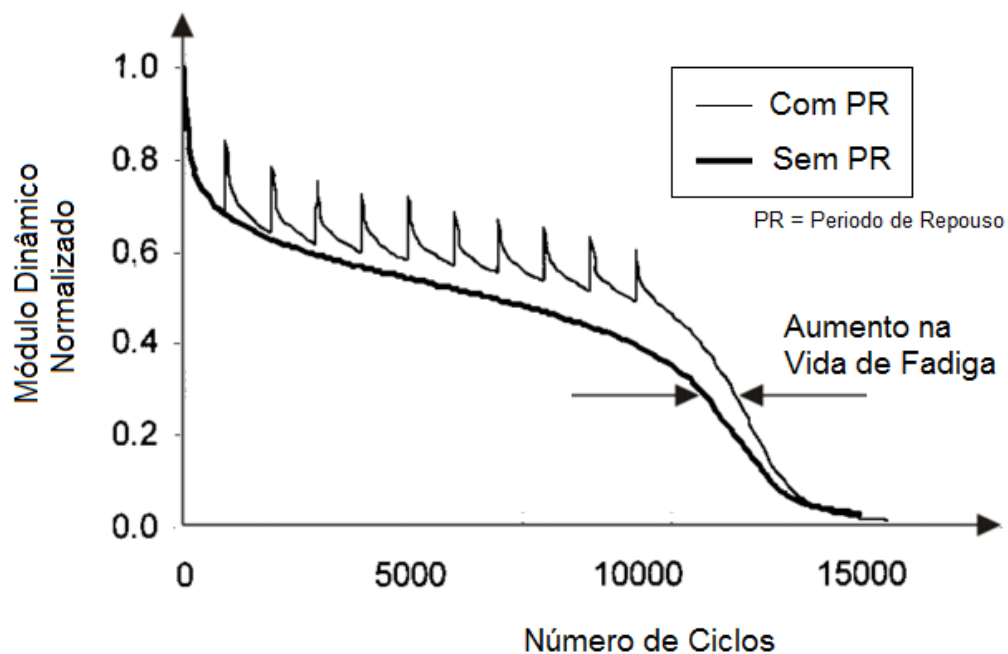
Figura 16 – Aparato utilizado para o ensaio de healing no Reômetro de Cisalhamento Dinâmico



Fonte: adaptado de Kim (2002, p. 77)

Neste ensaio foram aplicados períodos de repouso de dois minutos quando a amostra atingia um determinado nível de dano dado pela redução de percentual do critério de avaliação de dano. Os autores utilizaram três critérios como medidas para a avaliação de dano: 1) A pseudo rigidez da amostra; 2) O módulo dinâmico; 3) A energia de deformação dissipada, concluindo que os três parâmetros apresentam resultados suficientemente similares para utilização de qualquer um deles. A Figura 17 mostra o resultado deste ensaio para uma das amostras utilizadas.

Figura 17 – Resultado do comportamento à fadiga de uma amostra de mastique submetida a períodos de repouso em ensaio de cisalhamento torsional cíclico



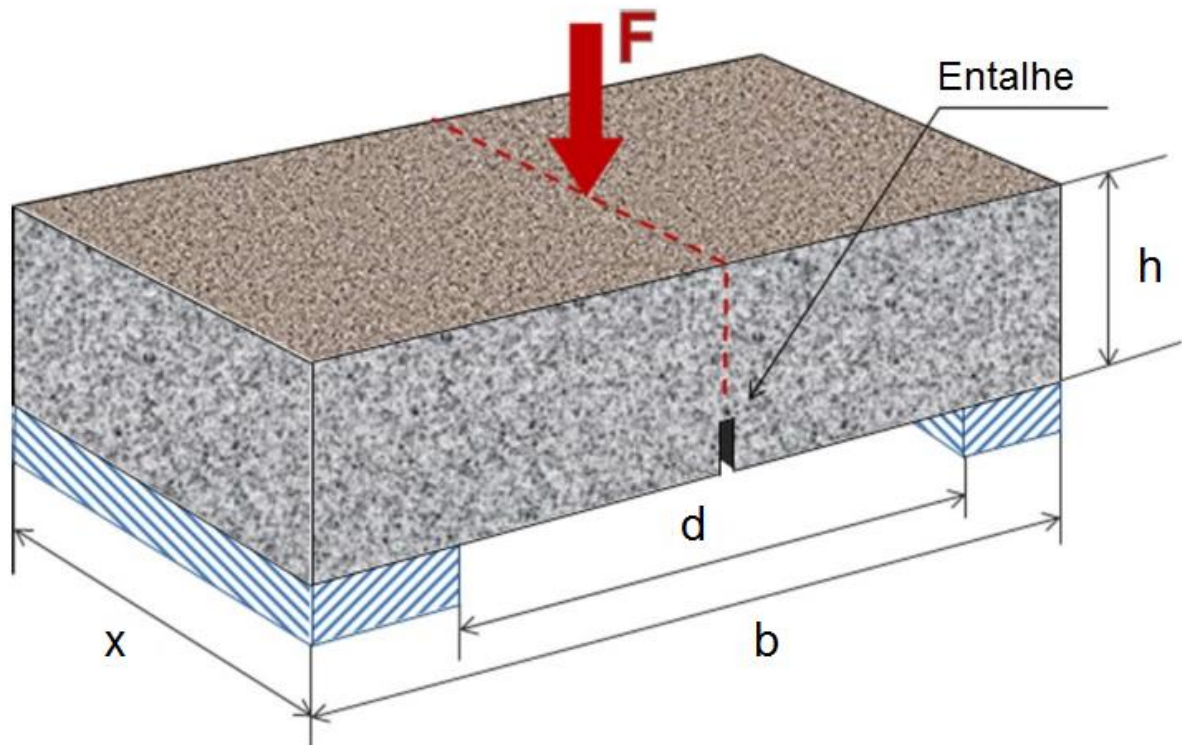
Fonte: adaptado de Kim (2002, p. 82)

2.4.2 Ensaio de Flexão à Três pontos

Castro e Sánchez (2006) e Norambuena-Contreras e Garcia (2016) são exemplos de autores que utilizaram a configuração de flexão a três pontos para avaliar a capacidade de regeneração de misturas asfálticas, embora os primeiros autores tenham utilizado carregamento cíclico em deformação controlada com períodos de repouso intermitentes em amostras retangulares e os segundos autores, carregamento monotônico em deformação controlada com período de repouso após o termino do carregamento em amostras semi-circulares. A Figura 18 indica

esquemáticamente o sistema de ensaio em amostras retangulares que podem ter diferentes dimensões.

Figura 18 – Modelo esquemático de montagem de ensaio para healing em flexão à três pontos



Fonte: adaptado de Gomez-Meijide (2016, p. 958)

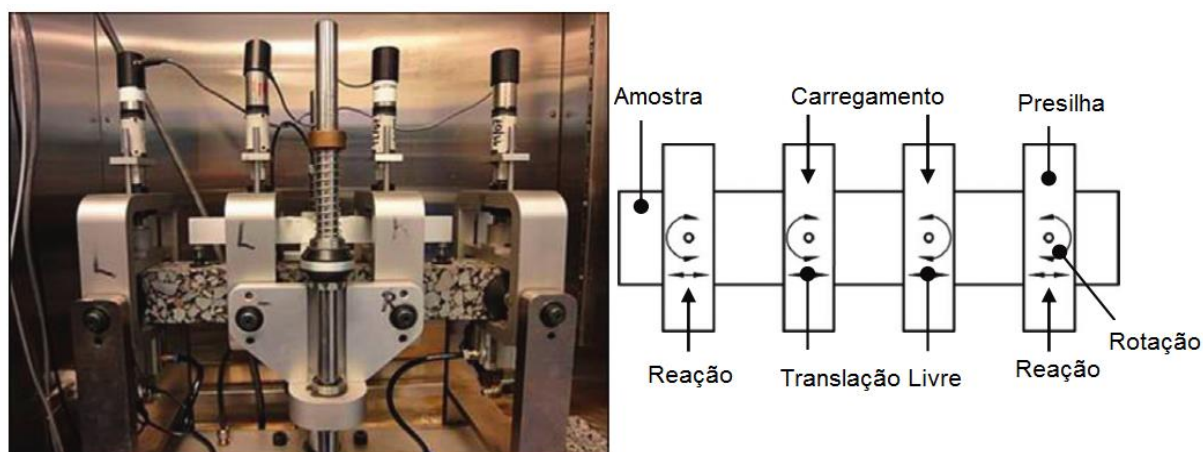
Neste ensaio realizado por diversos autores, quando em solicitações cíclicas, como utilizado por Castro e Sánchez (2006), a variável de controle utilizada para verificação da regeneração de propriedades é o módulo dinâmico. Já na configuração monotônica, Norambuena-Contreras e Garcia (2016) utilizam a resistência em termos de tensão oferecida pela amostra antes e após o efeito de regeneração.

2.4.3 Ensaio de Flexão à Quatro pontos

O ensaio de Flexão à Quatro Pontos é um ensaio mais sofisticado em termos de solicitações de tração do material que, por exemplo, o ensaio de Flexão à Três Pontos devido à sua geometria que permite esforços constantes nas fibras inferiores de uma vigota retangular, representando

com bastante fidelidade os esforços que ocorrem em um pavimento. Shen e colaboradores (2006) realizaram ensaios de fadiga em um equipamento de Flexão à Quatro Pontos em misturas asfálticas com e sem períodos de repouso, avaliando e caracterizando estas misturas a partir da energia dissipada. A

Figura 19 – Equipamento utilizado no ensaio de Flexão à Quatro Pontos com representação real e esquemática



Fonte: adaptado de Liu (2012, p. 405)

Outro estudo, realizado por Liu et al. (2012) embora com enfoque em *healing* induzido pelo aquecimento de fibras internas à matriz da mistura asfáltica, também utiliza o equipamento de Flexão à Quatro Pontos, utilizando carregamento cíclico com período de *healing* aplicado quando a rigidez à flexão do material cai a 50% do valor inicial. O critério de avaliação da capacidade de *healing* adotado por estes autores é uma relação entre a rigidez à flexão prévia à regeneração e após a regeneração.

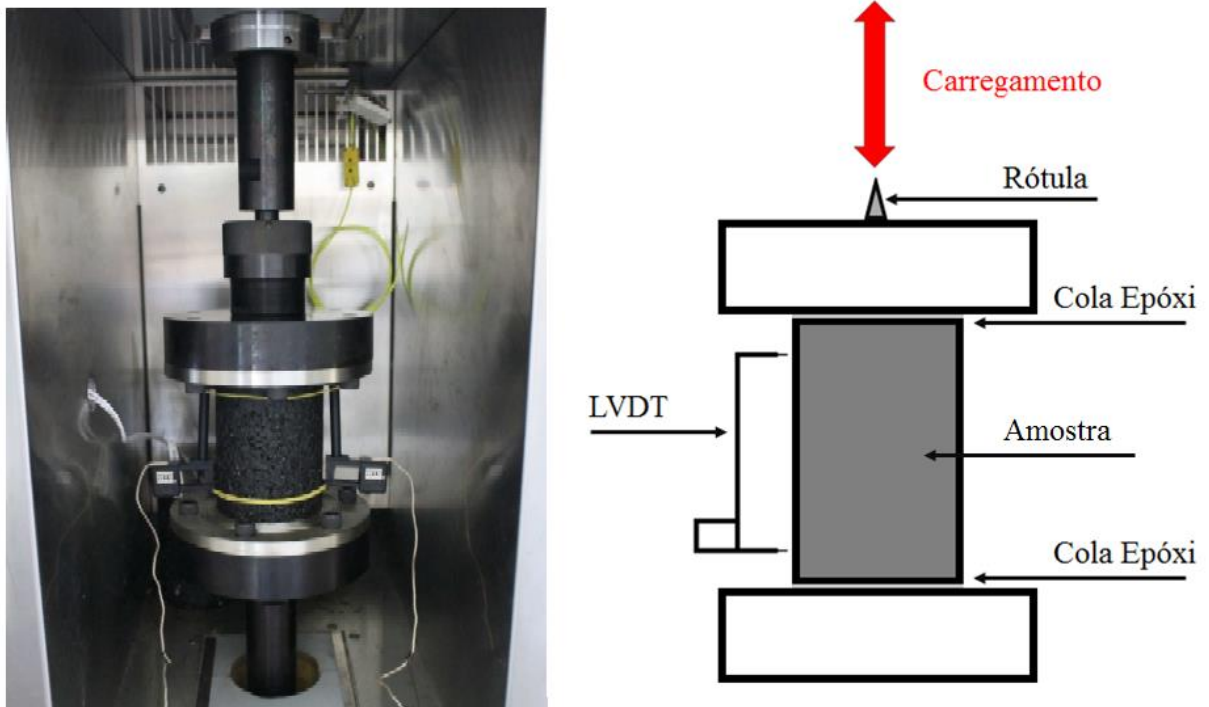
2.4.4 Ensaio de Fadiga à Tração Direta

Com uma proposta semelhante à do trabalho em desenvolvimento, Ashouri (2014) utiliza o ensaio de Fadiga à Tração Direta, para caracterizar através da mecânica do dano contínuo o comportamento regenerativo de misturas asfálticas submetidas à períodos de repouso em determinados estado de Integridade (C).

O ensaio de tração direta cíclico aplica ciclos de tração e compressão diretamente à amostra asfáltica. Isto é possível, pois as amostras são coladas com resina epóxi em placas que permitem

as solicitações axiais de tração de maneira direta. A Figura 20 ilustra a aparelhagem utilizada neste tipo de ensaio com uma imagem do equipamento utilizado para caracterização de misturas através do S-VECD no trabalho de Mocelin (2018) e uma representação esquemática do mesmo.

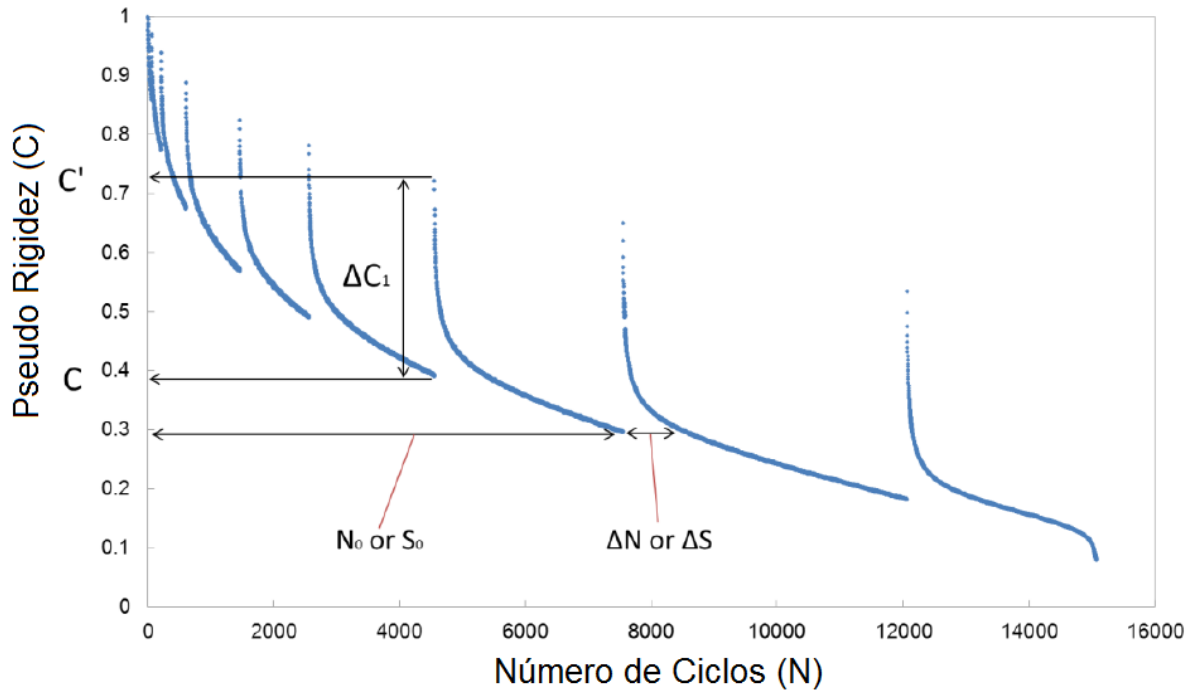
Figura 20 – Equipamento utilizado no ensaio de Fadiga à Tração Direta, com representação real e esquemática



Fonte: Adaptado de Mocelin (2018, p. 70)

No caso do trabalho de Ashouri (2014) foram estabelecidos alguns períodos de repouso à medida que a Integridade do material decrescia, verificando o efeito dos períodos de repouso no material no espaço C vs S e C vs N , conforme a Figura 21 apresenta.

Figura 21 – Resultado da aplicação de períodos de repouso em mistura asfáltica representados no espaço C vs N para fins de avaliação de *healing*



Fonte: Adaptado de Ashouri (2014, p. 72)

Neste caso, as descontinuidades das curvas, tanto em função do número de ciclos quanto em função do dano são consequência dos períodos de repouso aplicados. Este efeito permite a quantificação da capacidade de regeneração das misturas asfálticas, conforme será explorado futuramente neste trabalho.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta sessão, serão apresentadas as misturas estudadas e a metodologia empregada no ensaio aplicado. Também serão elucidadas as operações realizadas no tratamento dos dados para quantificação do efeito de regeneração a partir das curvas de dano característico de cada corpo de prova ensaiado.

3.1 MISTURAS AVALIADAS E PREPARAÇÃO DO ENSAIO

Os corpos de prova utilizados na presente pesquisa foram fabricados e ensaiados no Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES) da PETROBRAS, e tem suas características descritas na presente sessão. O Quadro 3 apresenta um resumo das principais características das misturas estudadas.

Quadro 3 – Características das misturas avaliadas

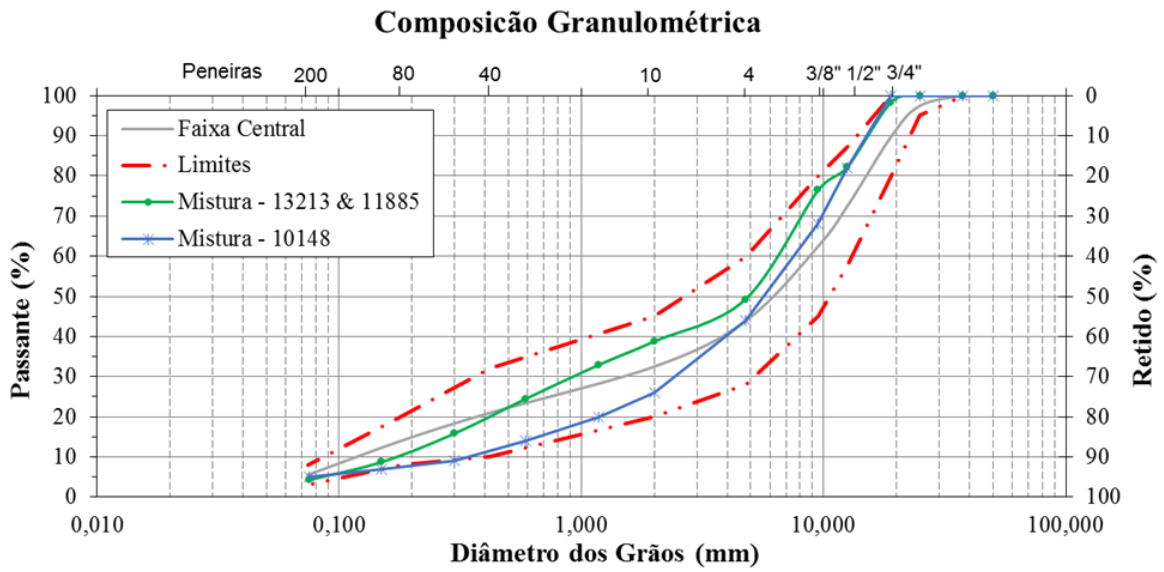
Mistura	Tipo de Agregado	NMAS* [mm]	Tipo de CAP	Teor de CAP [%]
10148	Granito	19,1	30/45	4,5
13213	Gnaisse	19,1	50/70	4,3
11885	Gnaisse	19,1	AMP** 60/85	4,4

*Tamanho máximo de agregado

**Asfalto Modificado por Polímero - Elvaloy

A composição granulométrica das misturas é apresentada na Figura 22 enquadrada dentro da Faixa B do DNIT, apresentada no Quadro 4. Observa-se que as misturas 13213 e 11885 utilizam o mesmo tipo e proporção de agregados e, portanto, são representadas pela mesma curva.

Figura 22 – Composição granulométrica das misturas avaliadas



PENEIRA [mm]	Mistura - 13213 & 11885		Mistura - 10148	
	% Retido	% Retido acumulado	% Retido	% Retido acumulado
50,00	0,00	0,00	0,00	0,00
37,50	0,00	0,00	0,00	0,00
25,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19,00	1,67	1,67	0,00	0,00
12,50	16,21	17,88	18,00	18,00
9,50	5,66	23,55	14,00	32,00
4,75	27,24	50,78	24,00	56,00
2,00	10,44	61,22	18,00	74,00
1,18	5,87	67,09	6,00	80,00
0,59	8,42	75,51	6,00	86,00
0,30	8,66	84,16	5,00	91,00
0,15	7,11	91,28	2,00	93,00
0,08	4,48	95,76	2,00	95,00

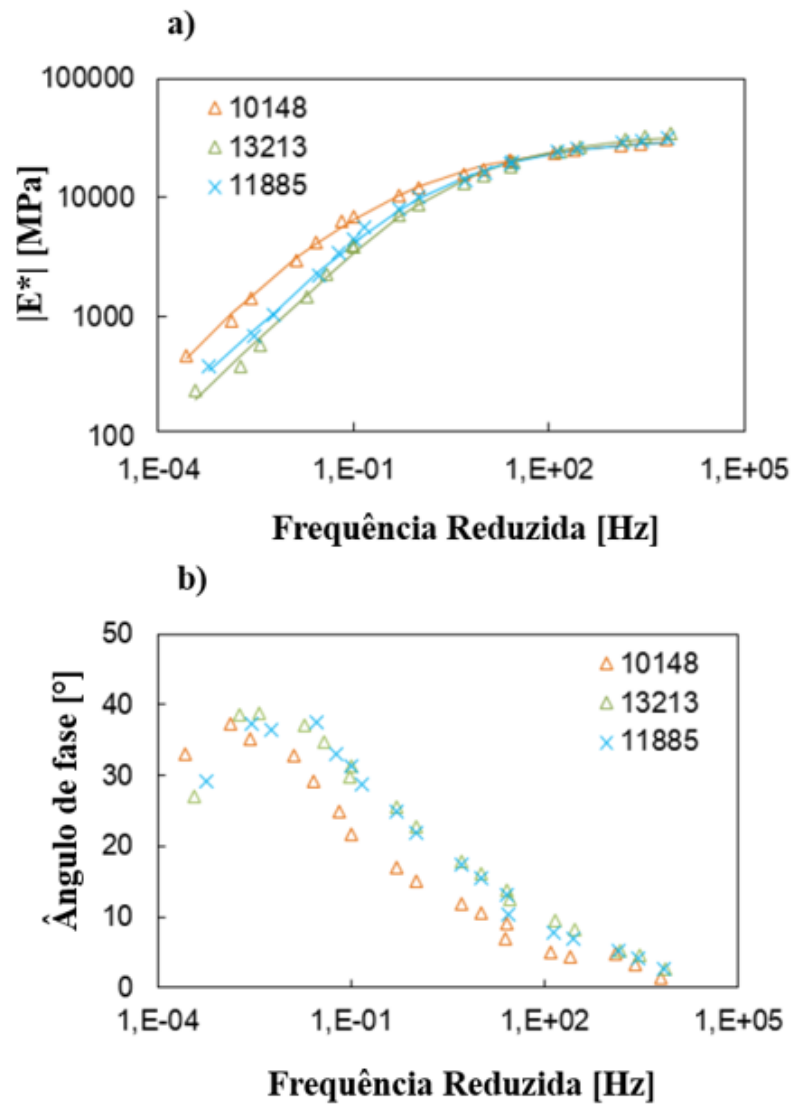
Fonte: o Autor (2018)

Quadro 4 – Limites da Faixa B do DNIT

FAIXA B DNIT			
PENEIRA [mm]	Limite Superior	Centro	Limite Inferior
50,800	100,0	100,0	100,0
38,100	100,0	100,0	100,0
25,000	100,0	97,5	95,0
19,100	100,0	90,0	80,0
12,700	87,6	73,0	58,4
9,500	80,0	62,5	45,0
4,800	60,0	44,0	28,0
2,000	45,0	32,5	20,0
0,420	32,0	21,0	10,0
0,180	20,0	14,0	8,0
0,074	8,0	5,5	3,0

Estas misturas tiveram sua caracterização linear viscoelástica (LVE) realizada através do ensaio de módulo dinâmico, adaptado da normativa americana AASHTO T-342. Os resultados desta caracterização são apresentados na Figura 23.

Figura 23 – Resultados do ensaio de módulo dinâmico para as misturas avakuadas.
 a) Módulo Dinâmico vs Frequência Reduzida para misturas caracterizadas;
 b) Ângulo de fase vs Frequência reduzida para misturas caracterizadas.



Fonte: o Autor (2018)

Estas informações podem ser traduzidas a partir da Equação (18) para modelagem do *shift-factor* para qualquer temperatura T e da Equação (19) (ajuste sigmoidal) para modelagem do módulo dinâmico para qualquer frequência reduzida.

$$\log(|E^*|) = \alpha + \frac{\beta}{1 + \frac{1}{e^{(\delta + \gamma \cdot \log(f_{red}))}}} \quad (19)$$

Onde: $|E^*|$ = Módulo complexo [MPa]; $\alpha, \beta, \delta, \gamma$ = constantes de calibração [];
 f_{red} = frequência reduzida [Hz].

As constantes de calibração de cada um dos parâmetros necessários para a descrição das propriedades LVEs são apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 – Parâmetros de modelagem das misturas estudadas.

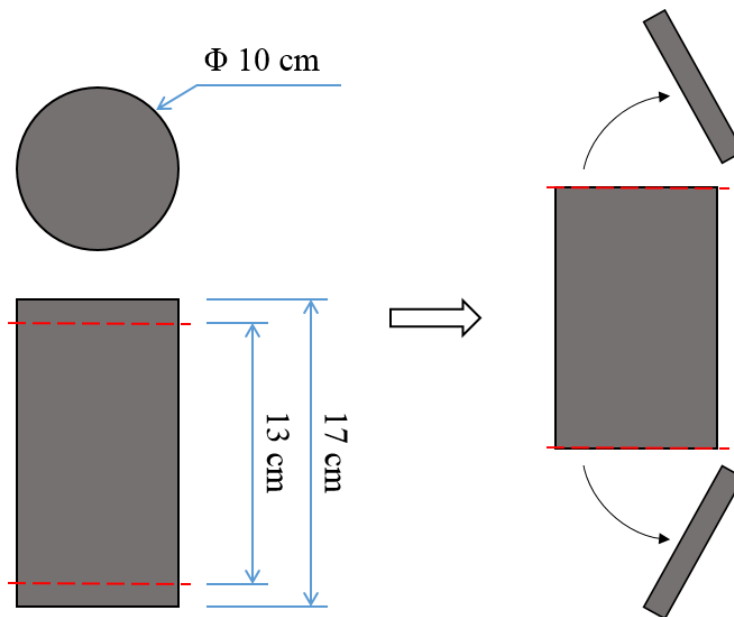
Mistura	SHIFT-FACTOR			AJUSTE SIGMOIDAL			
	a1	a2	a3	α	β	δ	γ
10148	5,66E-04	-1,63E-01	3,04E+00	1,300	3,200	1,870	0,639
13213	9,09E-04	-1,76E-01	3,16E+00	1,562	2,990	1,302	0,727
11885	1,10E-03	-1,78E-01	3,13E+00	1,845	2,663	1,363	0,772

Os corpos de prova são moldados com dimensões de 10 cm de diâmetro e 17 cm de altura.

Após a moldagem os corpos de prova passam pelas seguintes etapas prévias ao ensaio:

- Corte de 2 cm de topo e 2 cm de base, conforme indica a Figura 24. Este procedimento é realizado para obtenção de corpos de prova com maior homogeneidade na distribuição do volume de vazios (CHEHAB et.al., 2000; NASCIMENTO, 2015). Embora a proposta original de homogeneização de vazios também envolvesse a extração da região axial central em um determinado raio, Nascimento (2015) identifica que a distribuição do volume de vazios em torno do eixo axial de amostras cilíndricas é aproximadamente homogênea. Neste trabalho, portanto, não se realiza o procedimento de extração da região central dos corpos de prova.

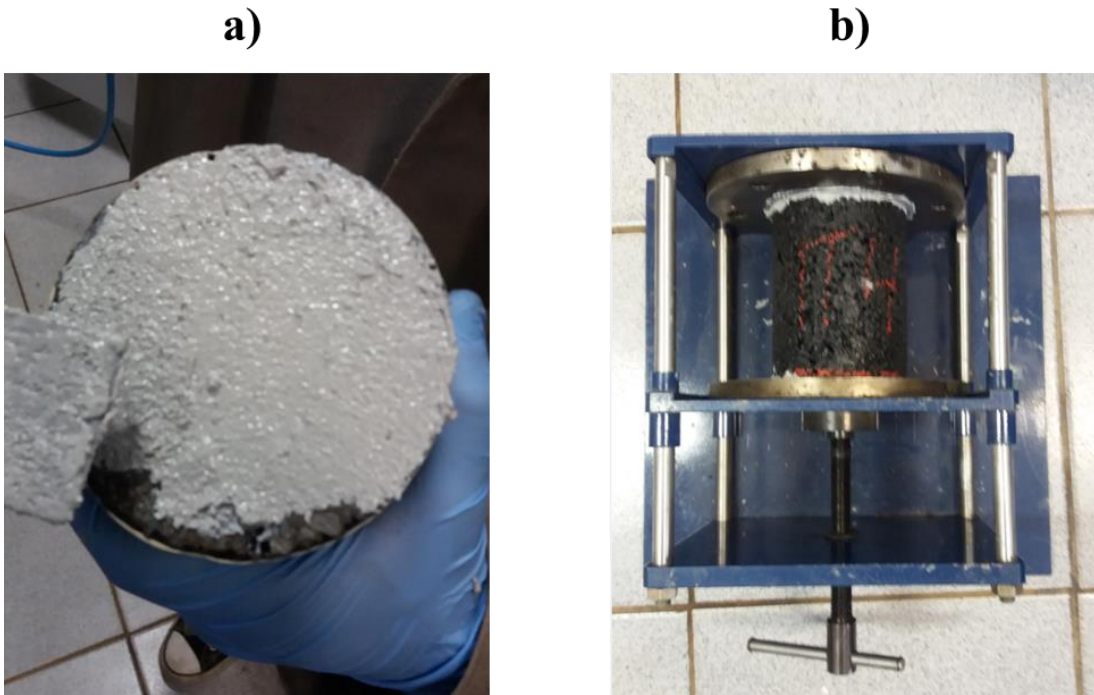
Figura 24 – Representação esquemática do procedimento de corte de topo e base dos corpos de prova.



Fonte: o Autor (2018)

- Colagem do corpo de prova nos pratos de ensaio com uso de cola epóxi de alta resistência cobrindo toda a superfície de topo e base do corpo de prova, conforme ilustra a Figura 25.a). Após aplicação da cola nas superfícies e colocadas em contato com os pratos de ensaio, procede-se à cura de 24h no gabarito, este processo é ilustrado na Figura 25.b).

Figura 25 – Processo de colagem dos corpos de prova.
a) Recobrimento da superfície com cola epóxi; b) Cura da cola por 24h em gabarito.



Fonte: o Autor (2018)

Após a cura, os corpos de prova devem ser condicionados à temperatura de ensaio por outras 24h, após as quais estarão aptos a serem acoplados à prensa e ensaiados. A Figura 26 apresenta um corpo de prova em sua configuração prévia ao ensaio, com extensômetros acoplados.

Figura 26 – Corpo de prova instalado em configuração prévia ao procedimento experimental.

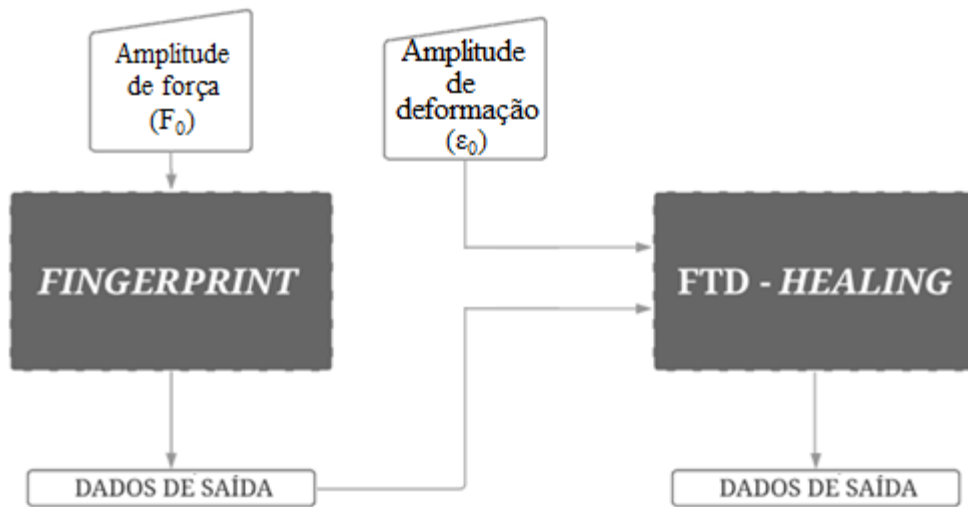


Fonte: cortesia CENPES (2018)

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O ensaio realizado no escopo deste trabalho é baseado no procedimento descrito na normativa AASHTO TP 107-14 que apresenta o processo experimental e os equipamentos necessários para a caracterização da curva de dano característica de corpos de prova de concreto asfáltico. O procedimento do ensaio adaptado é globalmente descrito pelo fluxograma da Figura 27, incluindo ambos os ensaios necessários para correta coleta de informações utilizadas neste trabalho.

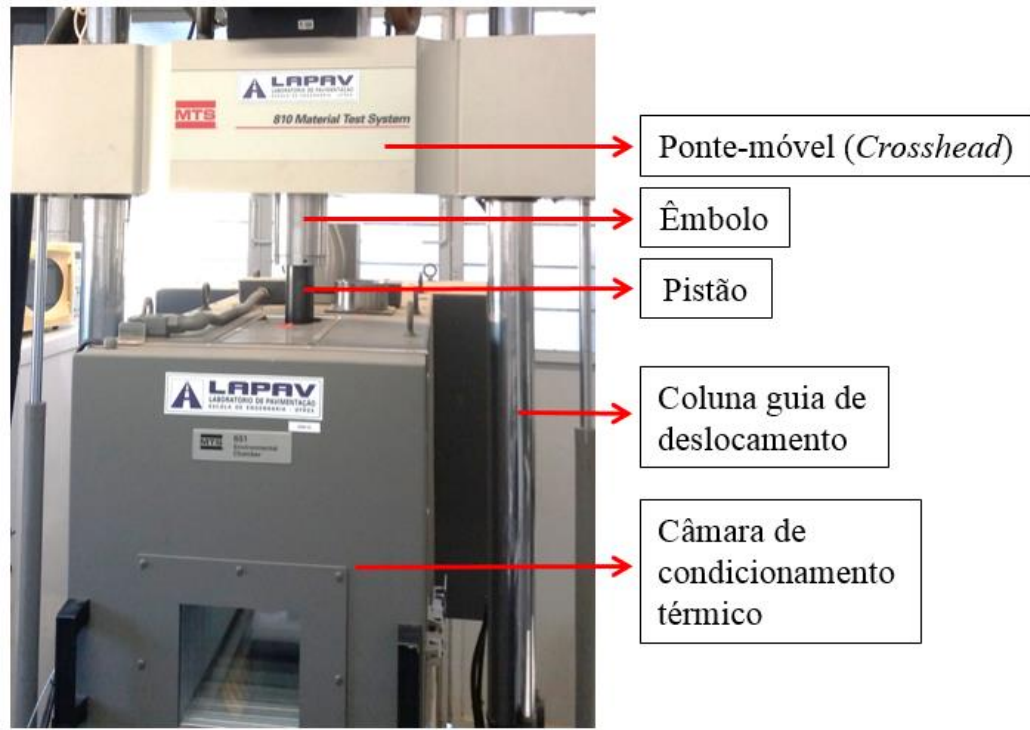
Figura 27 – Fluxograma de ensaios realizados para obtenção dos dados necessários de cada corpo de prova.



Fonte: o Autor (2018)

Embora os resultados utilizados na pesquisa foram produzidos nas instalações do CENPES/PETROBRAS, o protocolo foi instalado e executado com sucesso nas instalações do Laboratório de Pavimentação (LAPAV). Para tanto os ensaios foram executados em uma prensa hidráulica MTS © 810 UTM Test System (modelo 318.25) ilustrada na Figura 28, com realização sequencial dos ensaios *Fingerprint* e Fadiga à Tração Direta adaptado para regeneração (FTD – *Healing*).

Figura 28 – Modelo de prensa hidráulica utilizado - MTS © 810 UTM
Test System (modelo 318.25)



Fonte: o Autor (2018)

3.2.1 Ensaio Fingerprint

O ensaio denominado *Fingerprint* (FP), é um ensaio de caracterização inicial do corpo de prova a ser avaliado, no qual se aplicam 100 ciclos de tração/compressão com carregamento em tensão controlada e média zero, objetivando-se deformações entre 50 e 75 microstrains (domínio no qual a resposta do material não é alterada pelo efeito de dano (UNDERWOOD; BAEK; KIM, 2012). As respostas de deformação deste ensaio serão utilizadas no cálculo do chamado “*Dynamic Modulus Ratio*” (DMR) que normaliza os resultados dos ensaios quanto à variabilidade entre corpos de prova, dado pela equação (20).

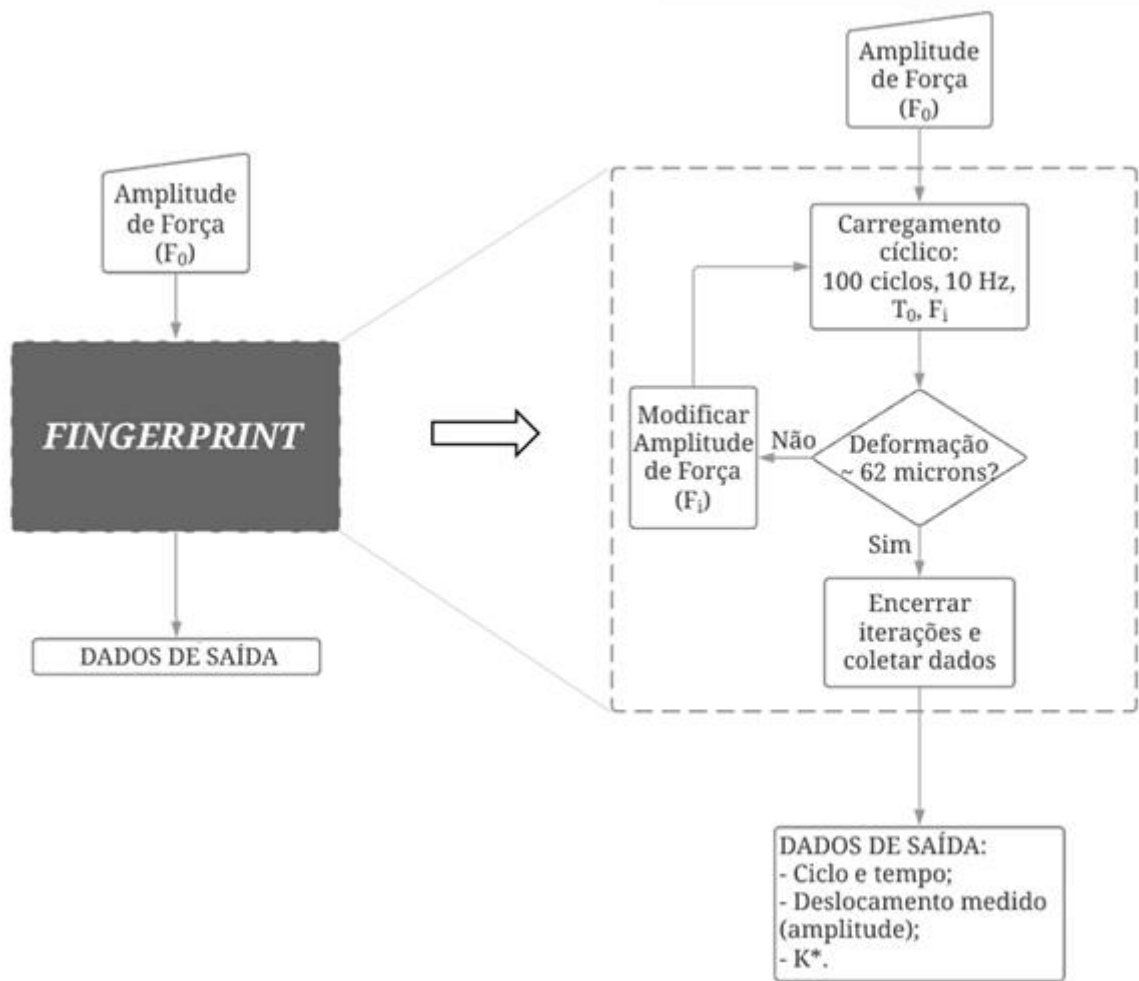
$$DMR = \frac{|E^*|_{fingerprint}}{|E^*|_{LVE}} \quad (20)$$

Onde $DMR = Dynamic Modulus Ratio$ []; $|E^*|_{fingerprint}$ = Módulo Dinâmico calculado no ensaio FP [MPa]; $|E^*|_{LVE}$ = Módulo Dinâmico Linear Viscoelástico calculado a partir dos coeficientes da série de Prony [MPa] (equação (21)).

$$|E^*|_{LVE} = \sqrt{\left(E_{\infty} + \sum \frac{E_i \cdot \rho_i^2 \cdot (2\pi f)^2}{\rho_i^2 \cdot (2\pi f)^2 + 1}\right)^2 + \left(\sum \frac{E_i \cdot \rho_i \cdot (2\pi f)}{\rho_i^2 \cdot (2\pi f)^2 + 1}\right)^2} \quad (21)$$

Onde E_{∞} = Módulo de Equilíbrio para longos períodos [MPa]; E_i = Coeficiente de Prony de módulo de relaxação [MPa]; ρ_i = Tempo de relaxação para o Módulo [s]; f = frequência de ensaio [Hz].

Como, a priori, a força necessária que resulte em uma deformação entre 50 e 75 microstrains é desconhecida, este é um ensaio iterativo que deve ser repetido com valores de *input* adaptados a partir do resultado anterior. Este procedimento é descrito pelo fluxograma apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Fluxograma do processo iterativo do ensaio *Fingerprint*.

Fonte: o Autor (2018)

Como este é um ensaio executado com a preocupação de que seja causado o menor dano possível ao corpo de prova, aconselha-se que o valor inicial de força aplicada (F_0) seja um valor relativamente baixo, a fim de não exceder o limite de 75 microstrains. Aconselha-se, para misturas convencionais – e.g., CAP 50/70 com granulometria Faixa C – um valor inicial da ordem de 2,5 kN.

A reiteração do processo pode ter a amplitude de força aplicada (F_i) pela equação (22) que tenta aproximar, através de uma proporção simples, a força necessária para gerar uma deformação de 62 microstrains (valor central da faixa aconselhada para nível de deformação deste ensaio).

$$F_i = k \cdot F_{i-1} \cdot \frac{62 \cdot 10^{-6}}{\varepsilon_{i-1}} \quad (22)$$

Onde F_i = Amplitude de força aplicada na i-ésima iteração [kN]; k = fator modificador de proporcionalidade []; ε_i = deformação medida quando da aplicação da força F_i [].

O fator redutor de proporcionalidade (k) é inserido conservadoramente nesta estimativa a fim de diminuir o incremento de força em misturas com comportamentos de maior não-linearidade. Aconselha-se, empiricamente, o valor unitário para misturas com comportamento próximo ao linear e para deformações iniciais ($\varepsilon_0 = f(F_0)$) entre 50 e 62 microstrains.

Além da utilização dos resultados deste ensaio no cálculo do DMR, calcula-se o parâmetro K^* , utilizado como uma medida de rigidez do material, dado pela equação (23).

$$K^* = \frac{F_{amp}}{d_{amp}} \quad (23)$$

Onde K^* = Parâmetro de rigidez [N/mm]; F_{amp} = amplitude do ciclo de força aplicada [N]; d_{amp} = amplitude do deslocamento medido [mm].

O valor médio de K^* obtido no ensaio FP será utilizado como parâmetro de entrada no ensaio adaptado de fadiga à tração direta utilizado no presente trabalho.

3.2.2 Ensaio FTD - *Healing*

Conforme mencionado anteriormente, a metodologia de ensaio utilizada neste estudo para a caracterização do efeito de regeneração viscoelástica é uma adaptação do procedimento de caracterização de fadiga à tração direta (AASHTO TP 107). Embora a literatura identifique que a regeneração viscoelástica ocorra mesmo durante carregamento, é no repouso que a manifestação deste efeito se dá de maneira mais evidente. Por este motivo, procede-se à inserção de períodos de repouso em meio aos ciclos de carregamento do ensaio de fadiga à tração direta.

Sabendo que a capacidade de regeneração em misturas asfálticas depende dos fatores apresentados na sessão 2.3.2 deste trabalho, optou-se por realizar um ensaio em que se controlam tais condições afim de explorar e, posteriormente, descrever o comportamento do material a partir destas. Sendo assim, o ensaio proposto tem como parâmetros modificadores da capacidade de regeneração as 3 seguintes variáveis:

- Temperatura (T);
- Período de repouso (PR);
- Estado atual de dano (S).

Variando-se estas condições esperam-se resultados capazes de descrever a capacidade de regeneração do material para qualquer combinação destes três parâmetros. Portanto a matriz experimental consiste na variação de: três temperaturas – 30° C, 20° C e 15° C –; três períodos de repouso – 270 s, 30 s e 10 s. A combinação destes critérios gera um total de 9 corpos de prova para uma caracterização. O estado atual de dano será o critério de aplicação dos períodos de repouso, medido através de um proporcional da rigidez do material (K^*) (apresentada na Equação (23)) que é proporcional à integridade do material (C) calculada através da Equação (24).

$$C = \frac{\sigma}{\varepsilon^R \cdot DMR} \quad (24)$$

Onde: C = Integridade []; σ = Tensão aplicada [MPa]; ε^R = Pseudo-deformação [MPa^{-1}]; DMR = Dynamic Modulus Ratio [].

Tomou-se como critério de aplicação dos períodos de repouso, quedas de 10% no valor inicial da integridade do material – C = 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; ...; 0,1 – interrompendo o carregamento cíclico e colocando o corpo de prova em uma tensão controlada de valor aproximadamente nulo (com ausência de tração e/ou compressão). O corpo de prova em ensaio é mantido nessa condição de carregamento nulo por um período de tempo igual ao período de repouso da condição em aplicação – 270 s, 60 s, 30 s ou 10 s. As condições de avaliação são resumidas no Quadro 6, onde se identificam as 9 condições de avaliação.

Quadro 6 – Condições de ensaio aplicadas na metodologia proposta.

CONDIÇÕES DE ENSAIO		
C de repouso	T [° C]	PR [s]
0,9	30	270
0,8		30
0,7		10
0,6	20	270
0,5		30
0,4		10
0,3	15	270
0,2		60
0,1		10

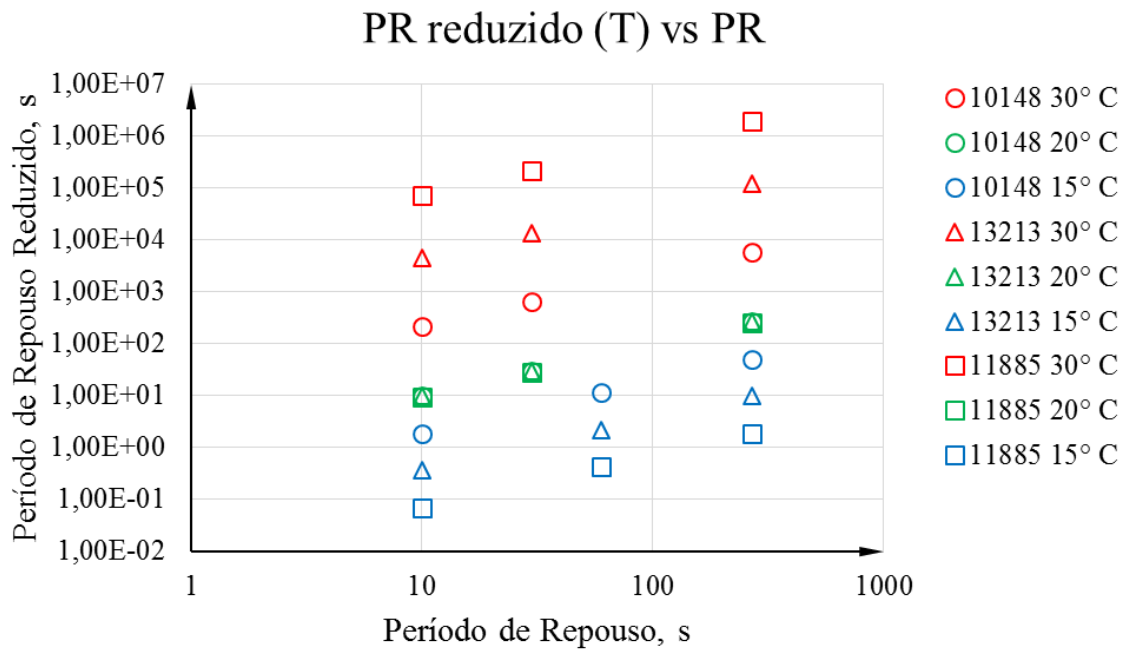
A relação entre tempo e temperatura existente em materiais viscoelásticos são o critério em que se fundamentam as temperaturas e períodos de repouso utilizados, de forma a se trabalhar em um espaço de períodos de repouso reduzidos (Equação (17)) com sobreposições nas regiões limítrofes de mudança de temperatura. Os valores utilizados permitem um espectro amplo de períodos de repouso reduzido, mesmo que os *shift-factors* sejam variados em diferentes misturas. Estes valores são ilustrados no Quadro 7, calculados a partir das constantes apresentadas no Quadro 5.

Quadro 7 – Períodos de repouso reduzidos nas condições de ensaio.

Mistura		10148		13213		11885	
T [° C]	PR [s]	Shift-factor	PR reduzido	Shift-factor	PR reduzido	Shift-factor	PR reduzido
30	270	4,56E-02	5,92E+03	4,91E-02	1,20E+05	6,03E-02	2,00E+06
30	30	4,56E-02	6,57E+02	4,91E-02	1,34E+04	6,03E-02	2,22E+05
30	10	4,56E-02	2,19E+02	4,91E-02	4,46E+03	6,03E-02	7,40E+04
20	270	1,01E+00	2,66E+02	1,00E+00	2,66E+02	1,02E+00	2,60E+02
20	30	1,01E+00	2,96E+01	1,00E+00	2,96E+01	1,02E+00	2,89E+01
20	10	1,01E+00	9,85E+00	1,00E+00	9,85E+00	1,02E+00	9,63E+00
15	270	5,28E+00	5,12E+01	5,28E+00	9,69E+00	5,10E+00	1,90E+00
15	60	5,28E+00	1,14E+01	5,28E+00	2,15E+00	5,10E+00	4,22E-01
15	10	5,28E+00	1,90E+00	5,28E+00	3,59E-01	5,10E+00	7,04E-02

A Figura 30 apresenta graficamente a relação entre os períodos de repouso reduzidos resultantes das combinações de temperatura e período de repouso para cada amostra.

Figura 30 – Períodos de repouso reduzidos nas condições de ensaio.



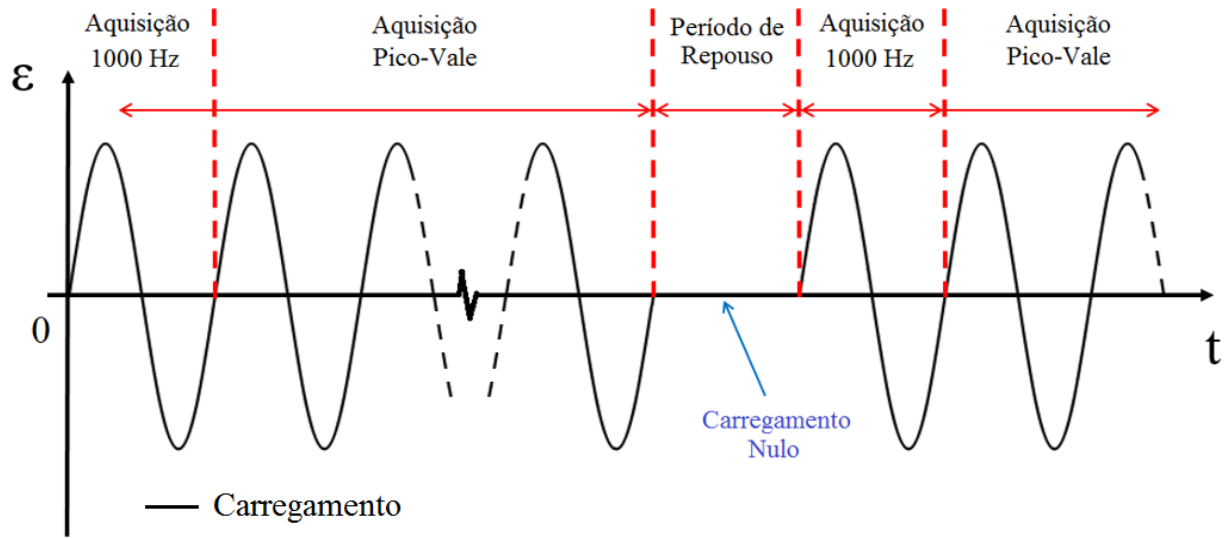
Fonte: o Autor (2018)

É importante observar, que estes ensaios não devem ser realizados em temperaturas muito elevadas, sob o risco do acúmulo de deformações permanentes se tornar significativo frente ao dano por trincamento.

Os ensaios são realizados por controle de deformação, através de extensômetros do tipo faca com 10 cm de *gauge length*, acoplados nas faces laterais do corpo de prova, conforme pode ser observado na Figura 31. A frequência padrão de carregamento utilizada é de 10 Hz.

Para cada etapa, a coleta de dados é realizada em duas frequências distintas: 1000 Hz para o primeiro ciclo de carregamento; e aquisição pico e vale para os ciclos seguintes. A aquisição de dados na frequência de 1000 Hz é realizada no primeiro ciclo do ensaio e no primeiro ciclo após cada período de repouso aplicado, conforme indica a Figura 31.

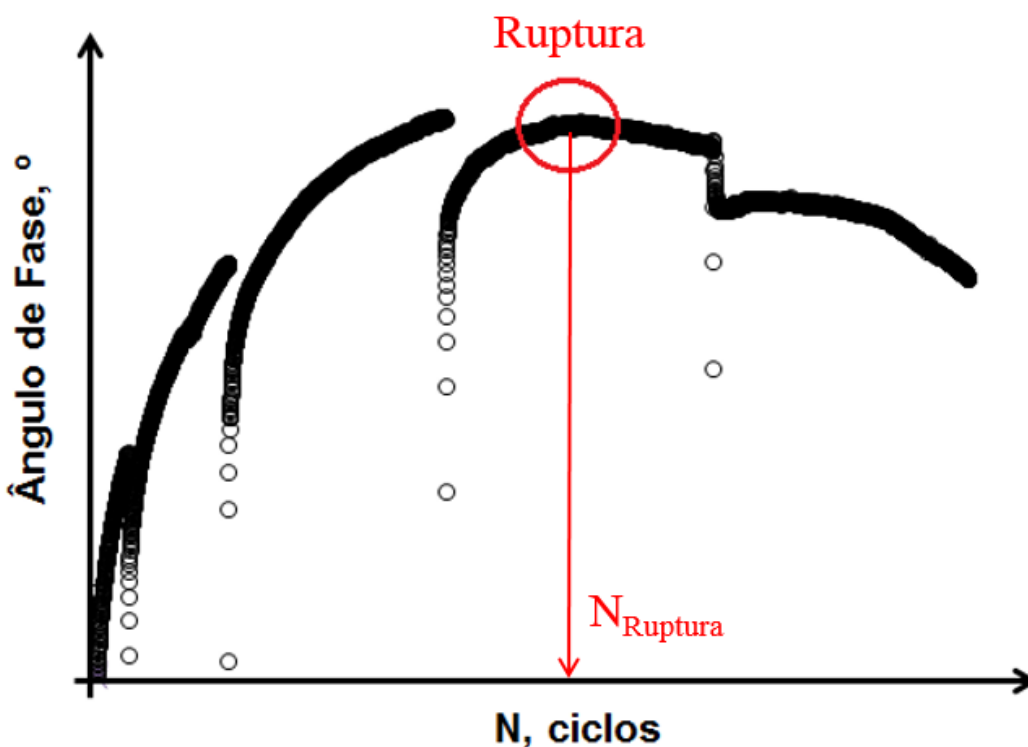
Figura 31 – Representação esquemática das regiões de carregamento aplicado com variação na taxa de aquisição de dados.



Fonte: o Autor (2018)

A ruptura do corpo de prova é determinada pelo ponto em que o ângulo de fase atinge inclinação nula e passa a reduzir seus valores nos pontos sequenciais. Este processo é ilustrado Figura 32.

Figura 32 – Identificação do ponto de ruptura no ensaio de fadiga à tração direta com períodos de repouso.



Fonte: o Autor (2018)

Embora a ruptura seja detectada desta maneira, o ensaio não necessariamente precisa ser interrompido neste ponto. A mecânica do dano contínuo continua a descrever o comportamento do material após a ruptura enquanto a desagregação no material não for predominante. Contudo, imagina-se que as propriedades de regeneração do material após a ruptura passem a ter pouco valor na ótica do que é avaliado neste trabalho.

3.3 TRATAMENTO DE DADOS

Nesta sessão são apresentados os procedimentos utilizados na avaliação das misturas ensaiadas. Estes procedimentos fazem parte da metodologia proposta para o estudo da capacidade de regeneração avaliada sob a curva característica de dano (C vs S) oriunda do ensaio descrito em 3.2.

Os resultados obtidos serão apresentados em sessão própria, posterior. Entretanto, a fim de demonstrar o tratamento de dados realizado de maneira ilustrativa, parte dos resultados serão utilizados como exemplos para eventuais tratamentos.

3.3.1 C vs S com períodos de repouso

A construção da curva característica de dano a partir do ensaio de fadiga à tração direta conta com duas etapas de cálculo distintas: uma para o primeiro ciclo de carregamento e outra para os ciclos seguintes. Este procedimento é descrito em detalhe na normativa AASHTO TP 107 apresentando-se a seguir os princípios envolvidos.

No ciclo inicial, o material acumula quantidades significativas de dano e, portanto, suas propriedades são calculadas considerando que esse é um período transiente (UNDERWOOD; BAEK; KIM, 2012; UNDERWOOD; KIM; GUDDATI, 2010). Isto significa que as simplificações adotadas para o comportamento cíclico não são adequadas para o primeiro ciclo de carregamento.

Em termos práticos, o parâmetro de dano S é calculado através da Equação (25). Parte dos parâmetros apresentados a seguir foram definidos em sessões de revisão anteriores deste trabalho.

$$dS_i = \begin{cases} \frac{-DMR}{2} (\varepsilon_R)^2 (C_i - C_{i-1})^{\frac{\alpha}{\alpha+1}} (\Delta\xi)^{\frac{1}{\alpha+1}}; & \text{para } C_i < C_{i-1} \\ 0; & \text{para } C_i \geq C_{i-1} \end{cases} \quad (25)$$

Onde: S_i = variável de estado interno representativa do dano []; DMR = Dynamic Modulus Ratio []; ε_R = pseudo-deformação [MPa^{-1}] (Equação (9)) ; C = integridade []; α = parâmetro de dano []; $\Delta\xi$ = variação no tempo reduzido entre pontos avaliados [s].

$$\alpha = \frac{1}{m} + 1 \quad (26)$$

Onde: α = parâmetro de dano []; m = máxima inclinação do módulo de relaxação (E(t)) na escala log-log [].

O dano em cada ponto é calculado através do acúmulo dos diferenciais de dano apresentados através da Equação (25), conforme Equação (27).

$$S_n = \sum_{i=1}^n dS_i \quad (27)$$

Onde: S_n = estado atual de dano no n-ésimo ponto do primeiro ciclo []; dS_i = variação de dano entre os pontos i e $(i-1)$ [].

Este procedimento é realizado para o primeiro ciclo do ensaio (considerando-se que a variável de estado interno de dano S tem valor nulo quando o ensaio inicia) e para o primeiro ciclo após cada período de repouso.

Após o primeiro ciclo, assume-se comportamento de regime permanente no material (*Steady State*), até que este seja submetido a alguma variação no ensaio como, para o caso deste estudo, a aplicação de um período de repouso. Esta simplificação, apresentada por Underwood, Kim e Guddati (2010) permite uma simplificação do processo de cálculo de S apenas com valores de pico e vale que, embora não seja perfeita, representa de maneira satisfatória o comportamento local de $C(S)$ para aquele instante. A simplificação no cálculo de S é dada pela seguinte sequência de equações presente na AASHTO TP 107:

$$\varepsilon_{pp} = \frac{\delta_{pico} - \delta_{vale}}{GL} \quad (28)$$

Onde: ε_{pp} = deformação pico-a-pico []; δ = deslocamento médio medido pelos extensômetros utilizados [mm]; GL = *Gauge Length* dos extensômetros [mm].

$$\varepsilon_{pp}^R = \varepsilon_{pp} \cdot |E^*|_{LVE} \quad (29)$$

Onde: ε_{pp}^R = pseudo-deformação pico-a-pico [MPa]; ε_{pp} = deformação pico-a-pico []; $|E^*|_{LVE}$ = Módulo Dinâmico Linear Viscoelástico [MPa].

$$C^* = \frac{\sigma_{pp}}{\varepsilon_{pp}^R \cdot DMR} \quad (30)$$

Onde: C^* = Integridade cíclica []; σ_{pp} = tensão pico-a-pico aplicada [MPa]; ε_{pp}^R = pseudo-deformação pico-a-pico [MPa]; DMR = *Dynamic Modulus Ratio* [].

$$\beta = \frac{F_{pico} + F_{vale}}{|F_{pico}| + |F_{vale}|} \quad (31)$$

Onde: β = fator de forma []; F_x = Força de pico ou vale aplicada pelo equipamento [N].

O fator de forma, β , representa uma medida da parcela do carregamento aplicado que causa tração no corpo de prova. Esta é uma medida importante pois considera-se que o dano ocorre somente em solicitações de tração. Sendo assim, carregamentos puramente compressivos ($\beta = -1$) não causam dano ao material. Esta premissa está matematicamente coerente através da Equação (32) que transforma a pseudo-deformação pico-a-pico em pseudo-deformação de tração.

$$\varepsilon_{ta}^R = \frac{\beta + 1}{2} \cdot \varepsilon_{pp}^R \quad (32)$$

Onde: ε_{ta}^R = pseudo-deformação de tração [MPa]; β = fator de forma []; ε_{pp}^R = pseudo-deformação pico-a-pico [MPa].

$$K_1 = \frac{1}{t_f - t_0} \left[\left(\frac{1}{\beta + 1} \right)^{2\alpha} \int_{t_0}^{t_f} (\beta - \cos(62,83 \cdot t))^{2\alpha} dt \right] \quad (33)$$

Onde: K_1 = fator de ajuste de forma do carregamento []; β = fator de forma []; t_0 = tempo reduzido inicial em que o dano inicia no carregamento cíclico [] (Equação (34)); t_f = tempo reduzido final em que o dano cessa no carregamento cíclico [] (Equação (35)); α = parâmetro de dano [].

$$t_0 = \frac{\cos^{-1}(\beta)}{62,83} \quad (34)$$

Onde: t_0 = tempo reduzido inicial em que o dano inicia no carregamento cíclico []; β = fator de forma [].

$$t_f = \frac{2\pi - \cos^{-1}(\beta)}{62,83} \quad (35)$$

Onde: t_f = tempo reduzido final em que o dano cessa no carregamento cíclico []; β = fator de forma [].

O fator de ajuste de forma de carregamento K_1 é rigorosamente calculado através da Equação (33), mas uma aproximação numérica com 100 passos é suficientemente adequada para seu resultado. Outra alternativa é o valor tabelado apresentado pela normativa, para misturas típicas nas condições mais comuns. Esta tabela é apresentada na Figura 33.

Figura 33 – Valores usuais para K_1 em função do fator de forma (β) e do parâmetro de dano (α), extraído do procedimento normativo de ensaio de Fadiga à Tração Direta, AASHTO TP 107-14.

Table 5—Compiled K_1 Values for Typical Material and Test Conditions

Beta	Alpha						
	4.333	4.077	3.857	3.667	3.500	3.353	3.222
-0.5	0.277	0.285	0.293	0.300	0.306	0.312	0.318
0.0	0.263	0.271	0.278	0.285	0.291	0.297	0.302
0.2	0.256	0.264	0.271	0.277	0.284	0.289	0.295
0.4	0.248	0.256	0.262	0.269	0.275	0.280	0.286
0.6	0.238	0.245	0.252	0.258	0.264	0.269	0.274
0.8	0.225	0.231	0.238	0.243	0.249	0.254	0.259
1.0	0.189	0.195	0.200	0.205	0.209	0.214	0.218

Fonte: AASHTO TP 107-14 (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 2013)

A seguir, determina-se o período reduzido médio cíclico, através da Equação (36).

$$t_R = \frac{1}{a_T} \left(\frac{t_{pico} + t_{vale}}{2} \right) \quad (36)$$

Onde: t_R = tempo reduzido médio do ciclo avaliado [s]; t_{pico} = momento em que ocorre o pico de força do ciclo de carregamento [s]; t_{vale} = momento em que ocorre o vale de força do ciclo de carregamento [s]; a_T = shift-factor para a temperatura em que o ensaio está sendo executado [].

Por fim, após a determinação destes parâmetros descritos nas Equações (28) a (36), pode-se calcular a variação da variável de dano S para o regime permanente através da Equação (37) e seu valor absoluto acumulando estas variações conforme indica a Equação.

$$dS_i = \begin{cases} \frac{-DMR}{2} (\varepsilon_{ta}^R)^2 (C_i^* - C_{i-1}^*)^{\frac{\alpha}{\alpha+1}} (t_{Ri} - t_{Ri-1})^{\frac{1}{\alpha+1}} (K_1)^{\frac{1}{\alpha+1}}; & \text{para } C_i^* \leq C_{i-1}^* \\ 0; & \text{para } C_i^* > C_{i-1}^* \end{cases} \quad (37)$$

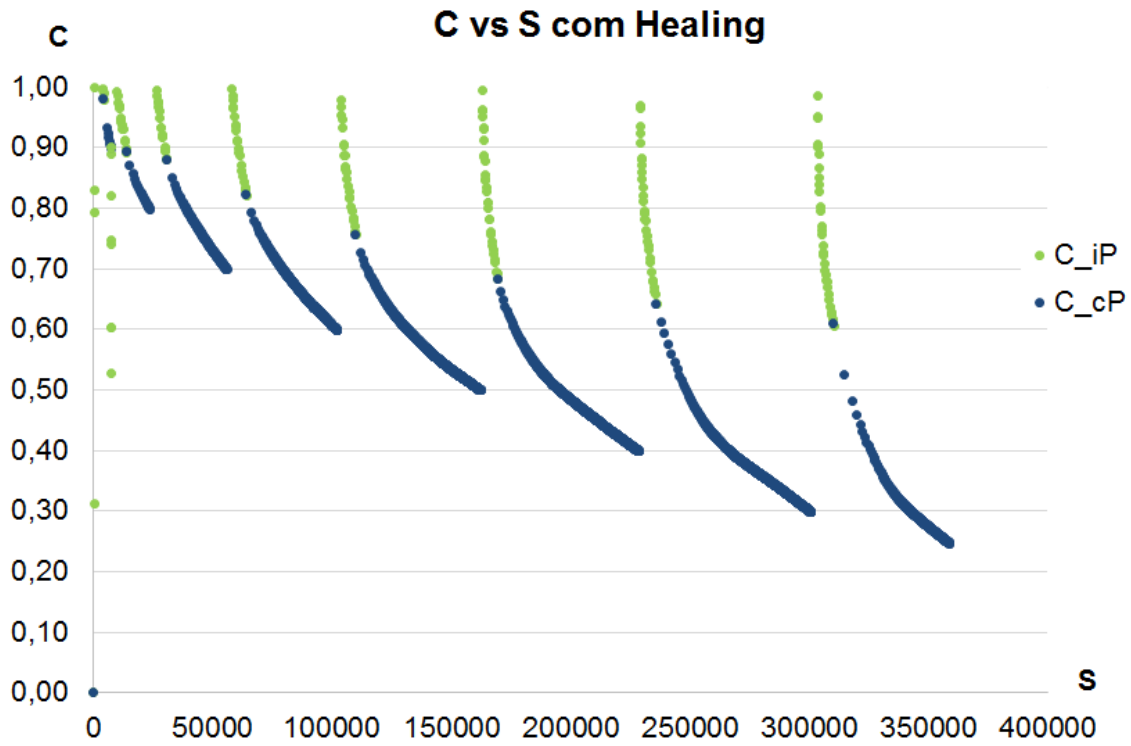
Onde: dS_i = variação de dano entre os ciclos i e (i-1) []; DMR = *Dynamic Modulus Ratio* []; ε_{ta}^R = pseudo-deformação de tração [MPa]; C_i^* = Integridade cíclica no i-ésimo ciclo []; α = parâmetro de dano []; t_{Ri} = tempo reduzido médio do i-ésimo ciclo avaliado [s]; K_1 = fator de ajuste de forma do carregamento [].

$$S_n = S_{trans} + \sum_{i=2}^n dS_i \quad (38)$$

Onde: S_n = estado de dano atual no n-ésimo ciclo []; S_{trans} = estado de dano ao final do ciclo do período transiente []; dS_i = variação de dano entre os ciclos i e (i-1) [].

Estas operações levam à construção da curva característica de dano de cada uma das nove possíveis condições avaliadas, apresentadas no Quadro 6. A Figura 34 apresenta os resultados da aplicação da metodologia descrita para cálculo da curva C vs S com *healing*, em uma das condições testadas.

Figura 34 – Curva C vs S com *healing*, obtida através de ensaio cíclico de fadiga à tração direta com períodos de repouso de 270 segundos na temperatura de 30° C.



Fonte: o Autor (2018)

3.3.2 Cálculo do Índice de Regeneração

A representação das respostas à fadiga de misturas asfálticas através da curva C vs S é uma técnica evoluída capaz de descrever o comportamento do material independentemente das condições de carregamento. Dessa forma, a avaliação da capacidade de regeneração será realizada neste espaço, onde o comportamento intrínseco do material é capturado.

Ashouri (2014) apresenta três dos possíveis índices capazes de medir a capacidade de regeneração de misturas asfálticas. Estes índices são descritos em função da pseudo-rigidez do material (C) (Equação (39)) ou da variação do parâmetro de dano (S) na curva C vs S com períodos de repouso (Equação (40)) ou, ainda, da variação do número de ciclos [N] no espaço C vs N (Equação (41)).

$$\%H_C = \frac{\Delta C}{1 - C_0} \cdot 100 \quad (39)$$

Onde: $\%H_C$ = índice de regeneração, calculado a partir de C [%]; C_0 = pseudo-rigidez no momento de aplicação do repouso []; ΔC = variação de C causada pelo período de repouso [].

$$\%H_S = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 \quad (40)$$

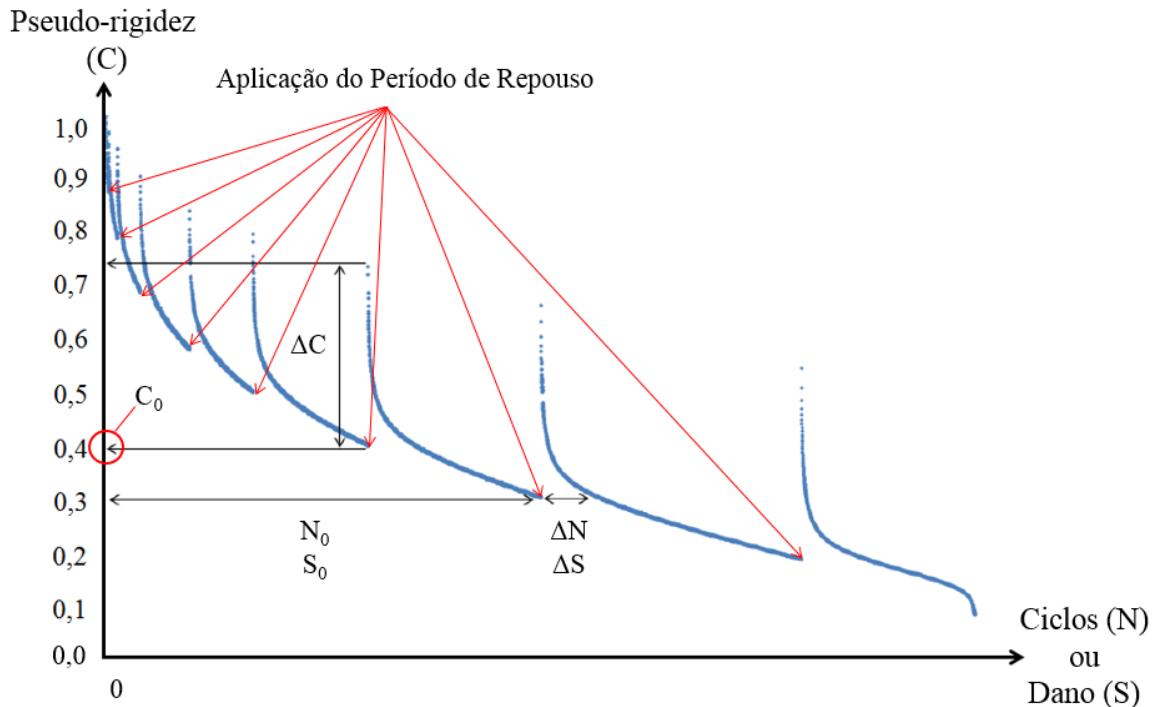
Onde: $\%H_S$ = índice de regeneração, calculado a partir de S [%]; S_0 = dano do corpo de prova no momento de aplicação do período de repouso []; ΔS = variação de S entre pontos de mesma integridade de repouso [].

$$\%H_N = \frac{\Delta N}{N_0} \cdot 100 \quad (41)$$

Onde: $\%H_N$ = índice de regeneração, calculado a partir de N [%]; N_0 = ciclo em que foi aplicado o período de repouso [ciclos]; []; ΔN = variação de N entre pontos de mesma integridade de repouso [ciclos].

O cálculo realizado nas equações (39), (40) e (41) tem seus parâmetros ilustrados através da Figura 35.

Figura 35 – Curva C vs N ou C vs S com períodos de repouso, com representação de parâmetros para cálculo dos índices de regeneração



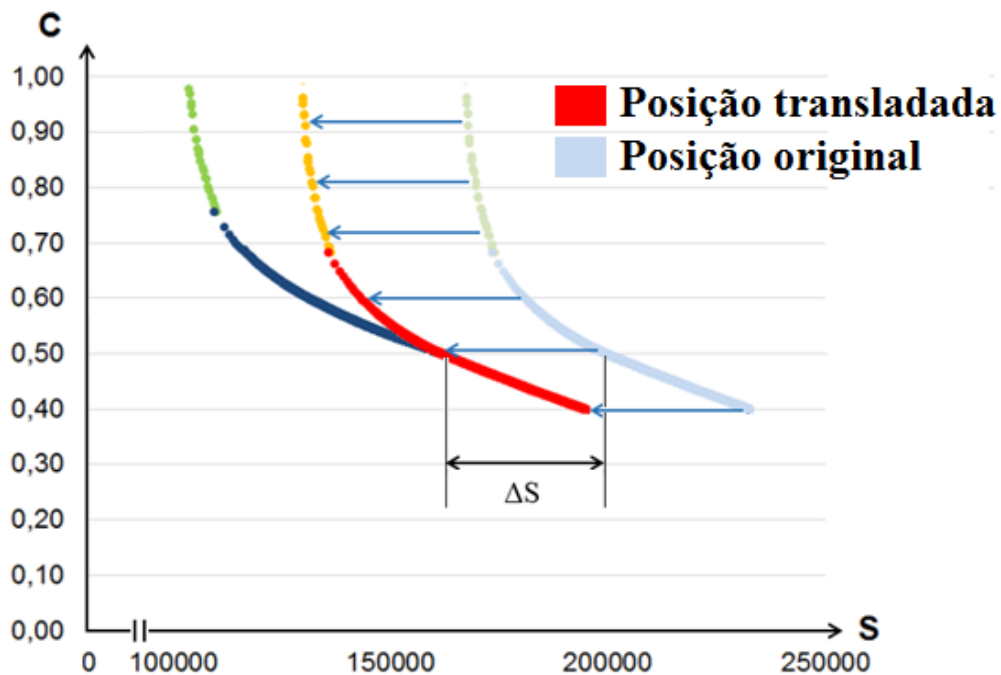
Fonte: Adaptado de Ashouri (2014, p. 72)

Embora sejam indicadas três formas de quantificar o efeito dos períodos de repouso no material, este estudo irá trabalhar com o índice calculado a partir de S, apresentado na Equação (40) que apresenta comportamento mais estável quando comparado aos outros dois. Esta escolha é feita pela variabilidade à que os índices $%H_C$ e $%H_N$ estão sujeitos, por não-linearidades presentes no primeiro ciclo de carregamento após repouso e pela variação do número de ciclos dependendo do modo e intensidade de carregamento, respectivamente.

Uma vez determinado que a análise de regeneração será feita a partir da variável de dano, o espaço C vs S é priorizado, e uma interpretação mais cuidadosa do gráfico ilustrado pela Figura 34 revela uma possível incoerência teórica na adaptação direta do cálculo de S para inserção dos períodos de repouso. Ou seja, como S é uma medida do estado de dano (trincamento) do material e, por definição, a regeneração é um efeito que diminui a quantidade de trincas no material um aumento sequencial de S quando o material passa pelo período de repouso e continua a ser solicitado, leva a errônea interpretação de que o material varia sua integridade sem mudanças no estado de dano.

A fim de lidar com este revés, propõe-se uma translação horizontal (S) dos resultados obtidos, a partir da premissa de que o material siga um comportamento virgem e unívoco quanto a pares integridade-dano não atingidos. Desta forma, assume-se que a trajetória da curva $C(S)$ segue um comportamento não alterado pelo efeito de regeneração a partir da integridade em que o período de repouso foi aplicado. Este pressuposto e a consequente operação nos resultados obtidos leva à uma região de “recuperação de dano” no comportamento $C(S)$ indicando que o material recuperaria integridade quando o estado de dano, S, retrocede. A Figura 36 apresenta esta operação para a região centrada na integridade de repouso de 0,5 em um excerto com fins didáticos do resultado da Figura 34.

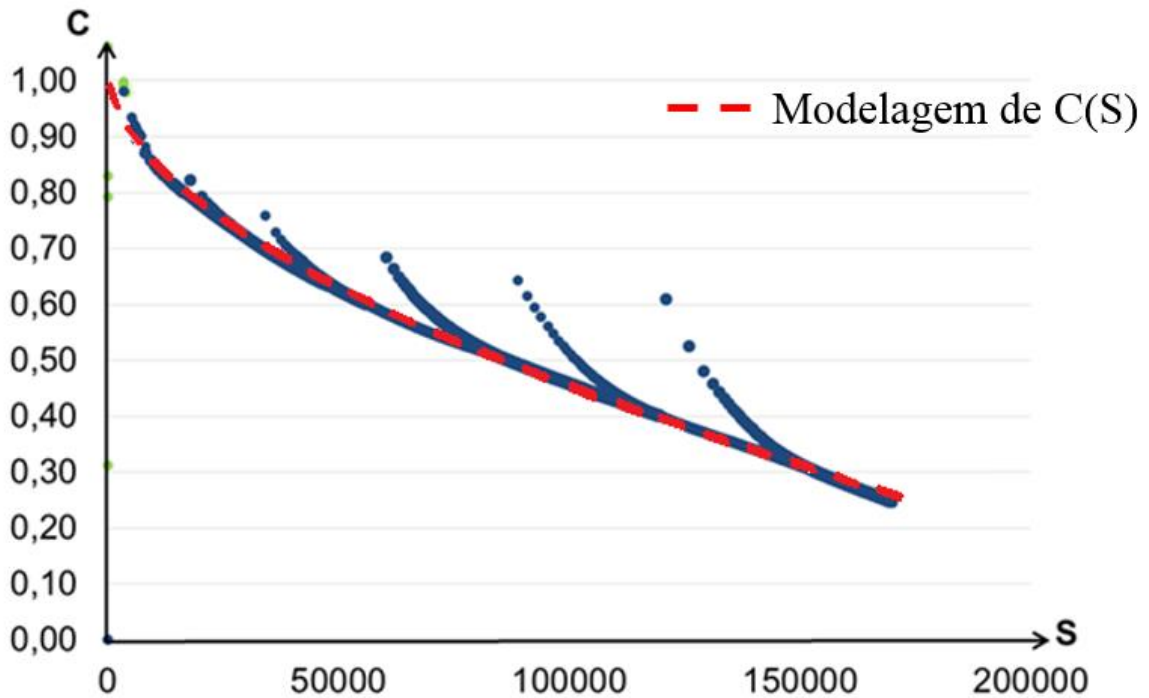
Figura 36 – Exemplo de deslocamento de trecho da curva de dano característico com regeneração.



Fonte: o Autor (2018)

Esta translação aplicada em cada um dos pontos do exemplo da Figura 34 gera a curva presente na Figura 37 da qual são retirados os valores relativos ao ciclo inicial de carregamento.

Figura 37 – Curva C vs S com períodos de repouso após translação.



Fonte: o Autor (2018)

Na Figura 37 a curva tracejada apresenta a modelagem da curva virgem de dano, que segue uma função da forma apresentada pela Equação (42), onde as constantes de calibração são obtidas por técnicas como o método dos mínimos quadrados, por exemplo.

$$C(S) = 1 - C_{11}S^{C_{12}} \quad (42)$$

Onde: C = integridade []; S = variável de estado de dano []; C_{11} , C_{12} = constantes de calibração do modelo [].

A translação realizada na curva característica de dano exige uma adaptação do cálculo do índice de regeneração ($\%H_S$) uma vez que o valor de S_0 é modificado pela operação. Tal adaptação é realizada a partir de uma aplicação da proposta de Underwood; Baek e Kim (2012) que relaciona a variação de dano no modelo S-VECD com a variação de ciclos equivalente a ΔS , através do modelo apresentado na Equação (42) e da propriedade descrita na Equação (43) (para dedução da mesma, recomenda-se o trabalho de Underwood; Baek e Kim (2012)).

$$\int_{S_1}^{S_2} (S^{C_{12}-1})^{-\alpha} dS = \int_{N_1}^{N_2} \left(\frac{\varepsilon_{ta}^R{}^2 C_{11} C_{12} DMR}{2} \right)^\alpha \frac{K_1}{f_{red}} dN \quad (43)$$

Onde: S_1, S_2 = dano inicial e final, respectivamente []; N_1, N_2 = ciclo inicial e final, respectivamente [ciclos]; C_{11}, C_{12} = constantes de calibração do modelo adotado []; ε_{ta}^R = pseudo-deformação de tração [MPa]; $DMR = Dynamic Modulus Ratio / Modulus Ratio$ []; K_1 = fator de ajuste de forma do carregamento []; f_{red} = frequência de ensaio reduzida [Hz]; α = taxa de evolução do dano [].

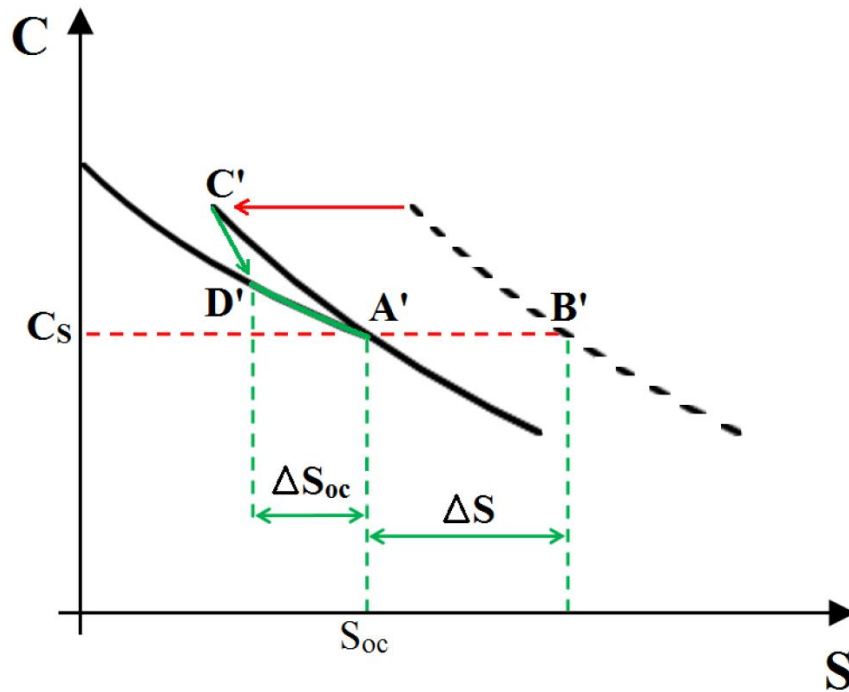
Sendo assim, define-se o novo índice de regeneração, calculado sobre a curva de dano característica deslocada de cada corpo de prova, para cada instante de repouso aplicado, através da Equação (44):

$$\%H_{S_{oc}} = \frac{\Delta S_{oc}}{S_{oc}} \times 100 \quad (44)$$

Onde: $\%H_{S_{oc}}$ = Índice de Regeneração “*on-curve*” (calculado sobre a curva deslocada) [%]; ΔS_{oc} = Variação de dano sobre a curva deslocada (“*on-curve*”) []; S_{oc} = dano equivalente à integridade em que se aplicou o repouso [].

Estas variáveis têm sua identificação ilustrada na Figura 38, que demonstra: o deslocamento do ponto B’ até o ponto A’, deslocando-se a curva tracejada (em direção a curva contínua) uma quantidade igual à variação de dano calculada sobre a curva original (ΔS); a obtenção do ponto D’, que é realizada através da Equação (43), transformando o número de ciclos (ΔN) entre os pontos C’ e A’ na variação de dano (ΔS_{oc}) entre os pontos D’ e A’.

Figura 38 – Representação esquemática do deslocamento horizontal aplicado à curva de dano característica após um período de repouso.



Fonte: o Autor (2018)

Dessa forma, para cada período de repouso realizado no ensaio calcula-se um índice de regeneração representativo daquela condição, incluindo período de repouso utilizado, temperatura de ensaio e estado de dano.

3.3.3 Modelagem do Estado de *Healing*

Conforme mencionado anteriormente, a capacidade de regeneração em materiais asfálticos depende de fatores internos à mistura, que normalmente não se alteram ao longo da vida de serviço de um pavimento, e de fatores que caracterizam as condições de carregamento e do estado do material que, por sua vez, pode apresentar diversas configurações. Para descrever a capacidade de regeneração, é proposta uma variável de estado capaz de modelar a intensidade do fenômeno estudado nas diferentes condições em que o material pode se encontrar.

A variável proposta tem o formato apresentado pela Equação (45), que engloba os fatores internos influentes na capacidade de regeneração (sessão 2.3.2.1) através das constantes α e β ,

e os fatores externos influentes na capacidade de regeneração (sessão 2.3.2.2) através das variáveis PR, a_T e S_{acum} .

$$H = \alpha \cdot \left(\frac{PR}{a_T}\right)^{-\beta} \cdot S_{acum} \quad (45)$$

Onde: H = Variável de estado de regeneração []; α, β = Constantes de calibração do modelo []; PR = Período de Repouso aplicado ao material [s]; a_T = *Shift-factor* para temperatura em que o período de repouso é aplicado (Equação (18)) []; S_{acum} = Dano recuperado acumulado pelo histórico de períodos de repouso [].

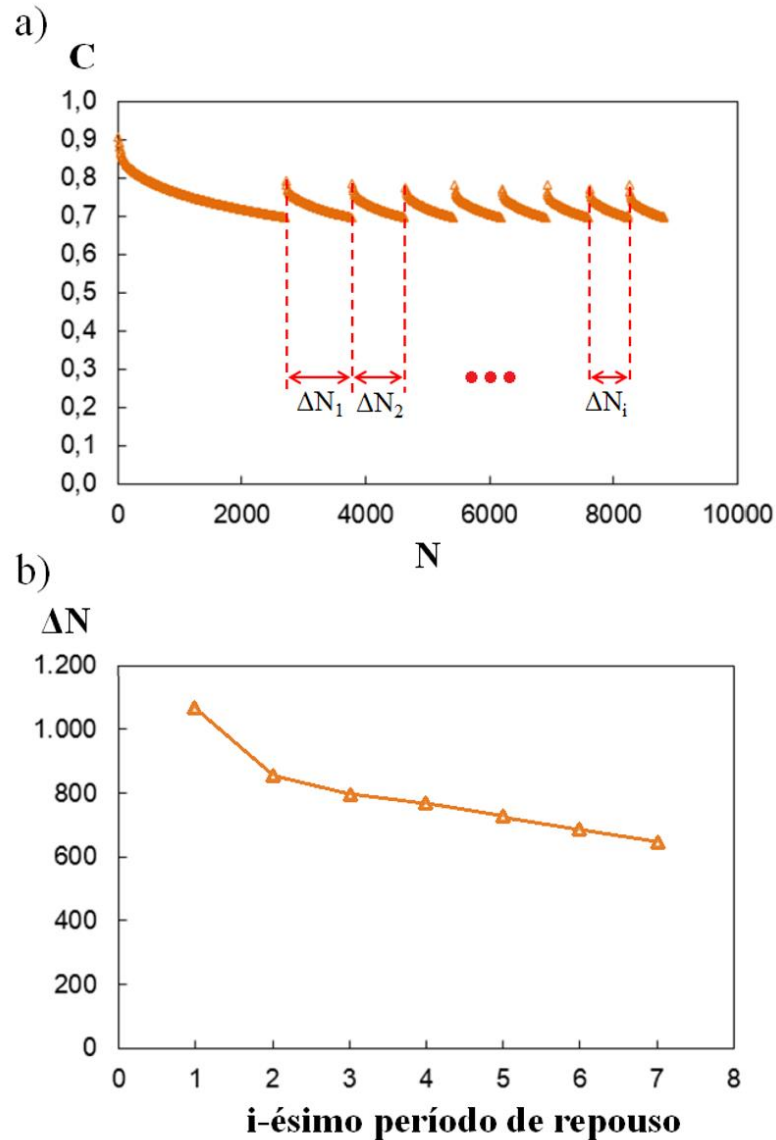
A expressão apresentada na Equação (45) utiliza algumas abordagens até então não mencionadas ou justificadas. São elas: o uso da variável S_{acum} ; o uso de uma função em formato de potência para modelar o comportamento da relação tempo-Temperatura na variável de estado de *healing* (H). Estas abordagens são justificadas nas sessões a seguir.

3.3.3.1 Variável de estado de dano acumulado (S_{acum})

A necessidade de uma variável que seja capaz de descrever mudanças na capacidade de regeneração do material através do acúmulo de dano recuperado é dada a partir da observação experimental em um teste não protocolar realizado. O teste para tal observação aplicou uma sequência de períodos de repouso de mesma duração sempre que o material atingia um determinado valor de integridade, mantendo-se a temperatura de ensaio constante.

O teste foi empregado na expectativa de se observar que, mantendo-se constantes a temperatura, o período de repouso e a integridade de parada, o material apresentaria a mesma capacidade de regeneração. Entretanto, os resultados observados para este ensaio indicaram um consistente decréscimo no número de ciclos necessários para que o material retornasse, após o repouso, à integridade de parada, conforme indica a Figura 39.

Figura 39 – a) C vs N para ensaio com aplicação de repousos em um mesmo ponto de integridade; b) Número de ciclos necessários para atingimento da integridade de repouso para cada repouso aplicado.



Fonte: o Autor (2018)

Estes dados indicam que a variável C , diretamente, não é um parâmetro adequado para a modelagem da capacidade de regeneração. Desta forma, a fim de incluir esta resposta decrescente do índice de regeneração estudado, propõe-se uma variável que acumule, linear e proporcionalmente, o dano regenerado em cada ciclo de repouso (ΔS_{oc}). Esta variável é definida pela Equação (46):

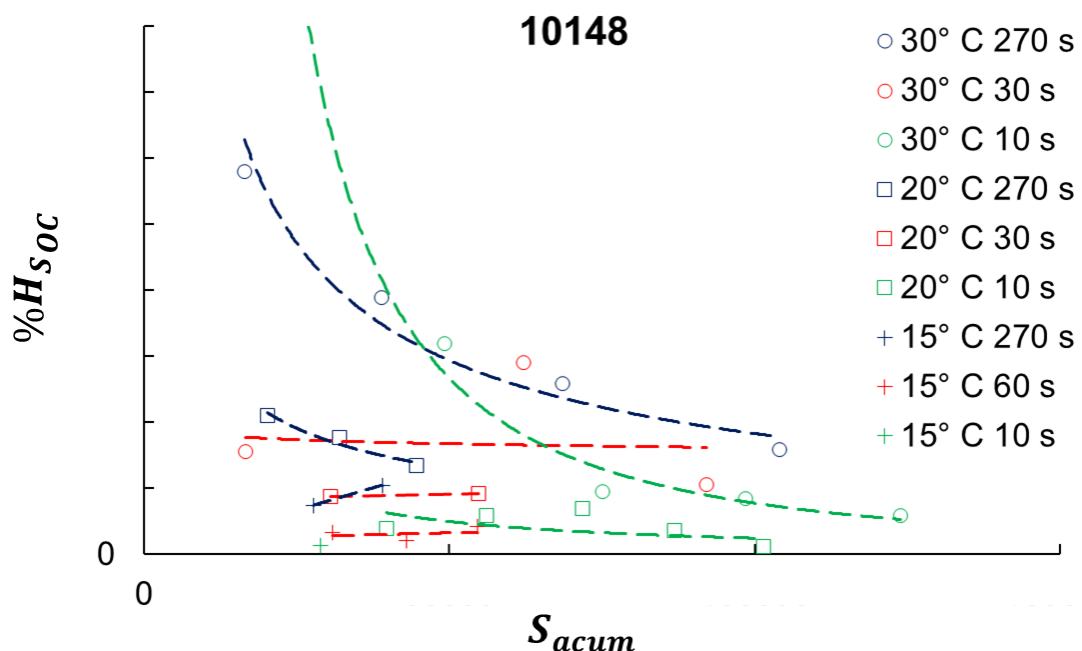
$$S_{acum_i} = \begin{cases} \Delta S_{oc,i}, & \text{para } i = 1 \\ S_{acum_{i-1}} + \Delta S_{oc,i}, & \text{para } i > 1 \end{cases} \quad (46)$$

Onde: S_{acum_i} = Dano recuperado acumulado até o i-ésimo período de repouso [];
 ΔS_{oc_i} = Variação de dano sobre a curva característica de dano deslocada, causada pelo i-ésimo período de repouso [].

3.3.3.2 Curva mestra de *healing*

Uma vez definida a abordagem do estado presente de degradação do material a partir do dano recuperado pelo período de repouso (S_{acum}), podem-se observar os índices de regeneração experimentais em função de cada um dos grupos de condições utilizados no ensaio. A Figura 40 apresenta os resultados parciais de uma das misturas avaliadas, a fim de ilustrar os procedimentos até então descritos.

Figura 40 – Valores de índice de regeneração para cada uma das condições de ensaio em função da variável de dano recuperado acumulado (S_{acum}).



Fonte: o Autor (2018)

Estes resultados parciais ilustram a tendência de regeneração para cada uma das condições. No entanto, procura-se uma curva unívoca descritiva do comportamento de regeneração, de

maneira similar às curvas mestras do ensaio módulo dinâmico onde se modela uma resposta para o módulo em função da temperatura e frequência de ensaio.

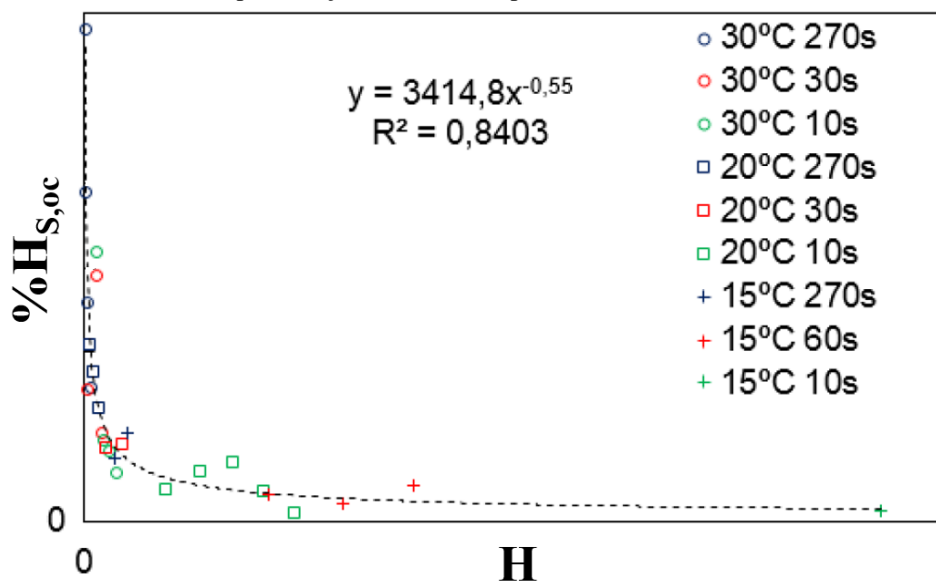
Para obtenção de uma curva mestra de *healing*, aplicam-se deslocamentos horizontais para dados de mesmas condições de temperatura e períodos de repouso. Estes deslocamentos horizontais foram realizados, a princípio, de forma manual, procurando-se uma curva contínua descritiva do comportamento, na expectativa de se identificar uma tendência dominante. A Figura 41 apresenta estes deslocamentos, com uma linha de tendência no formato de potência decrescente, dada pela Equação:

$$\%H_{S_{oc}} = A \cdot H^{-B} \quad (47)$$

Onde: $\%H_{S_{oc}}$ = Índice de Regeneração “*on-curve*” (calculado sobre a curva deslocada) [%];
A, B = Constantes de calibração do modelo []; H = Variável de estado de regeneração [].

Os dados são apresentados de maneira qualitativa, com o objetivo de ilustrar a metodologia de deslocamento e modelagem aplicada. A apresentação dos dados será realizada em sua plenitude em sessão própria, conjuntamente com discussões sobre os mesmos.

Figura 41 – Valores de índice de regeneração deslocados horizontalmente, com aproximação em forma de potência decrescente.



Fonte: o Autor (2018)

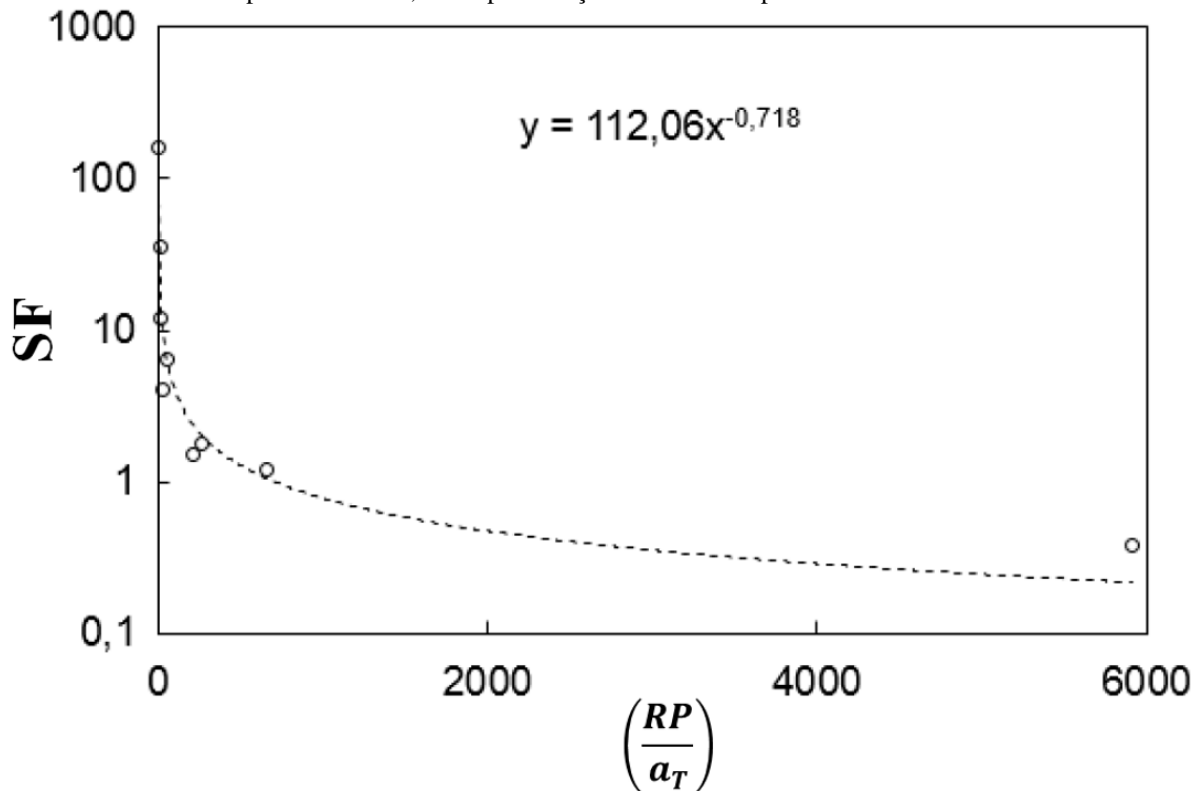
Conforme indicado pela Equação (45), a variável de estado de *healing* (H) é determinada a partir do produto da variável de estado de dano acumulado (S_{acum}) e um termo modelado em função da temperatura e do período de repouso que, por motivos de simplificação de notação, será doravante tratado pela sigla “SF” (“*shift-factor*”, por ser o termo modelador do deslocamento de S_{acum}), definido na Equação (48).

$$SF = \alpha \cdot \left(\frac{PR}{a_T} \right)^{-\beta} \quad (48)$$

Onde: SF = Variável de estado conjunta de temperatura e período de repouso; α , β = Constantes de calibração do modelo []; PR = Período de Repouso aplicado ao material [s]; a_T = *Shift-factor* para temperatura em que o período de repouso é aplicado (Equação (18)) [].

Desta forma, para que o modelo seja capaz de descrever corretamente aquilo a que se propõe, SF deve ser modelado e calibrado por funções adequadas ao seu formato. Esta modelagem é realizada a partir dos SF obtidos manualmente (utilizados na curva apresentada na Figura 41) na qual um modelo potencial decrescente é adotado por ser o que melhor se adéqua (dentre os modelos testados), conforme ilustra a Figura 42.

Figura 42 – Valores de SF otimizados manualmente em função do período de repouso reduzido, com aproximação em forma de potência decrescente.



Fonte: o Autor (2018)

Desta forma, a obtenção da curva mestra de *healing* (representada, genericamente, na Figura 41) é realizada através de duas etapas que ocorrem simultaneamente:

- Modelagem dos fatores de deslocamento (SF) em função das condições de temperatura e período de repouso (baseada no princípio da superposição tempo-temperatura) e calibrados para as características de cada mistura, em uma função de formato de potência, dado pela Equação (48);
- Modelagem dos índices de regeneração em função do estado de dano acumulado deslocado, calibrados para as características de cada mistura através da Equação (47).

4. RESULTADOS

Nesta sessão serão apresentados os resultados obtidos para cada uma das misturas avaliadas através das metodologias de ensaio e de análise descritas na sessão 3. Os resultados serão

apresentados considerando somente os ensaios bem-sucedidos ou cujas apresentações não sejam prejudicadas por eventuais imprevistos no procedimento.

4.1 CURVAS DE *HEALING* DESLOCADAS

Conforme descrito na sessão de procedimentos deste trabalho, a curva de dano característica calculada a partir dos dados do ensaio com períodos de repouso é calculada considerando uma evolução contínua do dano, desconsiderando os possíveis decréscimos do parâmetro S . Para lidar de maneira adequada com este efeito, as curvas experimentais são deslocadas horizontalmente, convergindo o ponto em que o material atinge o período de repouso e o pontos em que ele atinge novamente aquela integridade imediatamente após o repouso.

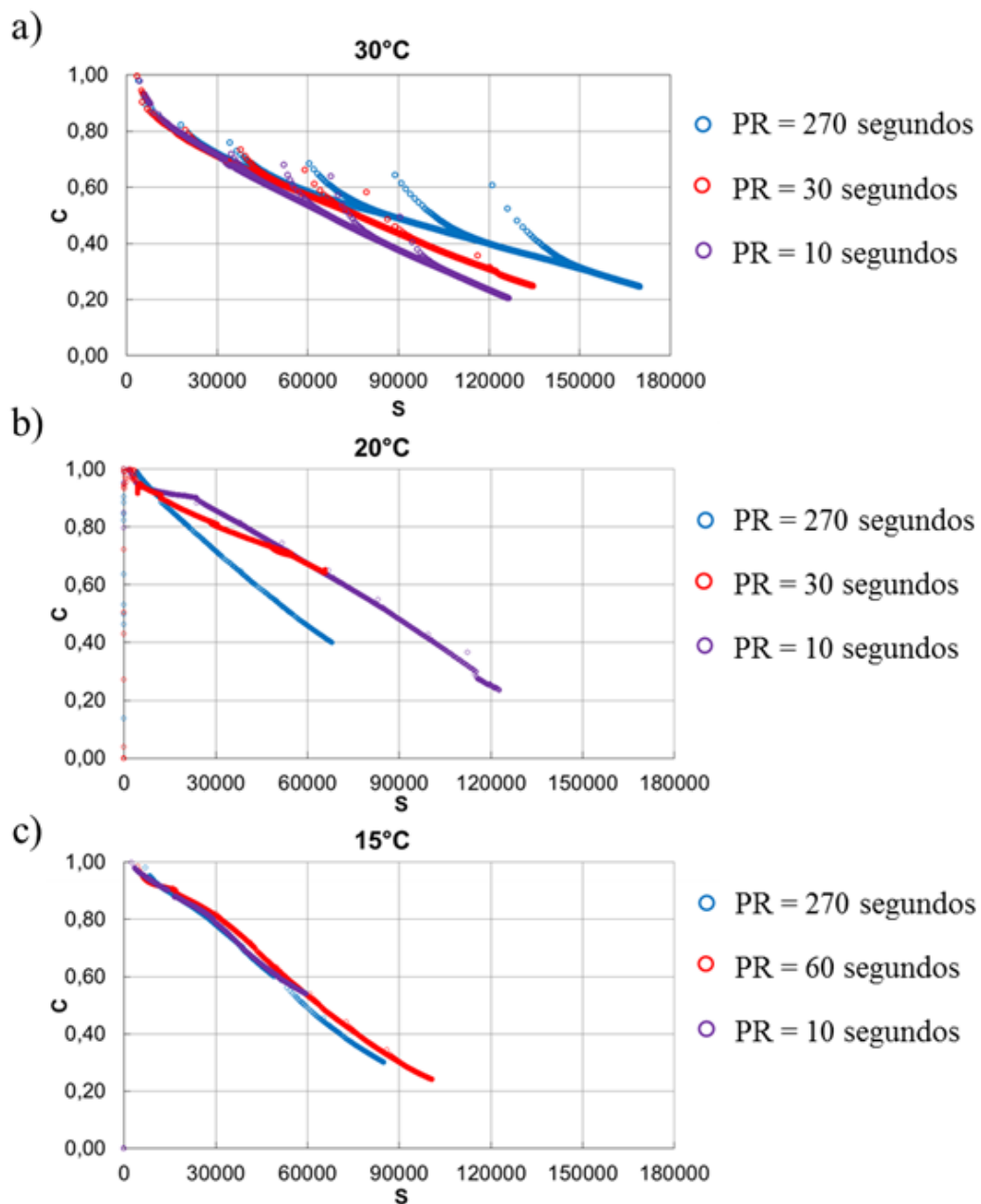
A seguir são apresentadas as curvas deslocadas de cada uma das misturas avaliadas, agrupadas pelas temperaturas de ensaio. Esse agrupamento por temperatura é realizado por se reconhecer que as curvas de dano característica não são independentes da temperatura, embora o sejam das condições de carregamento – frequência, modo e amplitude. Em cada um dos casos, apresenta-se um quadro resumo das variações do parâmetro S (ΔS) e do número de ciclos para cada período de repouso (ΔN). Além disso, nestes quadros resumo são inseridas informações de amplitude de carregamento para cada grupo de carregamentos entre repousos a fim de se verificar possíveis valores incoerentes de ΔN , justificativa para rupturas prematuras e eventuais inconsistências entre amostras.

4.1.1 Mistura 10148

A Figura 43 apresenta os deslocamentos das curvas de ensaio (Anexo A) para mistura 10148.

Figura 43 – Resultados de ensaio de curvas características de dano deslocadas a partir de variações de dano - mistura 10148.

- a) Períodos de Repouso de 270, 30 e 10 segundos em 30° C;
 b) Períodos de Repouso de 270, 30 e 10 segundos em 20° C;
 c) Períodos de Repouso de 270, 60 e 10 segundos em 15° C.



Fonte: o Autor (2018)

No Quadro 8 são resumidas as informações de ensaio relativas aos deslocamentos aplicados nas curvas da Figura 43.

Quadro 8 – Dados de deformação solicitante, variação de dano e variação de número de ciclos nos períodos de repouso aplicados para mistura 10148

T	30° C								
PR	270 s			30 s			10 s		
C	ϵ [μ]	ΔS	ΔN	ϵ [μ]	ΔS	ΔN	ϵ [μ]	ΔS	ΔN
0,9	175	6732	1	200	7719	26	185	4160	1
0,8	240	15222	166	240	6684	26	260	13076	176
0,7	240	23473	936	240	17844	866	240	9235	26
0,6	240	29694	2296	240	22012	1256	240	18411	996
0,5	240	33232	3539	240	25064	898	240	18944	596
0,4	240	38193	3066	240	26083	566	240	23339	776
0,3	240	42152	2186	240	17710	38	240	23710	716
T	20° C								
PR	270 s			30 s			10 s		
C	ϵ [μ]	ΔS	ΔN	ϵ [μ]	ΔS	ΔN	ϵ [μ]	ΔS	ΔN
0,9	130	4050	1	130	5703	47	130	6630	0
0,8	190	5854	36	190	11213	546	190	6335	86
0,7	190	7414	36	190	13812	2116	190	10045	186
0,6	190	8474	36				190	12201	276
0,5	190	9235	56				190	12337	146
0,4	190	10773	136				190	15515	46
0,3	190	17233	226				190	7153	26
0,2	190	12702	526						
T	15° C								
PR	270 s			60 s			10 s		
C	ϵ [μ]	ΔS	ΔN	ϵ [μ]	ΔS	ΔN	ϵ [μ]	ΔS	ΔN
0,9	160	4268	1	145	7068	26	155	245	0
0,8	170	7792	37	170	7296	106	170	3030	5
0,7	170	7296	31	170	7099	26	170	926	1
0,6	170	7124	3	170	9616	76	170	1534	26
0,5	170	18116	26	170	9631	82			
0,4	170	11763	66	170	9709	86			
0,3				170	17381	163			

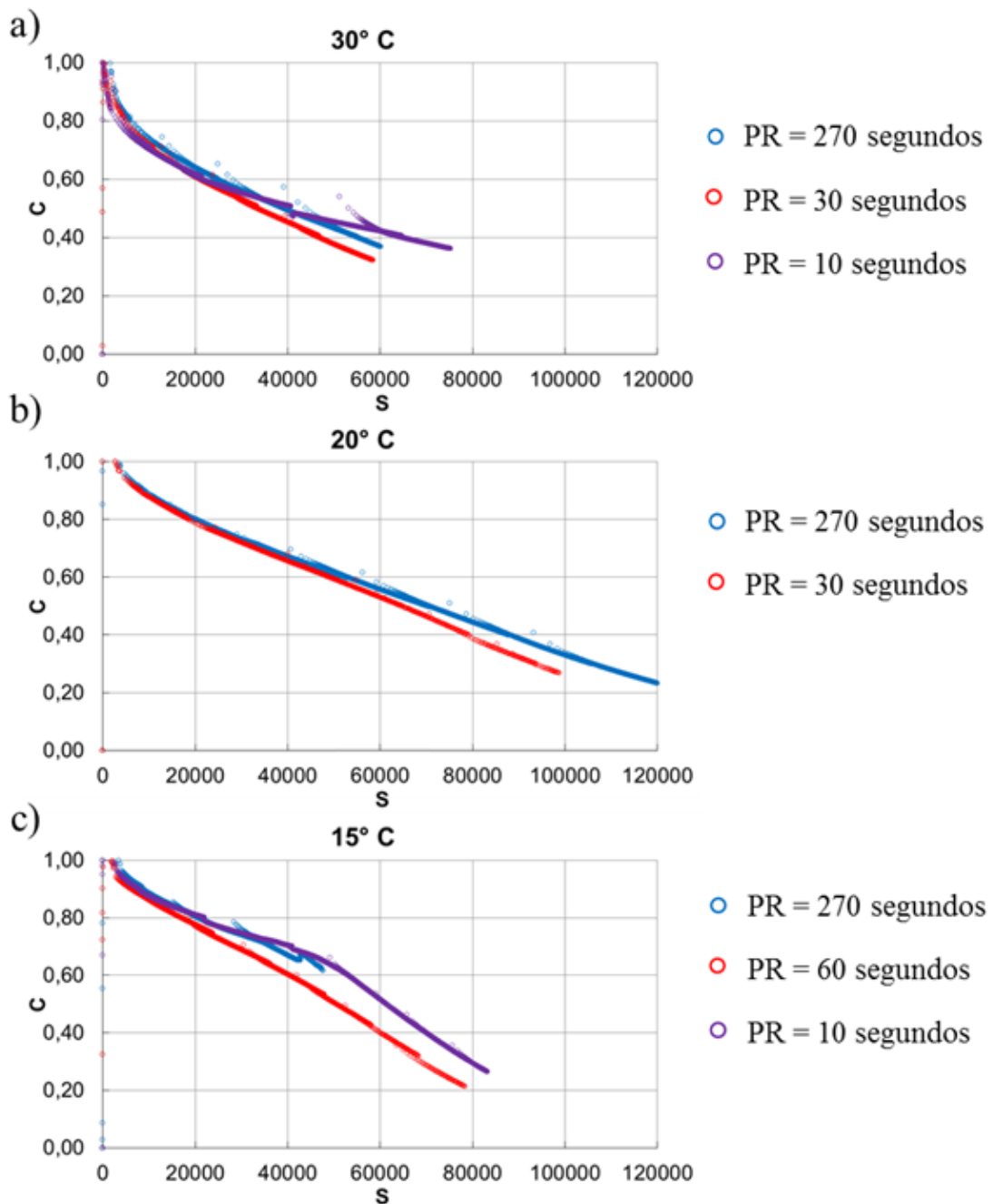
Em geral utilizaram-se deformações menores para o primeiro grupo de carregamento, a fim de evitar que a integridade do material fosse inferior a 0,9 após este ciclo. Como alguns dos tratamentos de dados são realizados assumindo estado de regime permanente (condição que normalmente passa a ser válida a partir do terceiro ciclo), uma queda superior a 10% no primeiro ciclo resultaria em erros de previsão, incluindo a possibilidade de aplicação do repouso em valores abaixo do previsto.

4.1.2 Mistura 13213

A Figura 44 apresenta os deslocamentos das curvas de ensaio (Anexo B) para mistura 13213.

Figura 44 – Resultados de ensaio de curvas características de dano deslocadas a partir de variações de dano para mistura 13213.

- a) Períodos de Repouso de 270, 30 e 10 segundos em 30° C;
 b) Períodos de Repouso de 270 e 30 segundos em 20° C;
 c) Períodos de Repouso de 270, 60 e 10 segundos em 15° C.



Fonte: o Autor (2018)

Nesta mistura, os resultados de 20° C e 10 segundos foram suprimidos por apresentarem valores absurdos, cujo tratamento comprometeria a caracterização da amostra. Foi optado por não se realizar novamente este ensaio, uma vez que o período de repouso reduzido destas condições se encontra em um ponto de redundância com a temperatura de 15° C e 270 s, conforme indica o Quadro 7.

No Quadro 9 são resumidas as informações de ensaio relativas aos deslocamentos aplicados nas curvas da Figura 44.

Quadro 9 – Dados de deformação solicitante, variação de dano e variação de número de ciclos nos períodos de repouso aplicados para mistura 13213

T		30°C								
PR		270 s			30 s			10 s		
C		ϵ [μ]	ΔS	ΔN	ϵ [μ]	ΔS	ΔN	ϵ [μ]	ΔS	ΔN
0,9		140	2805	26	130	2345	1	155	359	0
0,8		185	6065	26	190	5781	36	200	3074	26
0,7		295	12209	246	20	9642	166	255	10886	716
0,6		290	17112	946	280	12939	516	250	9827	1596
0,5		290	18779	1616	280	14197	670	250	4115	29
0,4		290	20944	1586	280	15616	676	250	15641	4506

T		20° C					
PR		270 s			30 s		
C		ϵ [μ]	ΔS	ΔN	ϵ [μ]	ΔS	ΔN
0,9		185	5352	36	187	7894	46
0,8		200	11755	166	200	12039	66
0,7		240	12674	408	260	17835	296
0,6		240	18286	837	260	18782	136
0,5		240	20790	816	260	21553	97
0,4		240	20135	496	260	20749	46
0,3		240	21612	456	260	20099	55

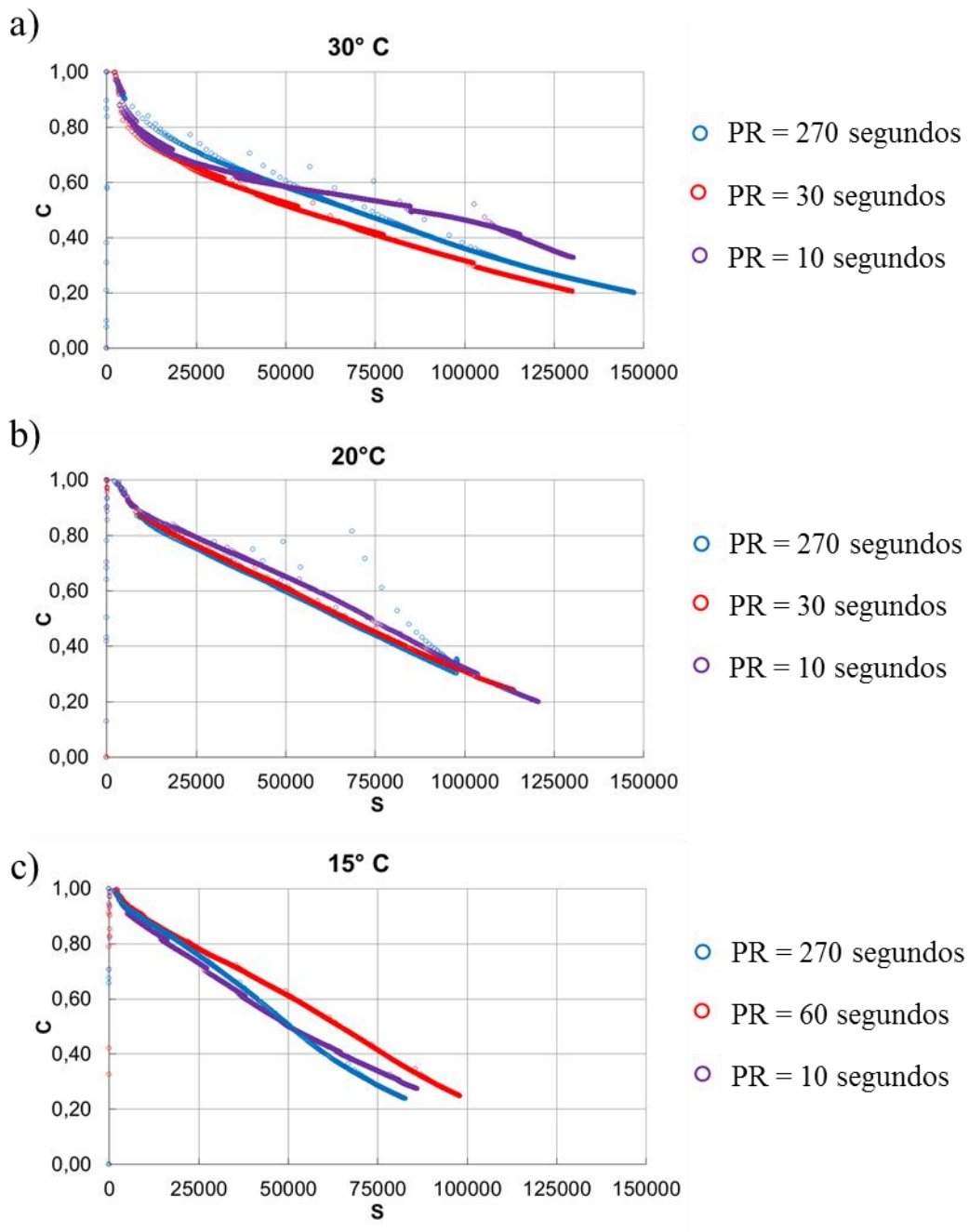
T		15° C								
PR		270 s			60 s			10 s		
C		ϵ [μ]	ΔS	ΔN	ϵ [μ]	ΔS	ΔN	ϵ [μ]	ΔS	ΔN
0,9		155	4830	146	150	6792	366	150	2694	26
0,8		190	11368	896	190	12977	1666	160	3547	0
0,7		200	16403	1286	200	16055	2116	170	4160	3
0,6					200	15624	1186	170	6919	406
0,5					200	15551	396	170	6275	56
0,4					200	15704	136	170	10402	156
0,3					200	15159	86	170	10329	106

4.1.3 Mistura 11885

A Figura 45 apresenta os deslocamentos das curvas de ensaio (Anexo C) para mistura 11885.

Figura 45 – Resultados de ensaio de curvas características de dano deslocadas a partir de variações de dano para mistura 11885.

- a) Períodos de Repouso de 270, 30 e 10 segundos em 30° C;
 b) Períodos de Repouso de 270 e 30 segundos em 20° C;
 c) Períodos de Repouso de 270, 60 e 10 segundos em 15° C.



Fonte: o Autor (2018)

No Quadro 10 são resumidas as informações de ensaio relativas aos deslocamentos aplicados nas curvas da Figura 45.

Quadro 10 – Dados de deformação solicitante e variação de dano e número de ciclos nos períodos de repouso aplicados para mistura 11885

T		30°C								
PR	270 s			30 s			10 s			
C	ϵ [μ]	ΔS	ΔN	ϵ [μ]	ΔS	ΔN	ϵ [μ]	ΔS	ΔN	
0,9	145	5695	295	100	5002	35	135	4075	225	
0,8	320	12650	370	240	8284	70	200	7173	405	
0,7	345	22318	680	310	18894	250	200	15015	2875	
0,6	330	30717	1870	300	24857	1240	200	11778	13355	
0,5	330	36286	3710	300	29792	3820	200	6760	39215	
0,4	330	42573	5480	300	29385	7970	200	16637	60355	
0,3	330	49629	7710	300	10301	11730				
T		20°C								
PR	270 s			30 s			10 s			
C	ϵ [μ]	ΔS	ΔN	ϵ [μ]	ΔS	ΔN	ϵ [μ]	ΔS	ΔN	
0,9	155	4810	65	190	4882	115	205	9	185	
0,8	260	15123	400	260	18632	580	250	14077	1311	
0,7	250	21705	1430	250	19122	1800	250	17149	3441	
0,6	250	27565	2670	250	19800	3310	250	15990	5271	
0,5	250	34257	3620	250	25116	4310	250	19858	6291	
0,4	250	38397	4640	250	30332	5530	250	28511	7001	
0,3	250	34794	5660	250	10682	6950	250	14381	7891	
0,2							250	9112	8636	
T		15°C								
PR	270 s			60 s			10 s			
C	ϵ [μ]	ΔS	ΔN	ϵ [μ]	ΔS	ΔN	ϵ [μ]	ΔS	ΔN	
0,9	150	3791	1785	150	7998	1885	150	3731	575	
0,8	180	7477	4565	180	5411	5415	180	4660	2785	
0,7	180	8186	6205	180	5573	10285	180	4452	5535	
0,6	180	9626	7255	180	6344	14615	180	5754	7565	
0,5	180	10564	7865	180	6639	17615	180	6134	10485	
0,4	180	13444	8415	180	6835	19345	180	6445	15555	
0,3	180	13930	10035	180	7377	21745	180	4450	21665	

4.1.4 Análises e comparações

Observando alguns dos casos ora apresentados, particularmente na Figura 43.b), identifica-se divergência no comportamento avaliado para cada uma das condições naquela temperatura. Estas variações de tendência são naturais em ensaios com grande número de ciclos, como é o

caso dos ensaios de fadiga em que variações entre corpos de prova são amplificadas. Contudo, estes ensaios não serão descartados pois não possuem sinais de erro experimental, apenas possíveis variabilidades de amostra. Estas diferenças entre amostras são estatisticamente esperadas e, embora conduzam a dados com maior dispersão, a inclusão dessas informações leva a modelos com maior representatividade.

4.2 MODELAGEM DE C vs S COM DESLOCAMENTO

Conforme apresentado na descrição da metodologia, a definição do estado de *healing* das misturas em cada ponto passa pela modelagem da curva de dano característica deslocada. Esta manipulação é realizada sobre a premissa de que a curva de dano característica é unívoca na descrição da integridade. Embora os resultados identifiquem evoluções de integridade em taxas distintas antes e após períodos de repouso e os deslocamentos em S resultem em uma região de valores distintos de integridade para um mesmo S , esta região pode ter seus valores convertidos (ou projetados) na curva original através da evolução da integridade pelo número de ciclos (Equação (43)).

Para tanto, utiliza-se o modelo ora apresentado (Equação (42)) representando o comportamento das curvas apresentadas na sessão 4.1, calibrando-se as constantes C_{11} e C_{12} . Esta calibração pode, por exemplo, ser realizada através do método dos erros mínimos quadráticos. Para o modelo adotado, as constantes podem ser obtidas algebricamente e, portanto, este foi o método utilizado.

4.2.1 Mistura 10148

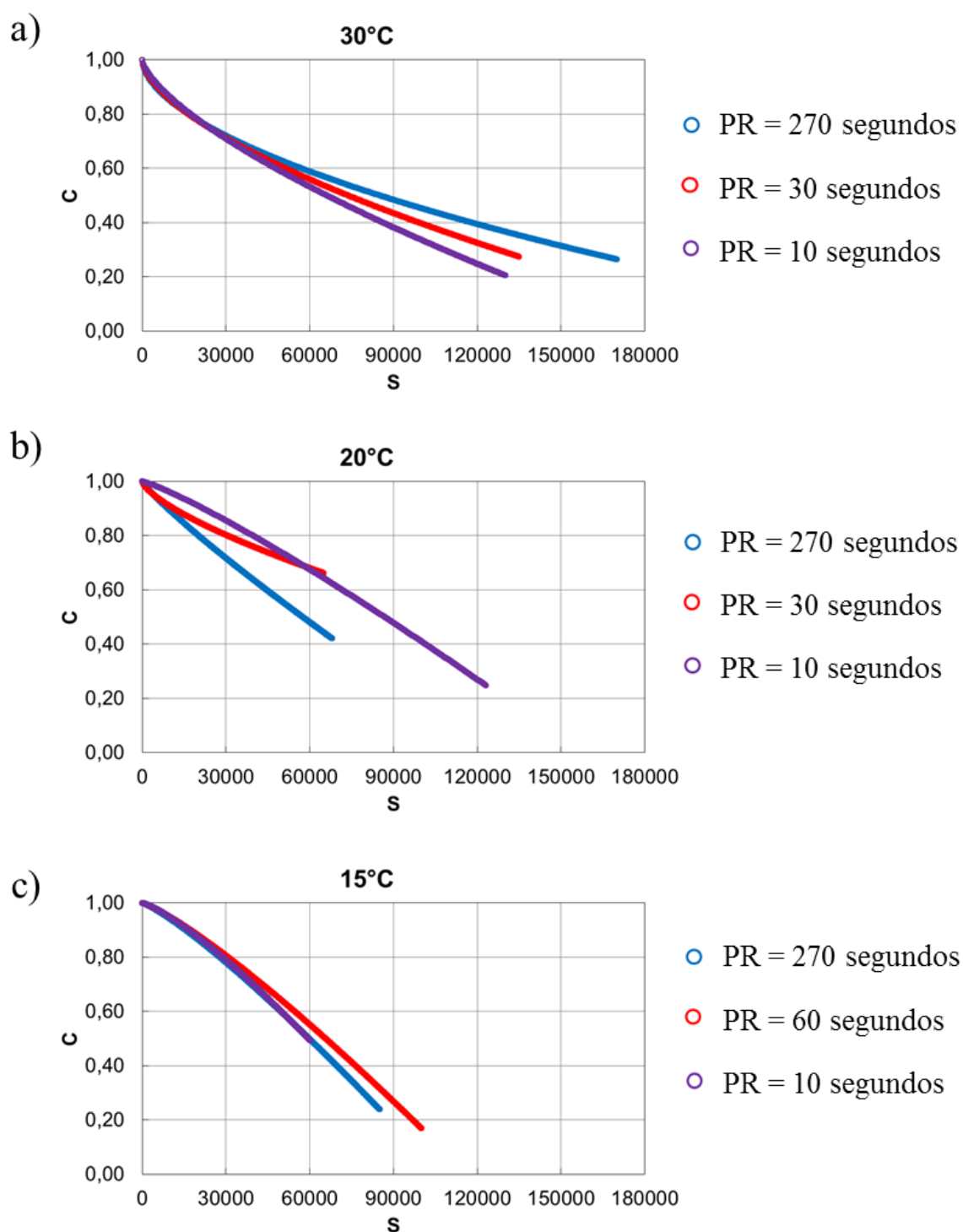
A modelagem aplicada às curvas da Figura 43 gera o grupo de constantes presentes no Quadro 11.

Quadro 11 – Constantes de modelagem das curvas de dano característica deslocadas para mistura 10148

T	PR	C11	C12
30°C	270 s	9,14E-04	5,68E-01
	30 s	3,11E-03	4,68E-01
	10 s	5,56E-03	4,00E-01
20°C	270 s	1,64E-04	7,25E-01
	30 s	1,14E-04	7,55E-01
	10 s	3,08E-05	8,67E-01
15°C	270 s	1,05E-05	9,93E-01
	60 s	2,00E-05	9,15E-01
	10 s	9,70E-05	7,88E-01

Estas constantes geram as aproximações modeladas da Figura 46.

Figura 46 – Resultados da modelagem das curvas características de dano deslocadas
 - mistura 10148. a) Períodos de Repouso de 270, 30 e 10 segundos em 30° C;
 b) Períodos de Repouso de 270, 30 e 10 segundos em 20° C;
 c) Períodos de Repouso de 270, 60 e 10 segundos em 15° C.



Fonte: o Autor (2018)

4.2.2 Mistura 13213

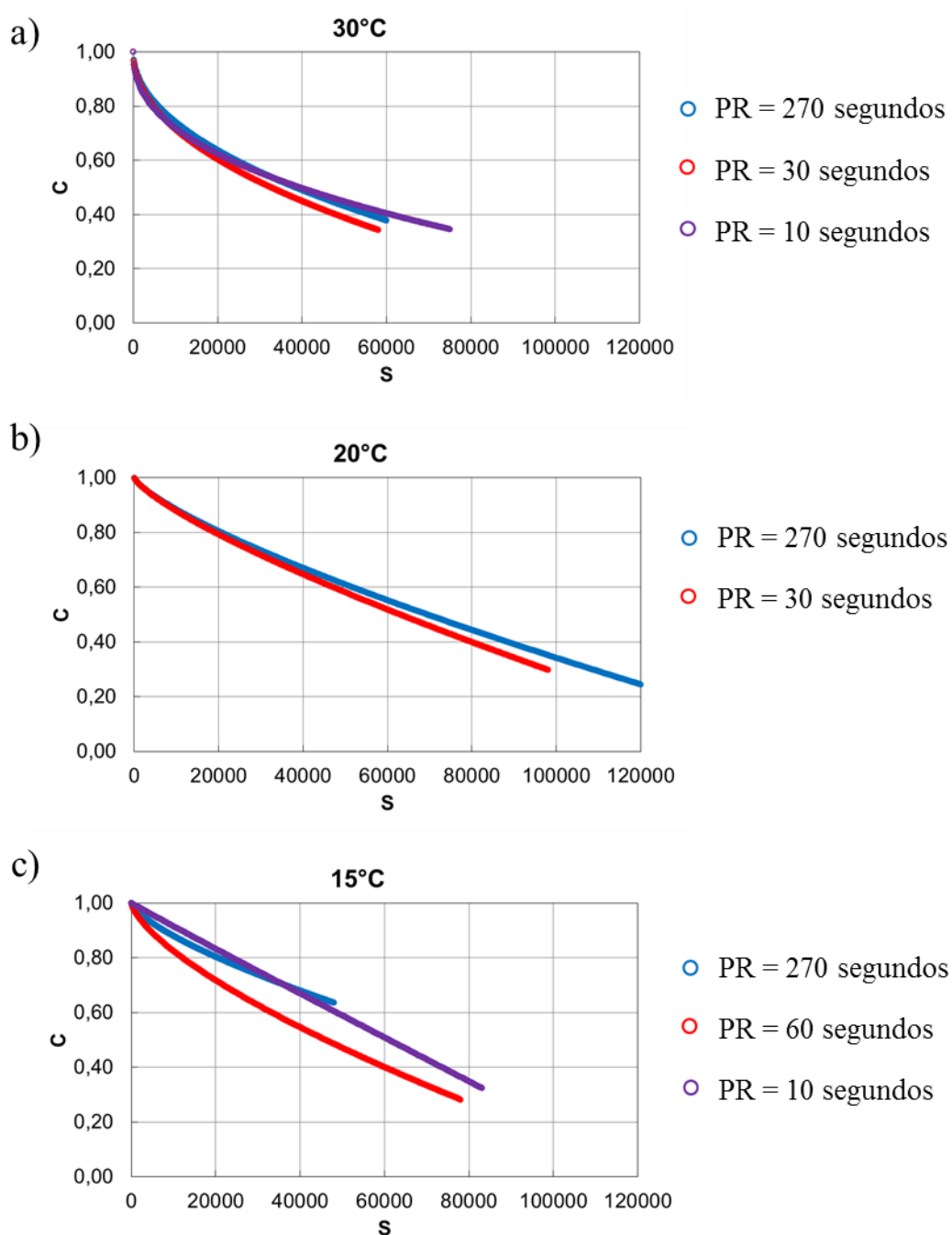
A modelagem aplicada às curvas da Figura 44 gera o grupo de constantes presentes no Quadro 12.

Quadro 12 – Constantes de modelagem das curvas de dano característica deslocadas para mistura 13213

T	PR	C11	C12
30°C	270 s	2,83E-03	4,90E-01
	30 s	3,62E-03	4,74E-01
	10 s	5,97E-03	4,18E-01
20°C	270 s	1,11E-04	7,55E-01
	30 s	1,03E-04	7,68E-01
15°C	270 s	1,78E-04	7,07E-01
	60 s	3,18E-04	6,86E-01
	10 s	1,02E-05	9,80E-01

Estas constantes geram as aproximações modeladas da Figura 47.

Figura 47 – Resultados da modelagem das curvas características de dano deslocadas - mistura 13213. a) Períodos de Repouso de 270, 30 e 10 segundos em 30° C; b) Períodos de Repouso de 270 e 30 segundos em 20° C; c) Períodos de Repouso de 270, 60 e 10 segundos em 15° C.



Fonte: o Autor (2018)

4.2.3 Mistura 11885

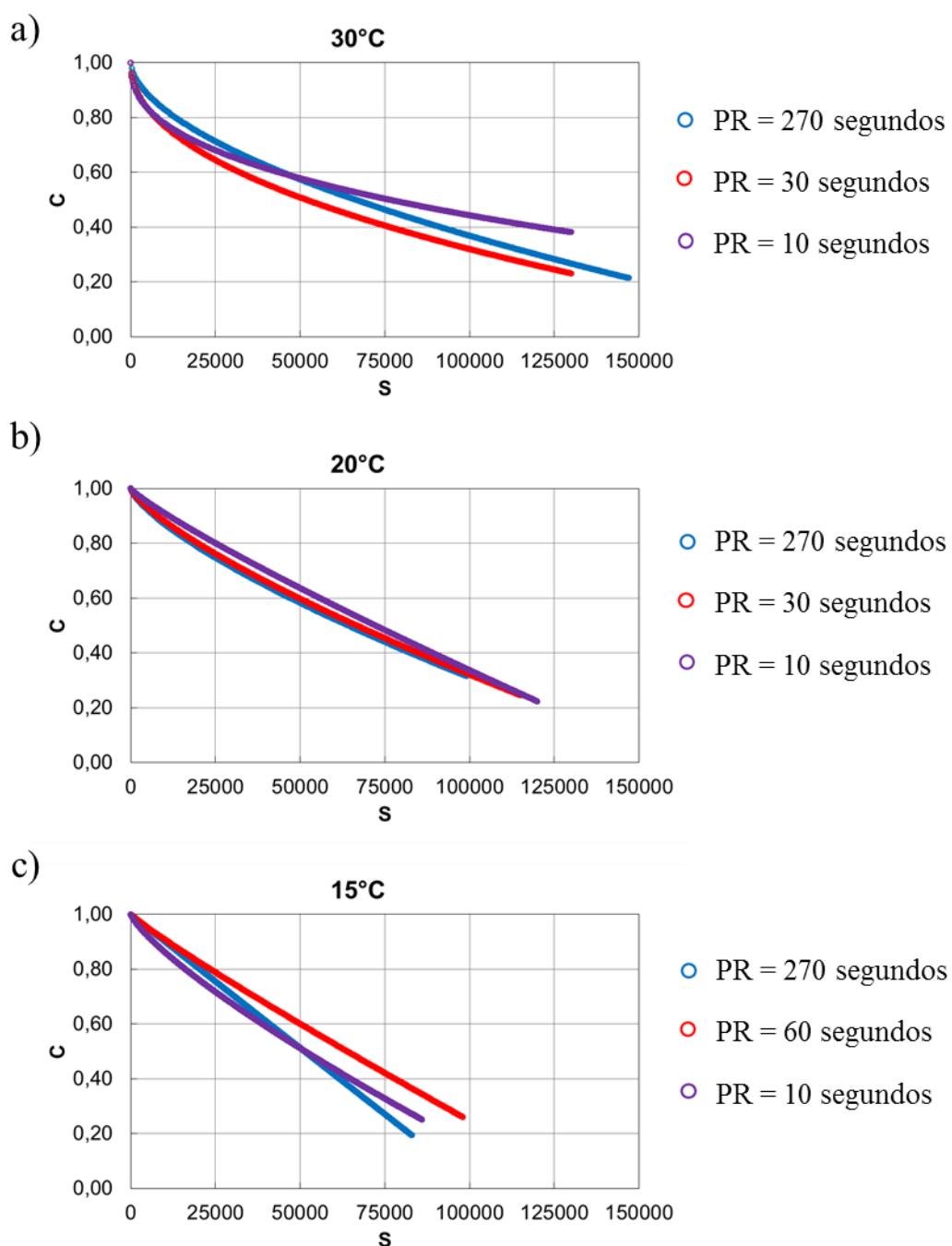
A modelagem aplicada às curvas da Figura 45 gera o grupo de constantes presentes no Quadro 13.

Quadro 13 – Constantes de modelagem das curvas de dano característica deslocadas para mistura 11885.

T	PR	C11	C12
30°C	270 s	9,14E-04	5,68E-01
	30 s	3,11E-03	4,68E-01
	10 s	5,56E-03	4,00E-01
20°C	270 s	1,64E-04	7,25E-01
	30 s	1,14E-04	7,55E-01
	10 s	3,08E-05	8,67E-01
15°C	270 s	1,05E-05	9,93E-01
	60 s	2,00E-05	9,15E-01
	10 s	9,70E-05	7,88E-01

Estas constantes geram as aproximações modeladas da Figura 48.

Figura 48 – Resultados da modelagem das curvas características de dano deslocadas - mistura 11885. a) Períodos de Repouso de 270, 30 e 10 segundos em 30° C; b) Períodos de Repouso de 270, 30 e 10 segundos em 20° C; c) Períodos de Repouso de 270, 60 e 10 segundos em 15° C.



Fonte: o Autor (2018)

4.3 MODELAGEM DE *HEALING*

As informações coletadas até então formam a base para a avaliação das propriedades de regeneração de cada mistura. Neste item serão expostos os dados tratados a partir das informações obtidas e das observações realizadas com os resultados ora apresentados.

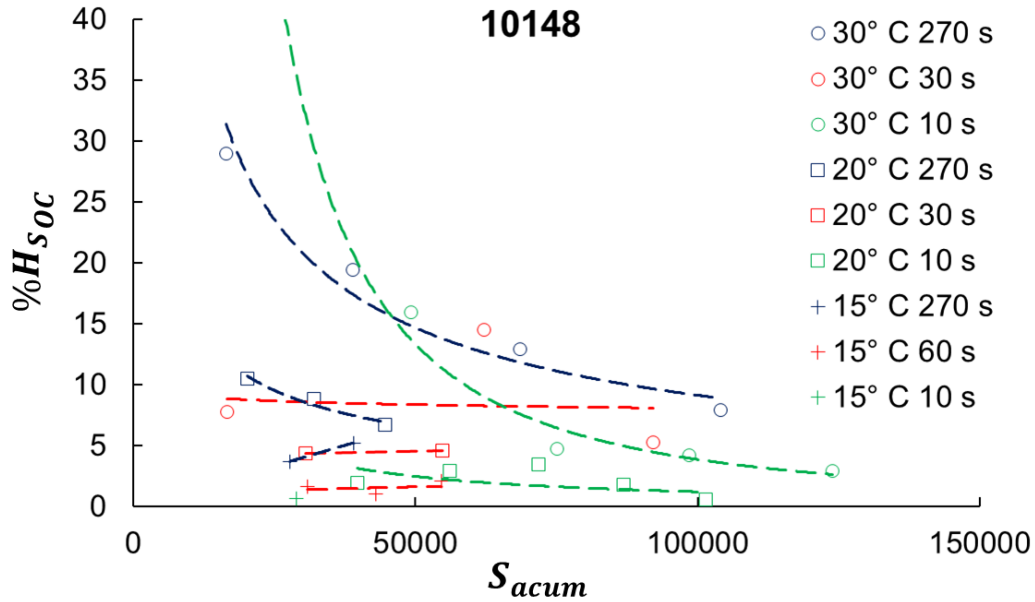
Esta análise remete a sessão 3.3.2, onde é apresentado o índice de *healing* ($\%H_{SOC}$) e a variável de estado de *healing* (H) aqui aplicados

4.3.1 Índice de *Healing* das misturas avaliadas

Conforme mencionado anteriormente, o cálculo dos índices de regeneração será realizado sobre as alterações na variável de estado de dano, com as adaptações descritas na sessão de procedimentos. Estas adaptações atuam de forma a calcular o índice de regeneração sobre a curva deslocada de dano, utilizada como base para descrever o comportamento de recuperação de integridade do material.

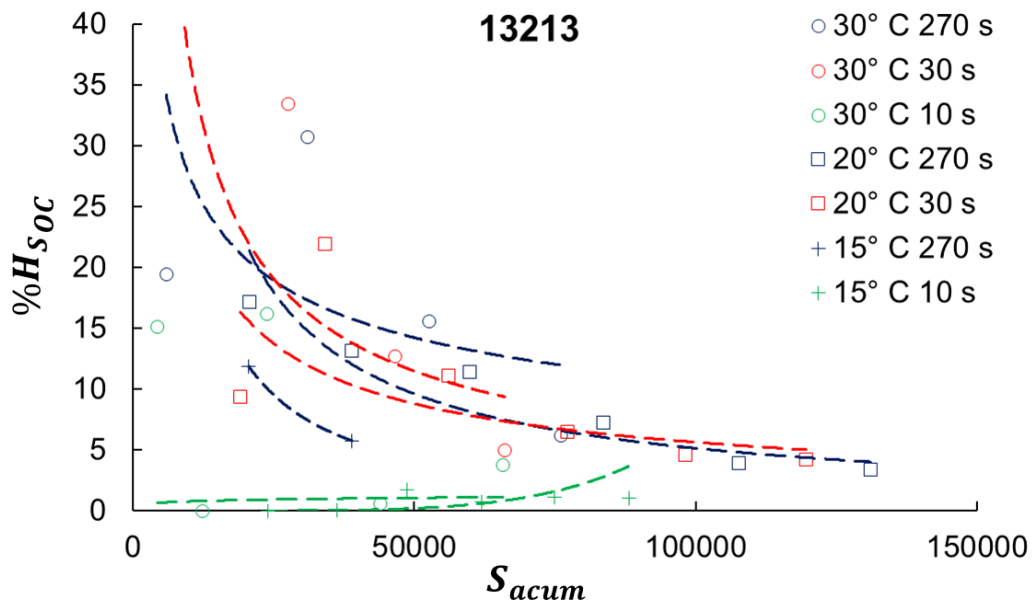
As Figuras 49, 50 e 51 apresentam os valores do índice de regeneração adotado ($\%H_{SOC}$) em função da variável de dano recuperado acumulado (S_{acum}) para cada uma das condições de ensaio nos vários momentos de aplicação de períodos de repouso para as misturas avaliadas.

Figura 49 – Índices de regeneração vs variável de dano recuperado acumulado para mistura 10148.



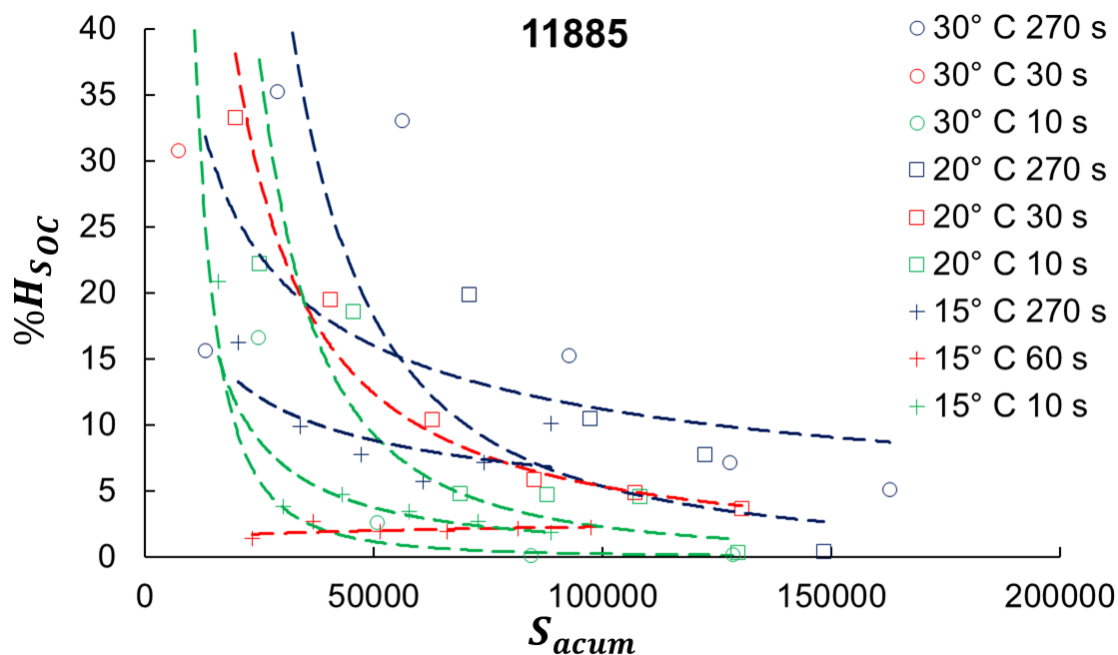
Fonte: o Autor (2018)

Figura 50 – Índices de regeneração vs variável de dano recuperado acumulado para mistura 13213.



Fonte: o Autor (2018)

Figura 51 – Índices de regeneração vs variável de dano recuperado acumulado para mistura 11885.



Fonte: o Autor (2018)

Estes dados refletem o comportamento da capacidade de regeneração de cada mistura em função de sua variação de dano, temperatura de ensaio e período de repouso. Conforme previsto, à exceção de alguns outliers, os índices de regeneração são maiores para temperaturas maiores, períodos de repouso maiores e menores valores de S_{acum} . Estas observações estão de acordo com as expectativas e previsões geradas pela revisão bibliográfica.

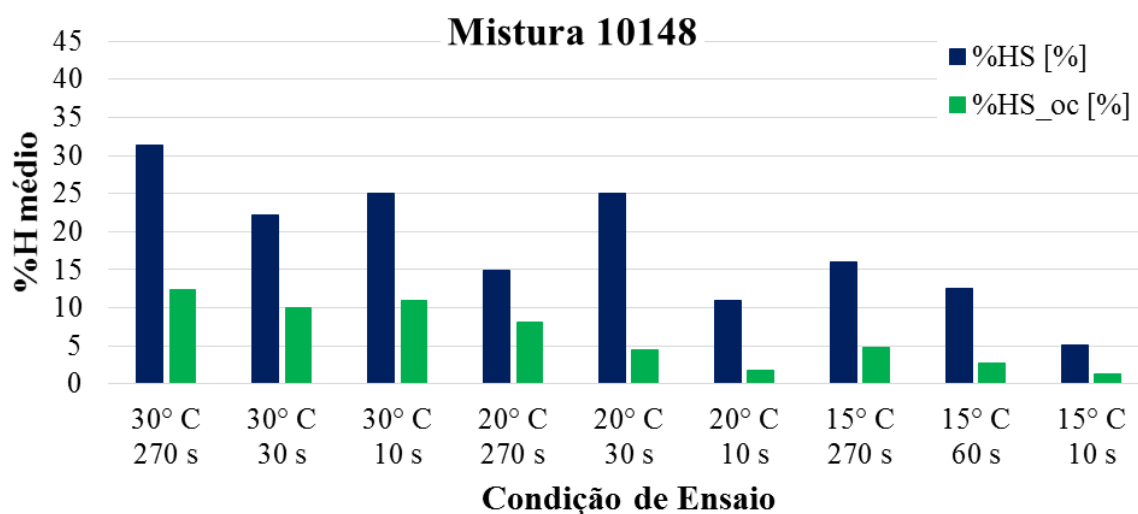
Neste instante cabe a comparação entre os índices de regeneração, observando-se que a utilização do índice de regeneração calculado sobre a curva deslocada ($\%H_{Soc}$) gera valores menores que os índices de regeneração calculados simplesmente pela variação de dano ($\%H_S$). O Quadro 14 apresenta o valor médio e desvio padrão observados entre os dois índices mencionados para os ensaios realizados.

Quadro 14 – Quadro resumo de valores médios e desvio padrão para índice de regeneração calculado sobre a curva original (%HS) e sobre curva deslocada (%HS_oc).

Mistura	10148				13213				11885			
	%HS [%]		%HS _{oc} [%]		%HS [%]		%HS _{oc} [%]		%HS [%]		%HS _{oc} [%]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
30° C 270 s	31,3	17,8	12,4	9,5	40,9	18,9	22,5	11,9	36,4	17,3	18,6	11,7
30° C 30 s	22,3	9,8	10,0	9,9	41,0	23,4	27,6	16,1	29,1	23,2	19,4	14,0
30° C 10 s	25,0	17,0	11,0	11,1	37,6	27,1	7,1	7,1	28,1	21,4	13,0	17,4
20° C 270 s	15,0	4,3	8,1	1,3	22,2	11,5	9,4	5,0	33,4	17,7	22,4	19,0
20° C 30 s	25,1	5,8	4,5	0,1	23,7	12,3	9,6	6,0	28,9	23,2	12,9	10,5
20° C 10 s	10,9	3,5	1,8	1,2	-	-	-	-	21,9	17,2	8,3	7,9
15° C 270 s	16,0	5,7	4,8	3,0	37,9	6,8	8,8	3,1	17,3	6,7	9,5	3,4
15° C 60 s	12,5	3,2	2,8	1,6	-	-	-	-	9,5	4,0	2,1	0,4
15° C 10 s	5,1	3,7	1,3	1,3	10,4	2,1	0,8	0,6	11,2	6,1	6,2	6,6

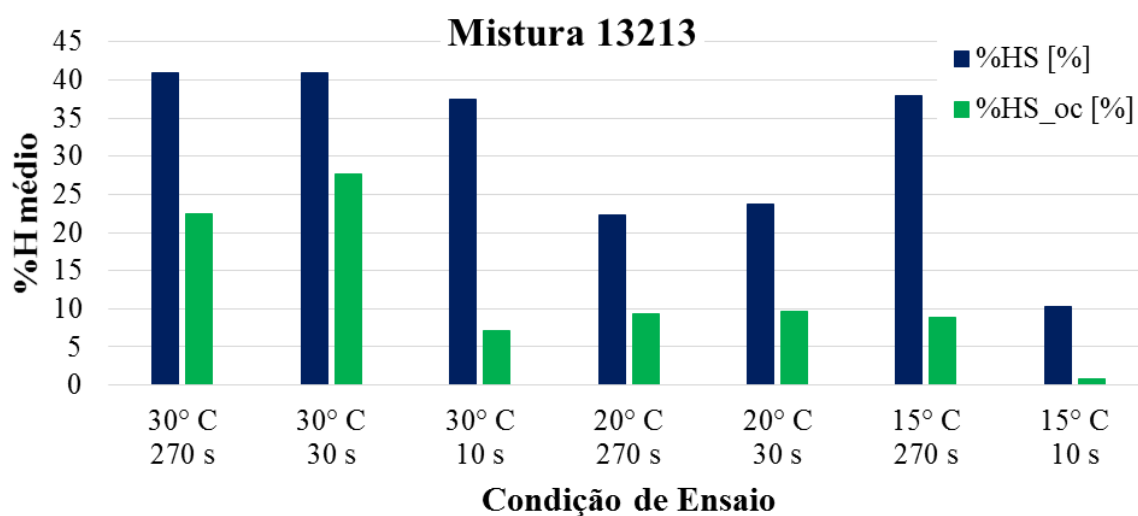
Os valores médios são apresentados de maneira gráfica para cada uma das misturas e condições, nas Figuras 52, 53 e 54, onde evidencia-se a diferença.

Figura 52 – Valores médios de índices de regeneração para mistura 10148.



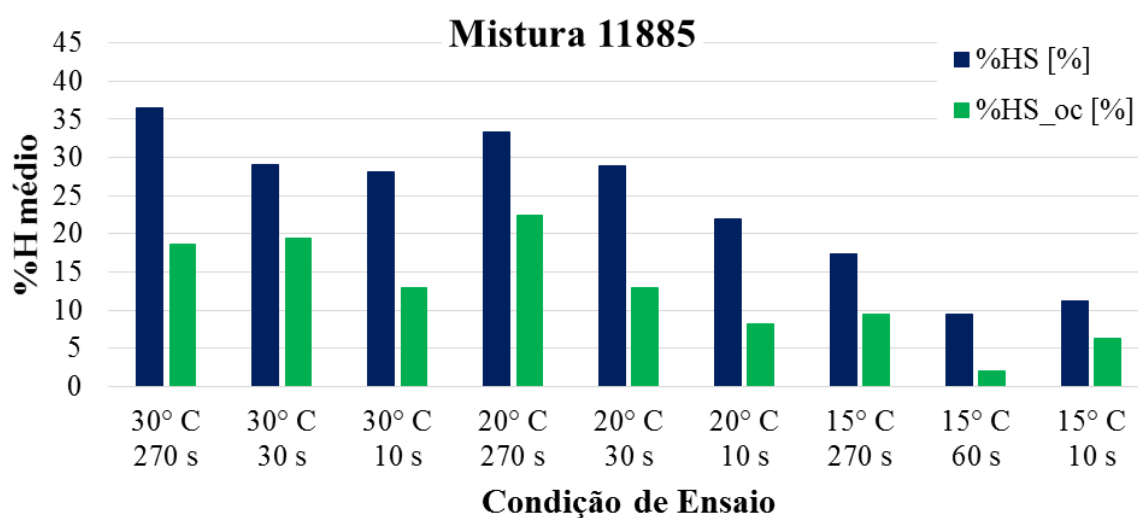
Fonte: o Autor (2018)

Figura 53 – Valores médios de índices de regeneração para mistura 13213.



Fonte: o Autor (2018)

Figura 54 – Valores médios de índices de regeneração para mistura 11885.



Fonte: o Autor (2018)

A comparação entre valores médios para condições diferentes deve ser feita com cuidado, uma vez que médias superiores podem ser resultado de um ensaio finalizado em região de maiores índices, retirando assim os valores menores de índice de regeneração do cálculo e resultando em valores médios maiores. A avaliação da capacidade de regeneração de cada mistura será

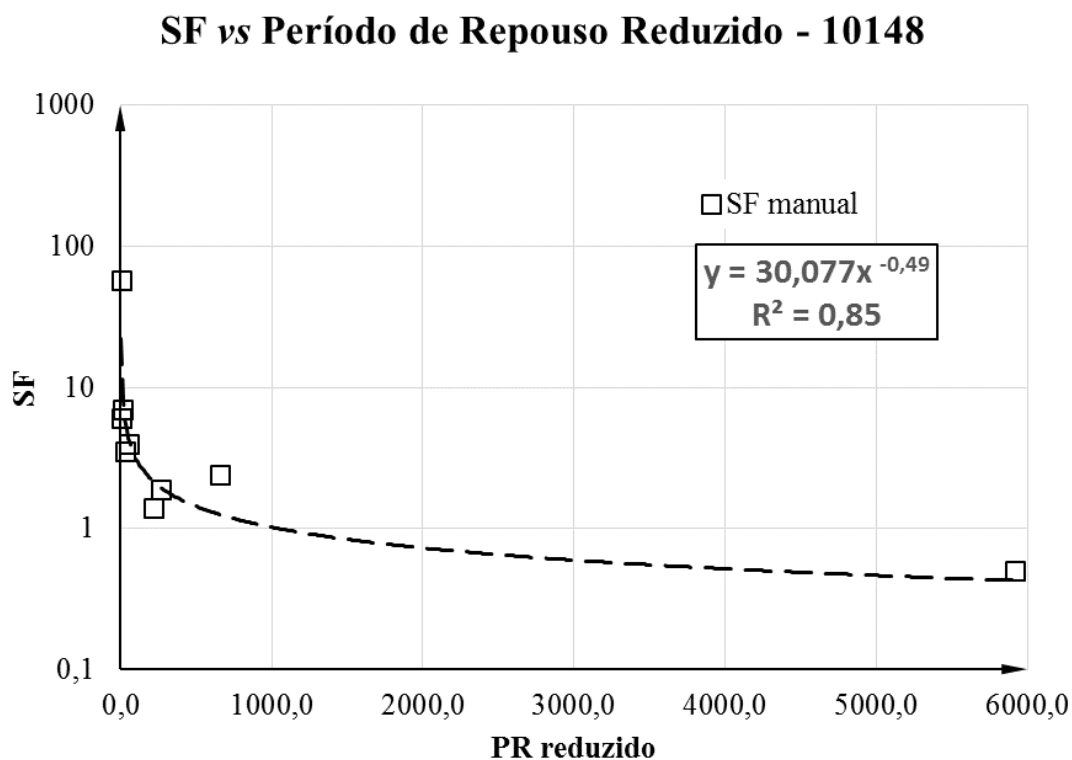
estudada na sessão de comparações após a modelagem das curvas mestras de *healing*, que oferecem um espaço mais adequado para avaliações.

4.3.2 Curva Mestre de *Healing*

As curvas mestras de *healing*, conforme apresentado na sessão de metodologia deste trabalho, são obtidas inicialmente através da otimização manual dos valores de SF (Equação (48)) que potencializam os deslocamentos de S_{acum} em direção a formar uma curva única com formato de potência decrescente e valor de correlação tão alto quanto possível. Uma vez determinados os valores manuais de SF, estes passam a ser modelados através da calibração das constantes α e β que irão descrever o comportamento de SF para qualquer condição de temperatura e período de repouso desejados.

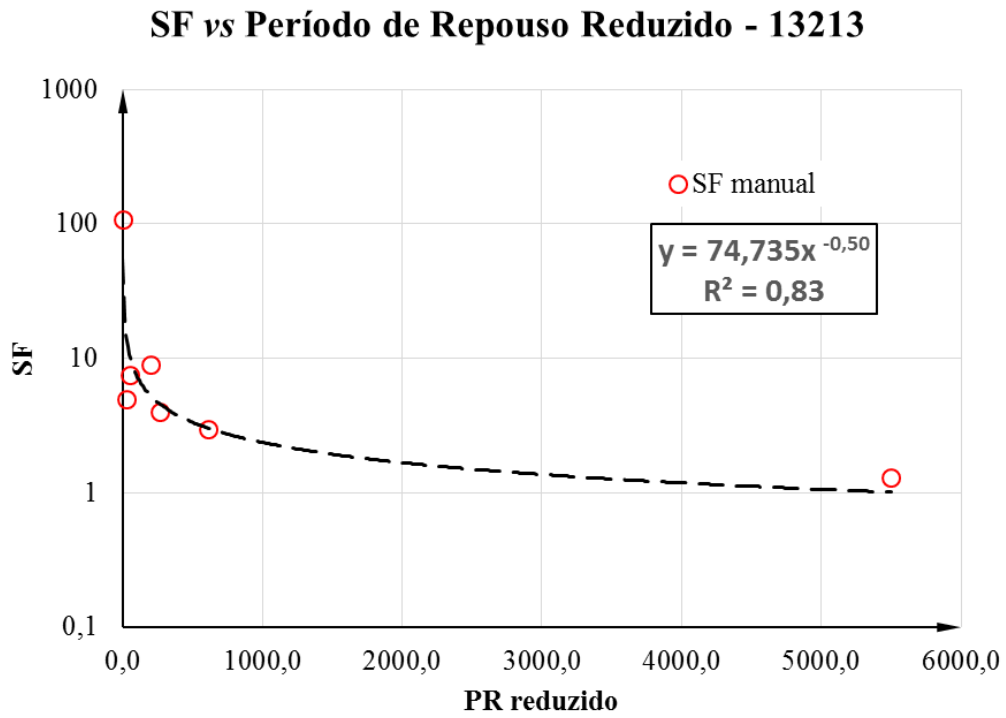
A calibração destes valores é apresentada nas Figuras 55, 56 e 57.

Figura 55 – Modelagem de SF para mistura 10148.



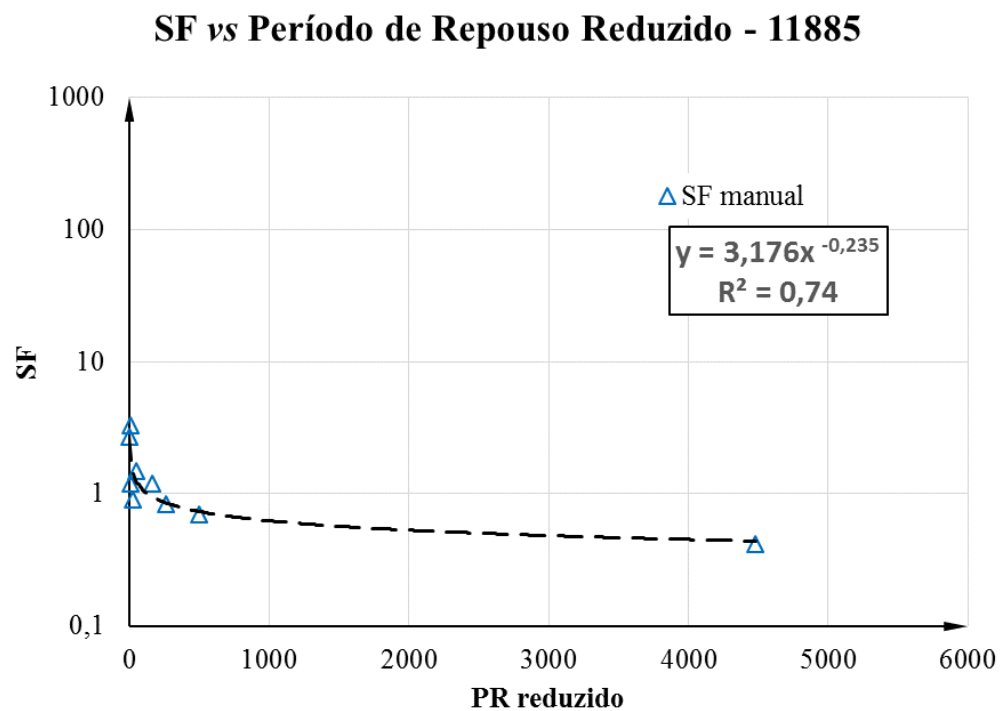
Fonte: o Autor (2018)

Figura 56 – Modelagem de SF para mistura 13213.



Fonte: o Autor (2018)

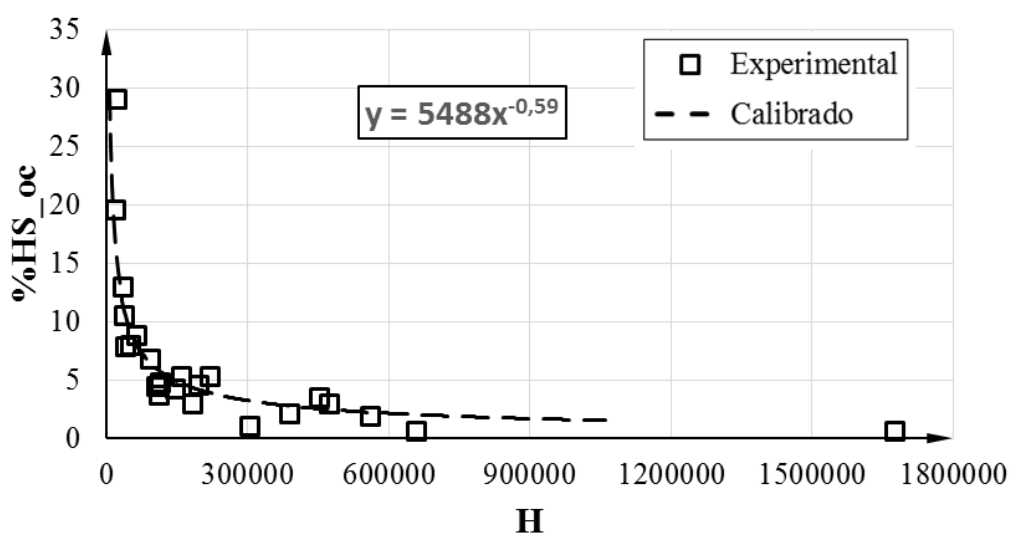
Figura 57 – Modelagem de SF para mistura 11885.



Fonte: o Autor (2018)

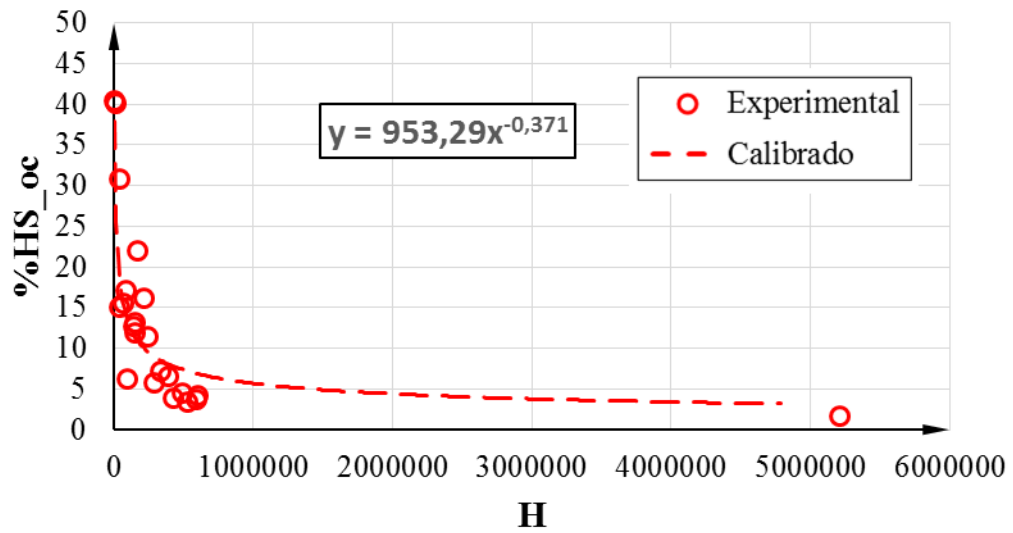
Com a modelagem dos SF, conclui-se a etapa de caracterização da variável de estado de *healing*, que é definida pelo produto simples de SF e S_{accum} . Assim, as Figuras 58, 59 e 60 apresentam as curvas mestras calibradas através da minimização do erro quadrático entre índice de *healing* experimental e calibrado das misturas 10148, 13213 e 11885, respectivamente. É importante observar que os valores experimentais apresentados são fruto do deslocamento manual.

Figura 58 – Curva Mestre de *healing* calibrada para mistura 10148.



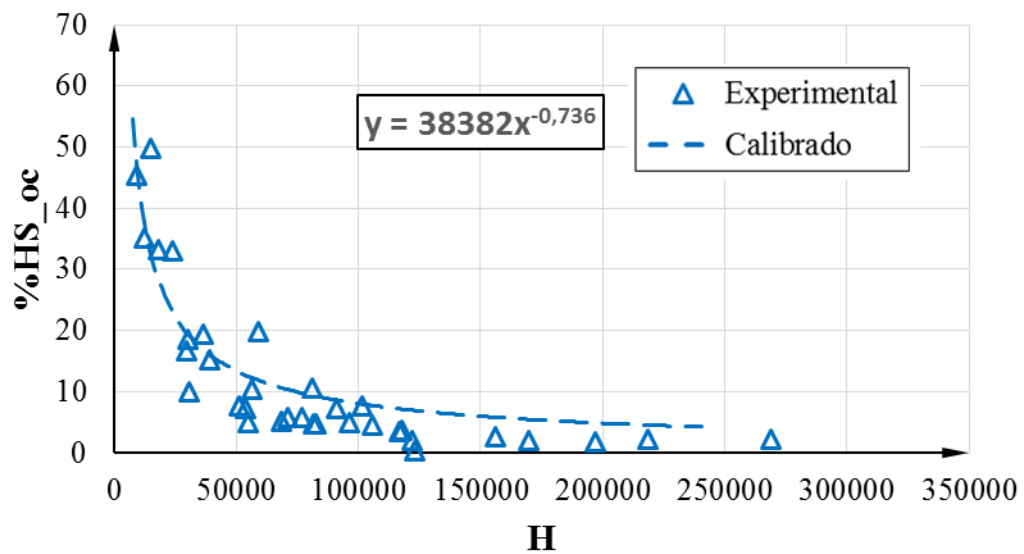
Fonte: o Autor (2018)

Figura 59 – Curva Mestre de *healing* calibrada para mistura 13213.



Fonte: o Autor (2018)

Figura 60 – Curva Mestre de *healing* calibrada para mistura 11885.



Fonte: o Autor (2018)

O Quadro 15 sumariza as constantes de calibração utilizadas na construção das figuras apresentadas.

Quadro 15 – Constantes de calibração do modelo proposto de *healing* para as misturas avaliadas.

MISTURA		10148	13213	11885
Constantes de calibração	A	5488	953	38382
	B	0,59	0,371	0,736
	α	30,077	74,735	3,176
	β	0,49	0,50	0,235

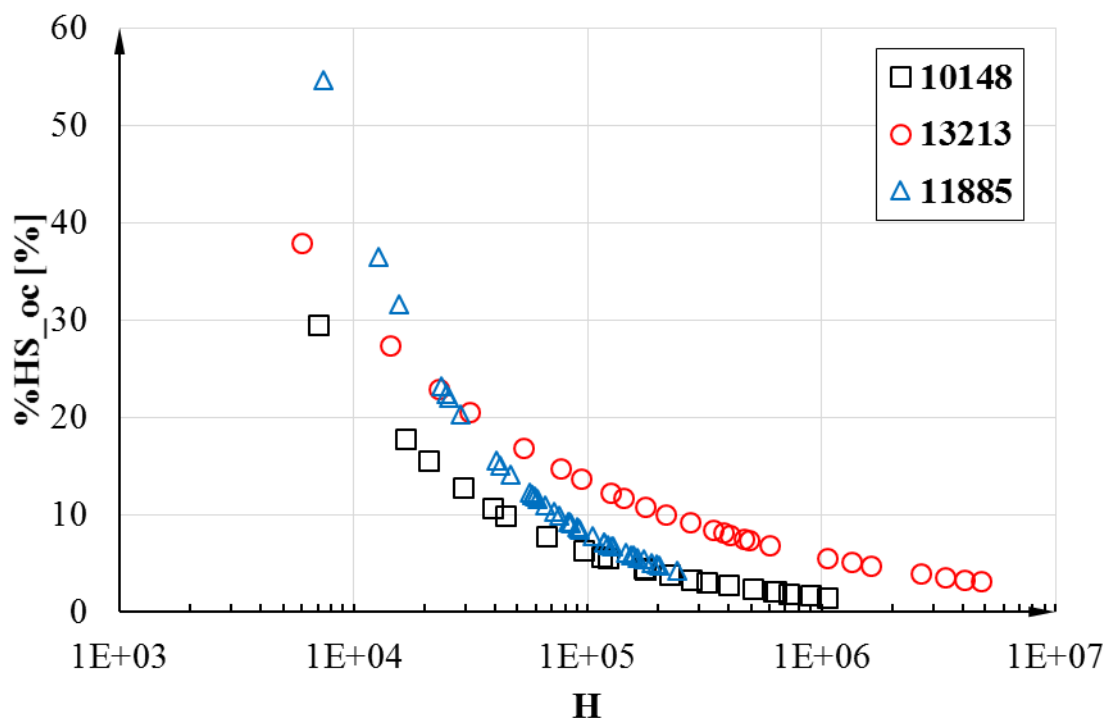
As modelagens realizadas nesta sessão receberam o tratamento de alguns dos resultados de ensaio, retirando-se principalmente pontos de índice de regeneração após a ruptura dos corpos de prova e pontos com valores claramente fora de tendência. Estas remoções de dados direcionaram os dados a um maior índice de correlação, com uma tendência mais clara, favorecendo a modelagem dos dados e calibração dos modelos.

4.3.3 Análises e comparações

A variável de estado de *healing* (H) é um parâmetro que, a partir da temperatura do material, do período de repouso aplicado e do histórico de dano, quantifica a condição atual de regeneração daquele material. A descrição da capacidade de regeneração do material através desta variável gera um espaço adequado para comparações de comportamento, embora sua dependência de três parâmetros possa tornar essa avaliação pouco intuitiva.

Desta forma, a Figura 61 apresenta o comportamento completo do índice de regeneração proposto calibrado para as três misturas avaliadas, no espaço da variável proposta. Esta figura apresenta os comportamentos no espaço de definição definido a partir dos limites de dano recuperado obtidos nos ensaios de cada mistura.

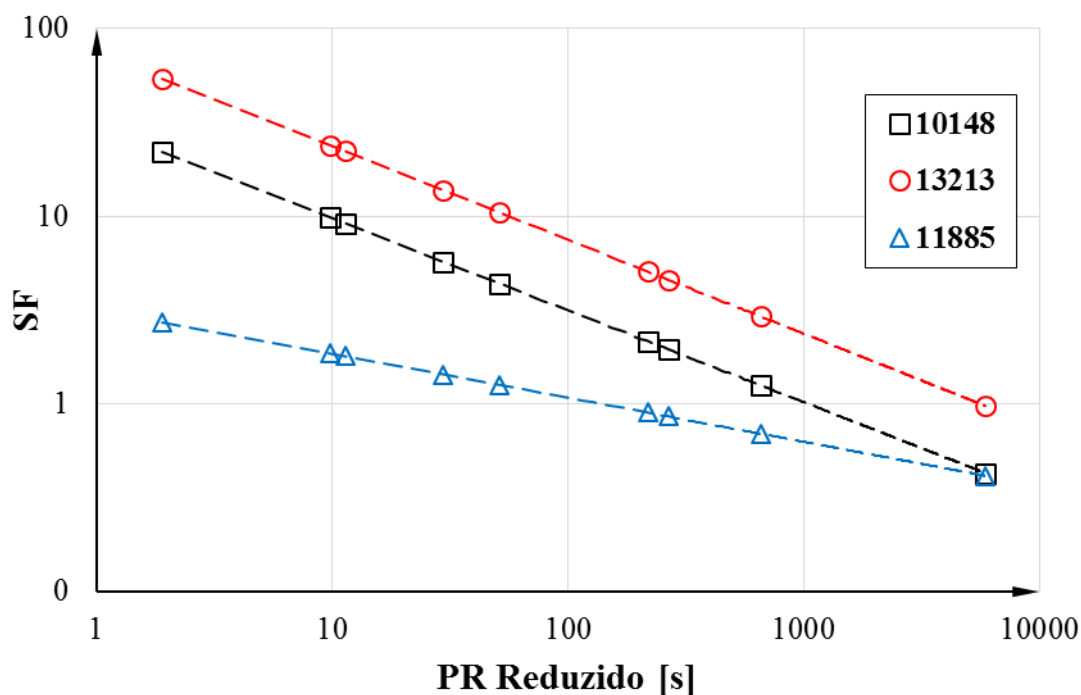
Figura 61 – Curvas Mestras de *healing* calibradas das misturas 10148, 13213 e 11885.



Fonte: o Autor (2018)

A partir desta análise, verifica-se que o comportamento das três misturas difere em termos de valores máximos e mínimos obtidos, taxa de evolução e espaço de definição. Em termos de valores máximos obtidos, os resultados encontrados se mostram bastante coerentes com a expectativa teórica, uma vez que a mistura 10148 (que possui o CAP mais rígido – 30/45) apresenta os menores valores de índice de regeneração e a mistura 11885 (com AMP elvaloy, 60/85) apresenta os maiores valores de índice de regeneração.

Quanto à taxa de evolução e o espaço em que a quantidade de dano recuperado limita a variável de estado de *healing*, a Figura 62 apresenta dados que justificam os comportamentos observados, ilustrando, no espaço log-log a evolução dos *SF* no espaço de período de repouso reduzido dos ensaios.

Figura 62 – Curvas de SF calibradas para as misturas 10148, 13213 e 11885.

Fonte: o Autor (2018)

Esta relação é importante, pois SF é o fator que relaciona o dano recuperado em cada período de repouso com a variável de estado H . Desta forma, curvas de SF com menores valores, definem menores espaços de H .

Isto pode ser observado através da mistura 11885 que possui H variando entre $7E+4$ e $2,5E+6$. O limite máximo desta mistura ser bastante inferior ao das outras misturas pode ser explicado pelo comportamento de SF no gráfico apresentado na Figura 62, que indica valores menores que o de ambas as outras misturas.

Seguindo adiante na análise da relação $SF - \%H_{SOC}$, identifica-se que valores menores de SF geram valores menores de H (para um mesmo estado de S_{acum}) e, conseqüentemente, geram maiores valores de $\%H_{SOC}$. Portanto, desconsiderando-se o efeito das características de evolução de dano de cada mistura, o gráfico calibrado de SF vs Período de repouso reduzido, permite uma avaliação inicial das misturas que possuem melhor desempenho regenerativo, referente a efeitos de temperatura e períodos de repouso.

Além dos valores absolutos apresentados no gráfico da Figura 62, a inclinação das curvas também apresenta informações relevantes. É importante lembrar, que as misturas 10148 e 13213 utilizam CAPs convencionais (30/45 e 50/70, respectivamente) enquanto a mistura 11885 utiliza AMP. O paralelismo entre as retas das misturas 10148 e 13213 (no espaço log-log), sugere a possibilidade de evoluções em taxas similares para misturas com CAPs convencionais. Além disso, as misturas com CAP convencional apresentam inclinações mais acentuadas, indicando maior suscetibilidade a variações de períodos de repouso e temperatura que a mistura com AMP.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho foi desenvolvido sob a compreensão de que o fenômeno de fadiga é uma das principais causas de deterioração em pavimentos asfálticos. Embora importante, sua descrição é complexa e a abordagem laboratorial empírica envolve ensaios que podem ser bastante longos e de alta variabilidade. O foco deste trabalho é na descrição da recuperação de módulo que ocorre em meio à ensaios cíclicos quando estes apresentam períodos de repouso.

Neste contexto, utilizou-se uma abordagem mecanística para o tratamento do fenômeno de recuperação de módulo ou, como tratado ao longo do trabalho, regeneração/*healing*. Este fenômeno leva a incrementos no número de ciclos necessários para levar o material à ruptura que, dependendo das condições em que são aplicados os períodos de repouso, podem ser bastante significativos.

A abordagem aplicada é baseada na mecânica do dano contínuo, através do modelo *S-VECD*, cujo desenvolvimento ora descrito leva aos seguintes apontamentos sobre os objetivos propostos:

- A adaptação do protocolo de ensaio uniaxial de fadiga à tração direta proposto pela normativa americana AASHTO TP 107 pode ser realizada com simplicidade e de maneira adequada, quanto à inserção de períodos de repouso em condições específicas de rigidez do material, através do monitoramento da mesma;
- A construção da curva de dano característica para o ensaio com períodos de repouso oferece os dados necessários para o cálculo de um índice de regeneração capaz de

quantificar adequadamente a capacidade de regeneração através da recuperação da variável de estado interno de dano (S);

- O protocolo proposto envolve variações de temperatura, período de repouso e histórico de dano do material. Para modelar o efeito destes parâmetros na capacidade de *healing* de misturas asfálticas, foi proposta uma variável de estado (H) que os relaciona, quantificando a capacidade instantânea de cada mistura. Esta relação é modelada utilizando-se o princípio da superposição tempo-Temperatura, ponderando a influência do dano recuperado através da sensibilidade de cada mistura a variações dos períodos de repouso reduzidos;
- As curvas mestras de *healing* apresentadas na sessão 4.3.2 modelam de maneira eficiente o comportamento do índice de regeneração em função dos parâmetros avaliados. A partir dos modelos calibrados apresentados, é possível prever o valor do índice de regeneração para qualquer combinação de temperatura, período de repouso e histórico de dano;
- As misturas calibradas a partir das constantes de SF e das constantes de $\%H_{SOC}$ apresentam comportamento descritivo satisfatório, aproximando adequadamente os dados previstos dos resultados observados. É importante notar que os dados experimentais a serem previstos tem sua otimização através de valores de SF obtidos manual e individualmente para cada condição de ensaio e que, portanto, o erro médio é aumentado ao utilizar valores de SF modelados em grupo. No entanto, a modelagem de SF possibilita a previsão do índice de regeneração em condições além das de ensaio.

A partir destas observações, identifica-se que o objetivo geral do trabalho foi atingido.

A seguir são apresentados apontamentos que vão além dos objetivos propostos, mas que foram considerados dignos de nota ou relevantes para evoluções desta pesquisa:

- Os critérios de inserção de períodos de repouso foram propostos sobre a suposição de que o estado de *healing* seria dependente do estado instantâneo de integridade. Entretanto esta suposição não se mostrou verdadeira, uma vez identificado que repousos de mesma duração, em uma mesma temperatura, aplicados repetidas vezes em uma mesma integridade possuíam tendências decrescentes de índice de

regeneração. A partir desta observação propôs-se modelar a variável de estado de *healing* pelo dano recuperado acumulado. Com base nesta modificação, propõe-se que em novas versões do protocolo sejam inseridos períodos de repouso em valores repetitivos de integridades de parada, a fim de se capturar este comportamento em integridades altas, médias e baixas;

- A inserção de períodos de repouso em reduções regulares de 10% do valor inicial da rigidez do material coloca muitos dos pontos de interesse em regiões pós-ruptura. Estes pontos foram identificados durante a análise como outliers na tendência regenerativa do material, gerando valores que contribuíram de forma negativa à calibração do modelo. Sugere-se para novas versões do protocolo a exploração de períodos de repouso inseridos em pontos prévios à ruptura, uma vez que esta é a região em que a capacidade de regeneração se manifesta de forma mais clara e em maior intensidade. É importante que estes pontos sejam numerosos para garantir a eficácia da calibração de constantes;
- A relação entre duração dos períodos de repouso e temperaturas aplicadas no ensaio foram o critério de escolha destes fatores, favorecendo um espectro amplo da grandeza chamada período de repouso reduzido. Contudo, nos casos de períodos de repouso reduzidos mais baixos, frutos da combinação de temperaturas baixas e períodos de repouso curtos, o efeito regenerativo foi pouco apreciável e redundantes entre as temperaturas de 20° C e 15° C, de forma que parte dos valores foram de pouca colaboração na calibração do modelo. Desta forma, sugere-se a alteração de alguma das temperaturas mais baixas para uma temperatura mais alta, capaz de contribuir com valores mais significativos à calibração. Esta alteração, no entanto, deve ser feita cautelosamente para que não se atinja um valor em que o acúmulo de deformações permanentes passe a ser expressivo;
- A abordagem mecânica do efeito de regeneração resulta em um modelo cuja aplicação vai além das condições de ensaio. Isto significa que um modelo bem calibrado através de repouso do tipo *group-rest* pode ser utilizado na previsão de respostas em *pulse-rest*. Ensaio com repouso do tipo *pulse-rest* são significativamente mais demorados, especialmente em baixos níveis de deformação onde o acúmulo de dano ocorre de maneira bastante lenta. Sendo assim, simulações

através de modelos bem calibrados podem ser importantes ferramentas na previsão de resposta de pavimentos em carregamentos com períodos de repouso intermitentes à solicitações, estimando o acréscimo no número de ciclos até a ruptura, decorrente de períodos de repouso;

- Nas próximas etapas desta pesquisa propõem-se: verificação dos critérios de ruptura através da energia dissipada; validação do modelo através de ensaios com aplicação de repousos aleatórios; testes em campo; e calibração de misturas brasileiras com previsão de desempenho através de perfis de carregamento.

REFERÊNCIAS

- ABU AL-RUB, R. K. et al. A micro-damage healing model that improves prediction of fatigue life in asphalt mixes. *International Journal of Engineering Science*, [s. l.], v. 48, n. 11, p. 966–990, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijengsci.2010.09.016>>
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. Proposed standard method of test for determining the damage characteristic curve of asphalt concrete from direct tension cyclic fatigue tests: TP 107-14. Washington: AASHTO, 2013.
- ASHOURI, M. Modeling microdamage healing in asphalt pavements using continuum damage theory. 196 f. 2014. Dissertation (Doctor of Philosophy) - Graduate Faculty of North Carolina State University, Raleigh, 2014.
- AYAR, P.; MORENO-NAVARRO, F.; RUBIO-GÁMEZ, M. C. The healing capability of asphalt pavements: a state of the art review. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 113, p. 28–40, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.034>>
- BABADOPULOS, L. Phenomena occurring during cyclic loading and fatigue tests on bituminous materials : Identification and quantification. 303 f. Thesis (Doctoral School Mécanique, Energétique, Génie Civil et Acoustique - MEGA) - Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, University of Lyon, Lyon, 2017. Disponível em: <<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01599933/>>
- BABADOPULOS, L. F. de A. L. et al. Aging-effect incorporation into the fatigue-damage modeling of asphalt mixtures using the S-VECD model. *Journal of Materials in Civil Engineering*, [s. l.], v. 28, n. 12, p. 1–11, 2016. Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001676](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001676)>
- BAHIA, H. U. Modeling of asphalt binder rheology and its application to modified binder. In: KIM, Y. R. (Ed.) *Modeling of asphalt concrete*. New York: McGraw-Hill, 2009. p. 11-61
- BANEY, J. M.; HUI, C. Y. Viscoelastic crack healing and adhesion. *Journal of Applied Physics*, [s. l.], v. 86, n. 8, p. 4232–4241, 1999.
- BERNUCCI, L. B. et al. *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.
- BOCK, André Luiz. Efeitos da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado. [s. l.], 2006.

BOCK, A. L. Efeitos da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado. 142 p Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

CANESTRARI, F. et al. Modeling and assessment of self-healing and thixotropy properties for modified binders. *International Journal of Fatigue*, [s. l.], v. 70, p. 351–360, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.08.004>>

CASTRO, M.; SÁNCHEZ, J. A. Fatigue and healing of asphalt mixtures: discriminate analysis of fatigue curves. *Journal of Transportation Engineering*, [s. l.], v. 132, n. 2, p. 168–174, 2006. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:2(168)

CHEHAB, G. R. et al. Time temperature superposition principle for asphalt concrete with growing damage in tension state. In: ASPHALT PAVING TECHNOLOGY : ASSOCIATION OF ASPHALT PAVING TECHNOLOGISTS. Proceedings of the Technical Sessions, v. 71, p. 559-593, 2002.

CHUNG, K. et al. Preparation and characterization of microcapsule-containing self-healing asphalt. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, [s. l.], v. 29, p. 330–337, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2015.04.011>>

DAI, Q.; WANG, Z.; HASAN, M. R. M. Investigation of induction healing effects on electrically conductive asphalt mastic and asphalt concrete beams through fracture-healing tests. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 49, p. 729-737, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.089>>

DALLAS, N.; ROBERT, L.; RICHARD, Y. An Analysis of the Mechanism of Microdamage Healing based on the Application of Micromechanics First Principles of Fracture and Healing. Association of Asphalt Paving Technologists, [s. l.], p. 1–41, 1998. Disponível em: <http://www.asphaltrubber.org/ARTIC/Reports/RPA_A1701.pdf>

GALLEGO, J, et al. Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 42, p. 1–4, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.007>>

GARCÍA, Á. et al. Influence of steel wool fibers on the mechanical, thermal, and healing properties of dense asphalt concrete. *Journal of Testing and Evaluation*, [s. l.], v. 42, n. 5, 2014. Disponível em: <<http://jim.sagepub.com/content/early/2014/03/21/1045389X14529029>>

GARCÍA, Á. et al. Uniformity and mechanical properties of dense asphalt concrete with steel wool fibers. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 43, p. 107–117, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.030>>

GARCÍA, Á. et al. Single and multiple healing of porous and dense asphalt concrete. *Journal*

of Intelligent Material Systems and Structures, [s. l.], v. 26, n. 4, p. 425–433, 2015.

GARCÍA, Á. et al. A simple model to define induction heating in asphalt mastic. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 31, p. 38–46, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.046

GARCÍA, Á.; JELFS, J.; AUSTIN, C. J. Internal asphalt mixture rejuvenation using capsules. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 101, p. 309–316, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.062>>

GARCÍA, Á.; SCHLANGEN, E.; VAN DE VEN, M. Properties of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. *Fuel*, [s. l.], v. 90, n. 2, p. 583–591, 2011. DOI: 10.1016/j.fuel.2010.09.033

GÓMEZ-MEIJIDE, B. et al. Effect of air voids content on asphalt self-healing via induction and infrared heating. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 126, p. 957–966, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.115>>

HUANG, W.; LV, Q.; XIAO, F. Investigation of using binder bond strength test to evaluate adhesion and self-healing properties of modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 113, p. 49–56, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.047>>

KARKI, P.; LI, R.; BHASIN, A. Quantifying overall damage and healing behaviour of asphalt materials using continuum damage approach. *International Journal of Pavement Engineering*, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 350–362, 2015. DOI: 10.1080/10298436.2014.942993

KIM, Y. R. (Ed.) **Modeling of asphalt concrete**. New York: McGraw-Hill, 2009. DOI: 10.1036/007146462X

KIM, Y. R. et al. VEPCD modeling of asphalt concrete with growing dam. In: KIM, Y. R. (Ed.) **Modeling of asphalt concrete**. New York: McGraw-Hill, 2009. p. 163–203. DOI: 10.1036/007146462X

KIM, Y. R.; DANIEL, J. S; WEN, H. Fatigue performance evaluation of westrackasphalt mixtures using viscoelasticcontinuum damage approach. North Carolina: Department of Civil Engineering/North Carolina State University, 2002. (Final Report - Report No. FHWA/NC/2002-004)

KIM, Yong-Rak; LITTLE, D. N.; LYTTON, R. L. Fatigue and Healing Characterization of Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 75–83, 2003. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290899-1561%282003%2915%3A1%2875%29>>

KUTAY, M. E. **VECD (Visco-Elastic Continuum Damage)**: state-of-the-art technique to evaluate fatigue damage in asphalt pavements. Michigan: Michigan State of University, [201_?]. 42 slides. Apresentação em Power Point.

LEE, H.-J., DANIEL, J.S., KIM, Y.R., Laboratory performance evaluation of modified asphalt mixtures for incheon airport pavements. **Int. J. Pavement Eng.**, v.1,151-169, 2000. (Downloaded: 2013) Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/10298430008901703>>

LITTLE, D. N. et al. **An analysis of the mechanism of microdamage healing based on the application of micromechanics first principles of fracture and healing.** [S.l.] : Association of Asphalt Paving Technologists, 1998.

LIU, Q. et al. Evaluation of the induction healing effect of porous asphalt concrete through four point bending fatigue test. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 29, p. 403-409, 2012.

LIU, Q. et al. Induction healing of asphalt mastic and porous asphalt concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 25, n. 9, p. 3746–3752, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.016>>

LIU, Q.; WU, S.; SCHLANGEN, E. Induction heating of asphalt mastic for crack control. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 41, p. 345–351, 2013.

LUO, R.; LIU, H.; ZHANG, Y. Characterization of linear viscoelastic, nonlinear viscoelastic and damage stages of asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 125, p. 72–80, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.039>>

LUO, X. Characterization of Fatigue **Cracking and Healing of Asphalt Mixtures.** [s. l.], v. 15, n. May, p. 75–83, 2012. Disponível em: <<http://repository.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/ETD-TAMU-2012-05-10924/LUO-DISSERTATION.pdf?sequence=2&isAllowed=y>>

LV, Q. et al. On the investigation of self-healing behavior of bitumen and its influencing factors. **Materials and Design**, [s. l.], v. 117, p. 7–17, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.12.072>>

MANGIAFICO, S. **Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends.** 312 f. Thèse (Docteur - Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Acoustique, Génie Civil) - Laboratoire Génie Civil et Bâtiment, École Nationale des Travaux Publics de l'État, Lyon, 2014

MOCELIN, D. M. **Avaliação do comportamento à fadiga de misturas asfálticas quentes e mornas através do modelo de dano contínuo viscoelástico.** 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Construção e Infraestrutura) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

NASCIMENTO, L. A. H. do. **Implementation and validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for asphalt mixture and pavement analysis in Brazil.** 303 f. Dissertation (Doctor in Philosophy) - North Carolina State University, NCSU, Estados Unidos, 2015.

NASCIMENTO, L. A. H. et al. Uso da mecânica do dano contínuo na caracterização de misturas asfálticas brasileiras. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 21., 2014, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Petróleo, RJ, 2014.

NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; GARCIA, A. Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating. **Materials and Design**, [s.l.], v. 106, p. 404–414, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.095>>

ORTIZ, C. **Linear viscoelasticity theory II**. [199_?] (Lecture #26 : 3.11 Mechanics of Materials F03)(Disponível em: <<http://web.mit.edu/course/3/3.11/www/Lectures/Lecture26.pdf>>

PANG, L. et al. Self healing capacity of asphalt binders. **Journal Wuhan University of Technology**, Materials Science Edition, [s. l.], v. 27, n. 4, p. 794–796, 2012.

PARK, S. W.; KIM, Y. R.; SCHAPERLY, R. A. A viscoelastic continuum damage model and its application to uniaxial behavior of asphalt concrete. **Mechanics of Materials**, [s. l.], v. 24, n. 4, p. 241–255, 1996.

PLANCHE, J.-P. et al. Evaluation of fatigue properties of bituminous binders. **Materials' and Structures / Matériaux et Constructions**, [s.l.], v. 37, p. 356-359, 2004.

QIU, J. et al. Evaluating Self Healing Capability of Bituminous Mastics. **Experimental Mechanics**, [s. l.], v. 52, n. 8, p. 1163–1171, 2012. a. DOI 10.1007/s11340-011-9573-1

QIU, J. Self healing of asphalt mixtures. Netherlands: Published and distributed by Jian Qiu, 2012.

QIU, J. et al. Investigation of self healing behaviour of asphalt mixes using beam on elastic foundation setup. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**, [s. l.], v. 45, n. 5, p. 777–791, 2012. b. DOI 10.1617/s11527-011-9797-7

QIU, J. et al. Self-healing characteristics of bituminous mastics using a modified direct tension test. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 58–66, 2014. DOI: 10.1177/1045389X12467515

QIU, J.; VAN DE VEN, M.; MOLENAAR, A. Crack-healing investigation in bituminous materials. **J. Mater. Civ. Eng., local**, [s.l.] v. 25. n. 7, p. 864-870, 2013.

SCHAPERLY, R. A. **A simple collocation method for fitting viscoelastic models to experimental data**. Pasadena: California Institute of Technology, 1962.

SCHAPERLY, R. A. A theory of mechanical behavior of elastic media with growing damage and other changes in structure. **J. Mech. Phys. Solids**, Great Britain, v. 38, no. 2., p. 215-253, 1990.

SCHAPERLY, R. A. On the mechanics of crack closing and bonding in linear viscoelastic media. **International Journal of Fracture**, [s. l.], v. 39, n. 1–3, p. 163–189, 1989.

SCHAPERLY, R. A.; PARK, S. W. Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions. Part II—an approximate analytical method. **International Journal of Solids and Structures**, [s. l.], v. 36, n. 11, p. 1677–1699, 1999. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020768398000602>>

SCHAPERLY, R. A. Correspondence principles and a generalized J integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media. **International Journal of Fracture**, [s. l.], v. 25, n. 3, p. 195–223, 1984. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BF01140837>><<http://link.springer.com/article/10.1007/BF01140837>>

SHEN, S.; CARPENTER, S. H. **Dissipated energy concepts for HMA performance: fatigue and healing**: final report. Urbana (Ill.): Department of Civil and Environmental Engineering / University of Illinois at Urbana-Champaign, 2007. (COE Report No. 29)

SHEN, S. et al. A Dissipated Energy Approach to Fatigue Evaluation A Dissipated Energy Approach to Fatigue Evaluation. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], n. February 2006, p. 37–41, 2006.

SHEN, S.; CHIU, H.-M.; HUANG, H. Characterization of Fatigue and Healing in Asphalt Binders. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 22, n. 9, p. 846–852, 2010. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0000080>>

SI, Z.; LITTLE, D. N.; LYTTON, R. L. Characterization of microdamage and healing of asphalt Concrete Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 14, n. 6, p. 461–470, 2002a.

SI, Z.; LITTLE, D. N.; LYTTON, R. L. Evaluation of fatigue healing effect of asphalt concrete by pseudo stiffness. **Transportation Research Record**, [s. l.], n. 02, p. 73–79, 2002b.

SOUZA, F. V. de. **Modelo multi-escala para análise estrutural de compósitos viscoelásticos suscetíveis ao dano**. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

SU, J. F.; QIU, J.; SCHLANGEN, E. Stability investigation of self-healing microcapsules containing rejuvenator for bitumen. **Polymer Degradation and Stability**, [s. l.], v. 98, n. 6, p. 1205–1215, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.03.008>>

TAN, Y. et al. Healing characteristics of asphalt binder. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 27, n. 1, p. 570–577, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.006>>

TANG, J. et al. Investigation of the optimal self-healing temperatures and healing time of asphalt binders. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 113, p. 1029–1033, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.145>>

UNDERWOOD, B.; BAEK, C.; KIM, Y. Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model as Platform for Asphalt Concrete Fatigue Analysis. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [s. l.], v. 2296, p. 36–45, 2012. Disponível em: <<http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2296-04>>

UNDERWOOD, B. S.; KIM, Y. R.; GUDDATI, M. N. Improved calculation method of damage parameter in viscoelastic continuum damage model. **International Journal of Pavement Engineering**, [s. l.], v. 11, n. 6, p. 459–476, 2010.

VAN DEN BERGH, W. **The effect of ageing on the fatigue and healing properties of bituminous mortars**. Netherlands : Published and distributed by Wim Van den Bergh, 2011.

VASCONCELOS DE SOUZA, Flávio. **Modelo multi-escala para análise estrutural de compósitos viscoelásticos suscetíveis ao dano**. 189 f. 2005. [s. l.], 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005

WOOL, R. P.; O'CONNOR, K. M. A theory of crack healing in polymers. **Journal of Applied Physics**, [s. l.], v. 52, n. 10, p. 5953–5963, 1981.

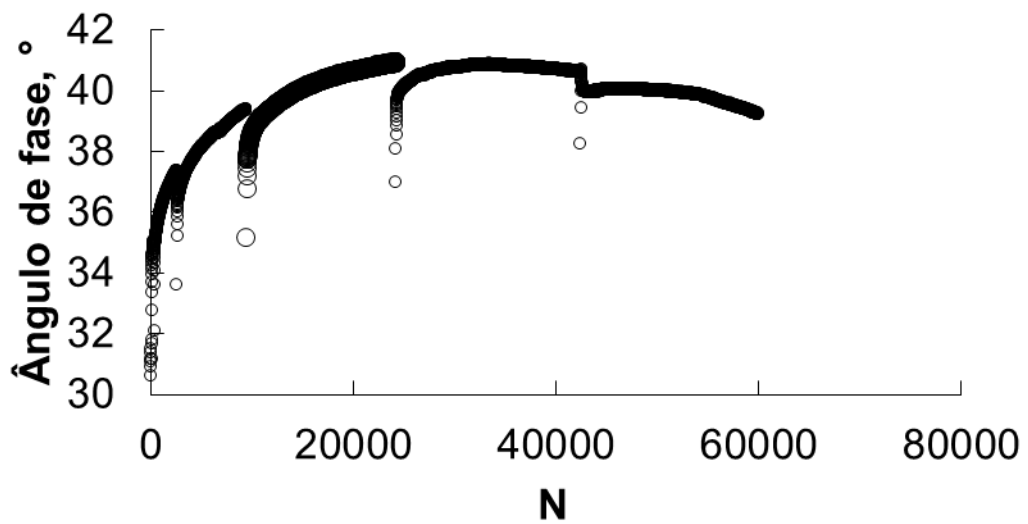
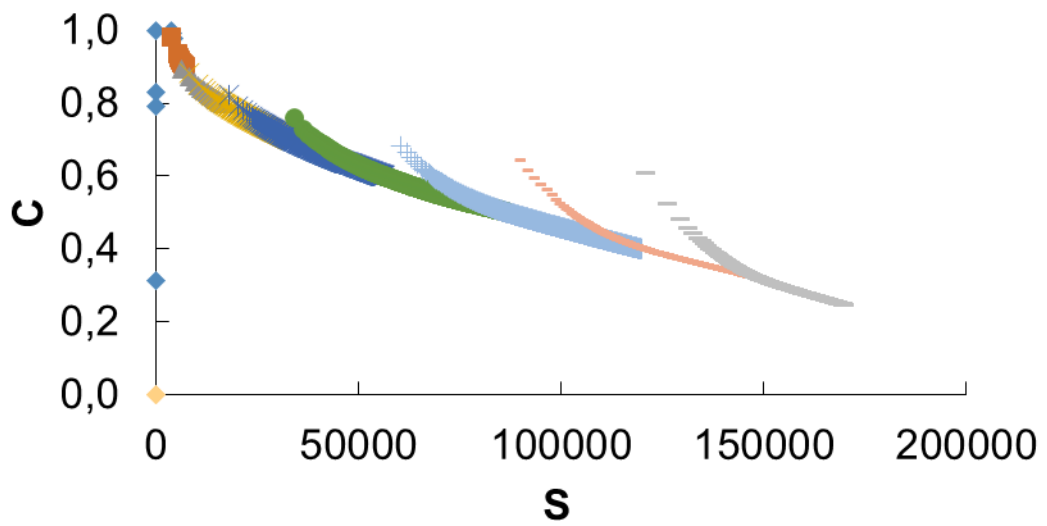
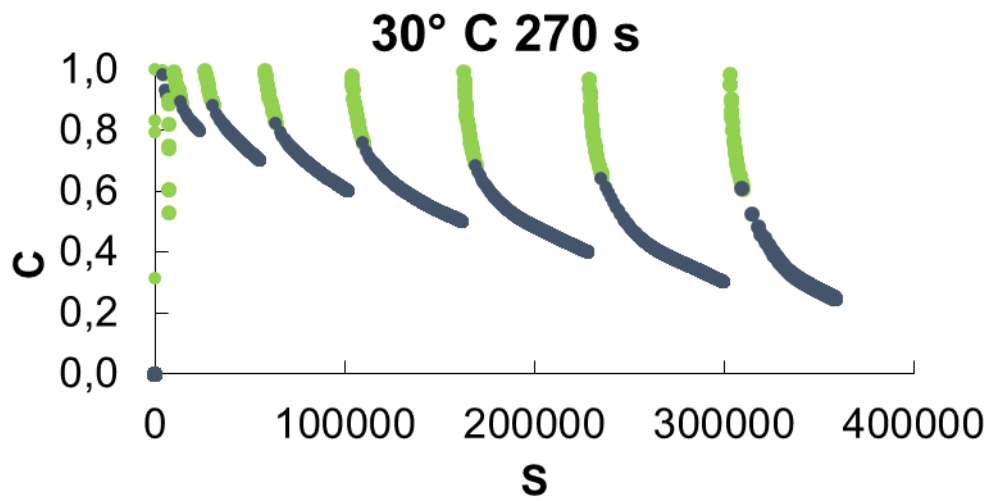
WOOL, R. P. Self-healing materials: a review. **Soft Matter**, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 400, 2008. Disponível em: <<http://xlink.rsc.org/?DOI=b711716g>>

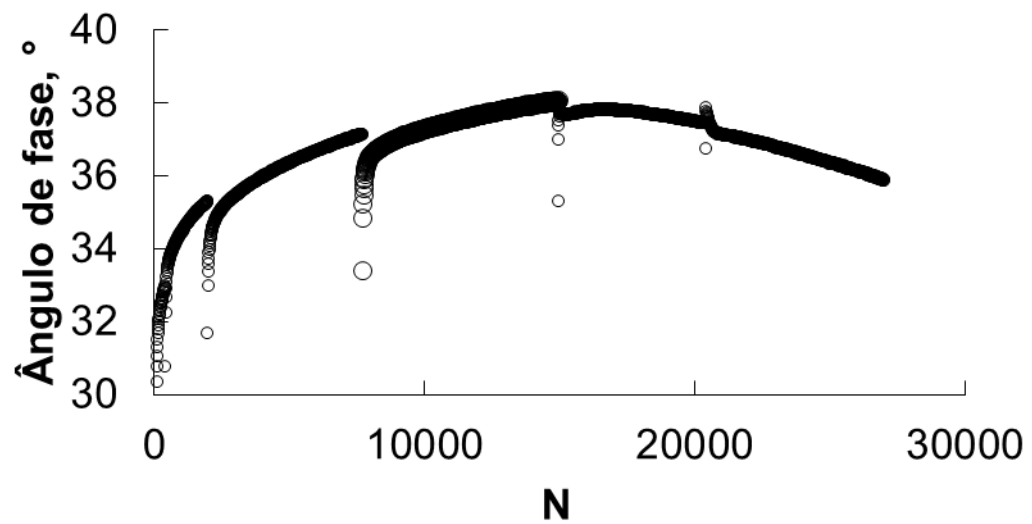
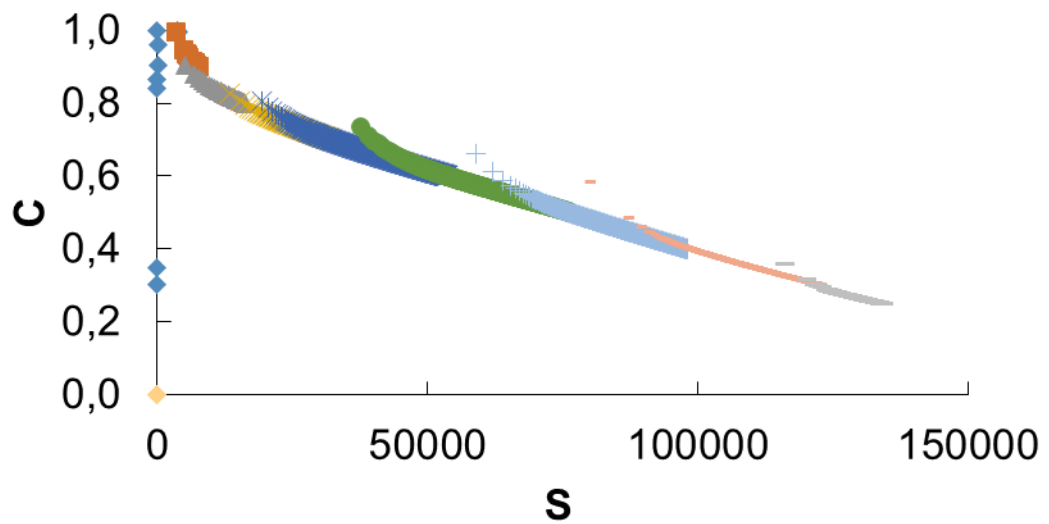
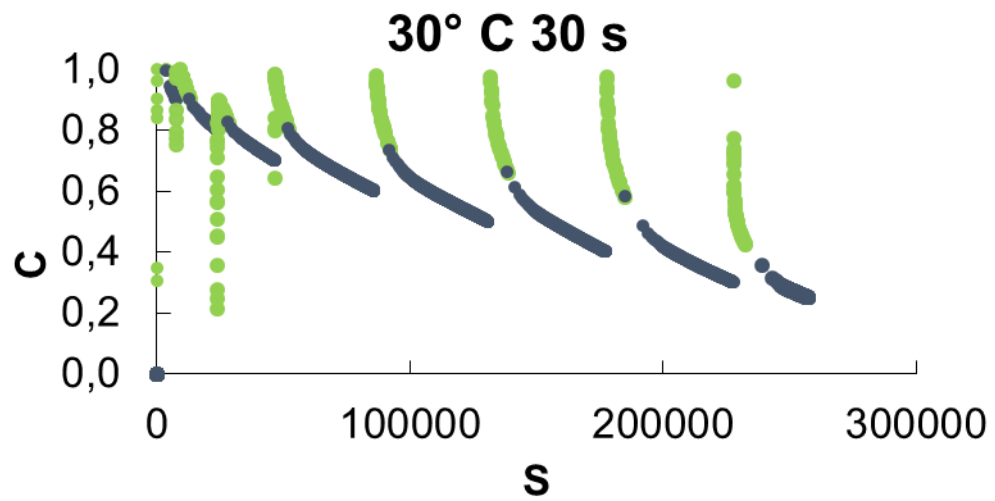
ZEIADA, W. A. et al. Development of test protocol to measure axial fatigue damage and healing, **Journal of the Transportation Research Board, Washington, DC**. n. 2576, p. 10-18, 2016.

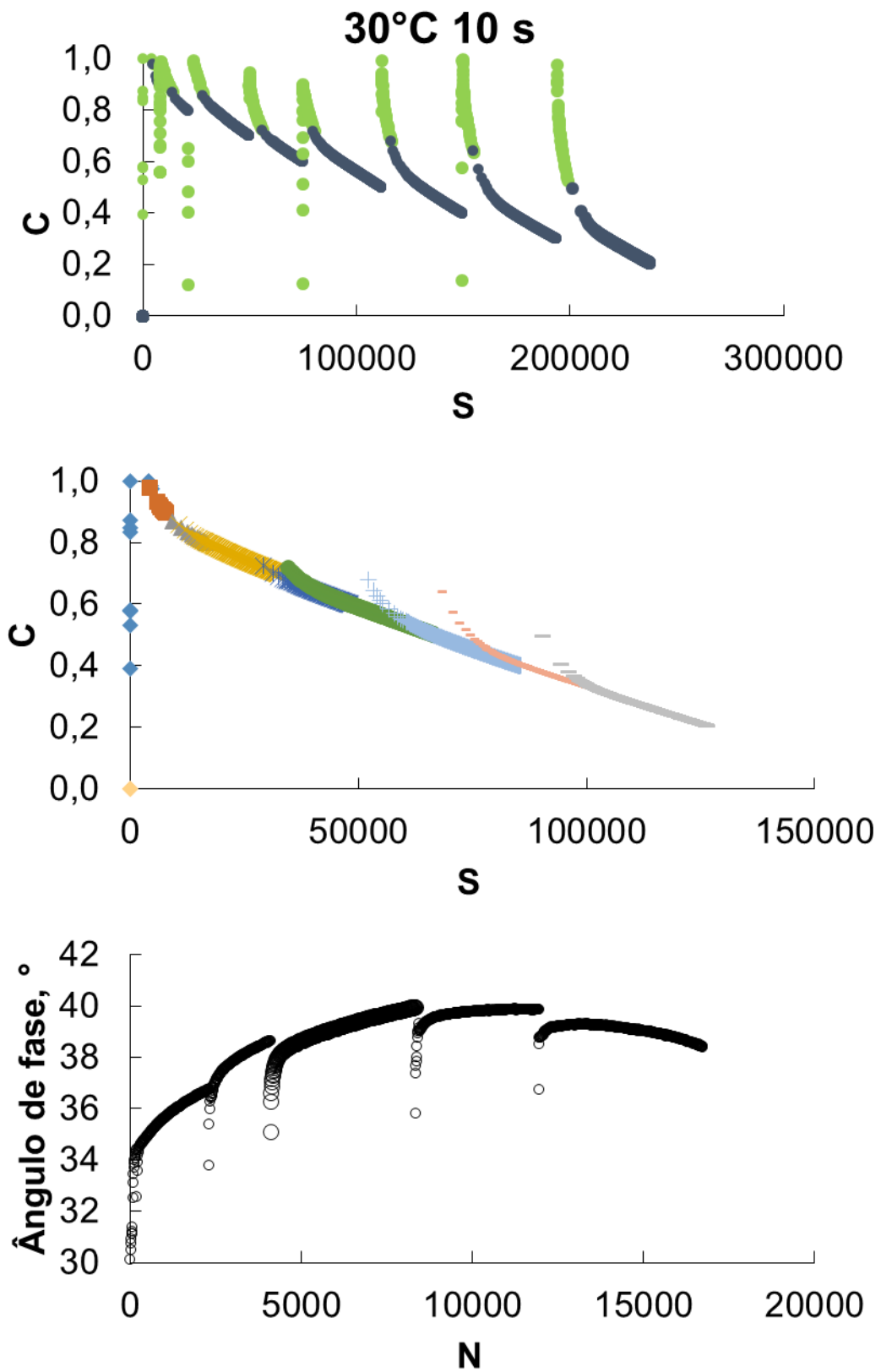
ZHANG, H.; YU, J.; WU, S. Effect of montmorillonite organic modification on ultraviolet aging properties of SBS modified bitumen. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 27, n. 1, p. 553–559, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.008>>

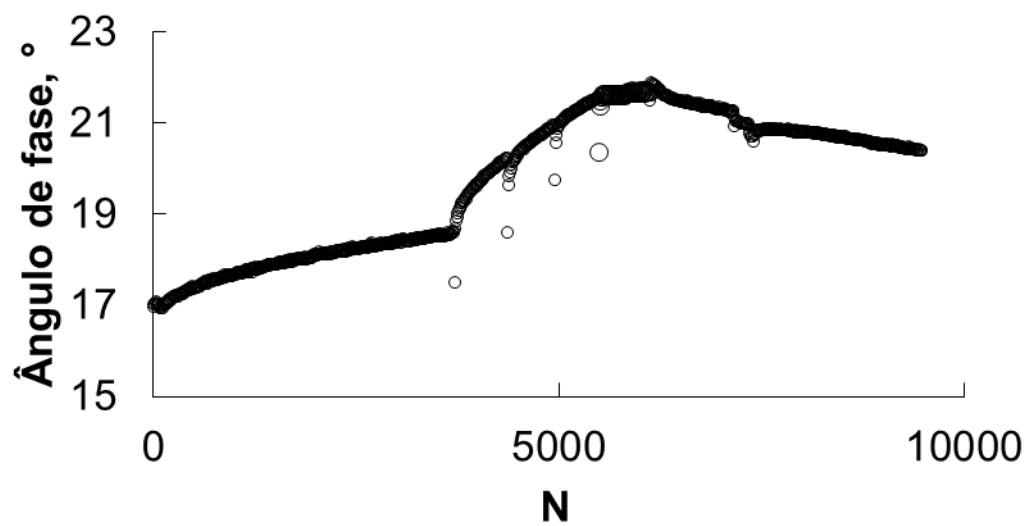
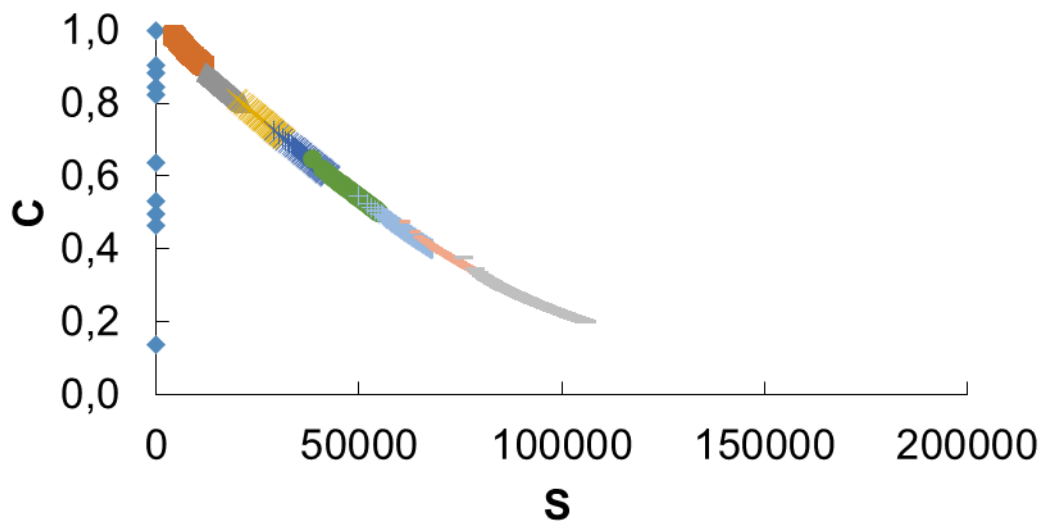
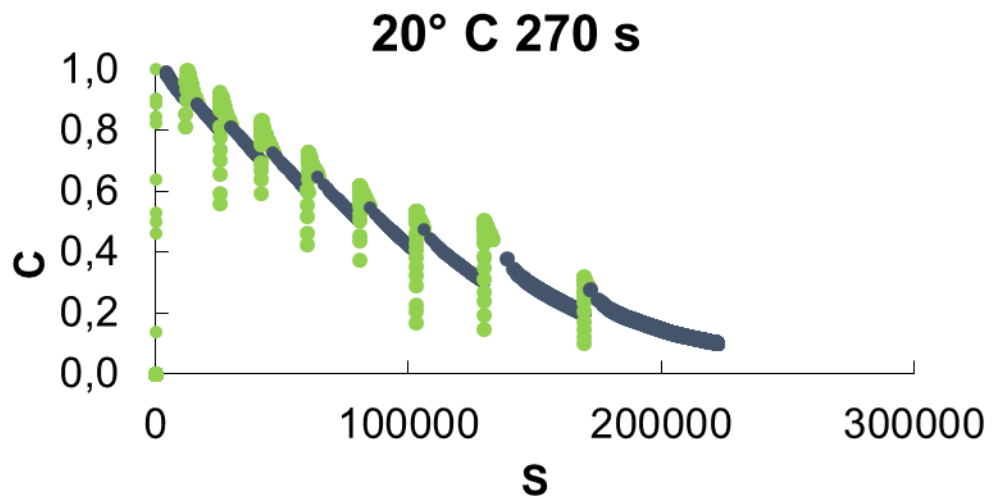
ANEXO A – Resultados de ensaio para mistura 10148:

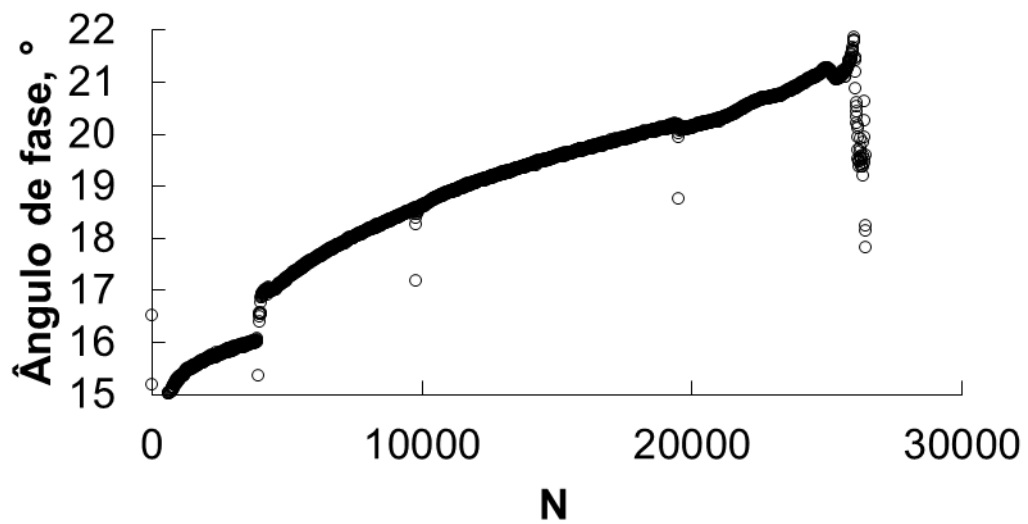
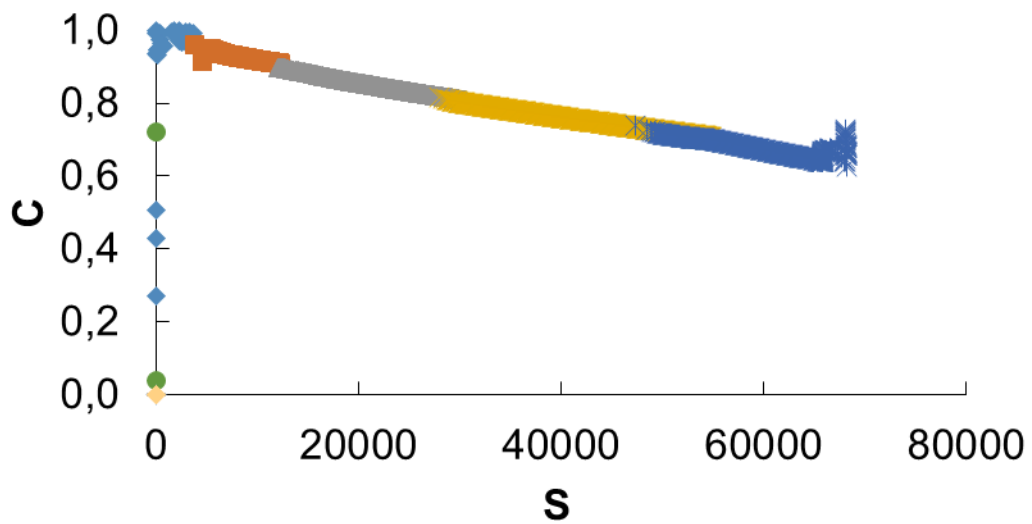
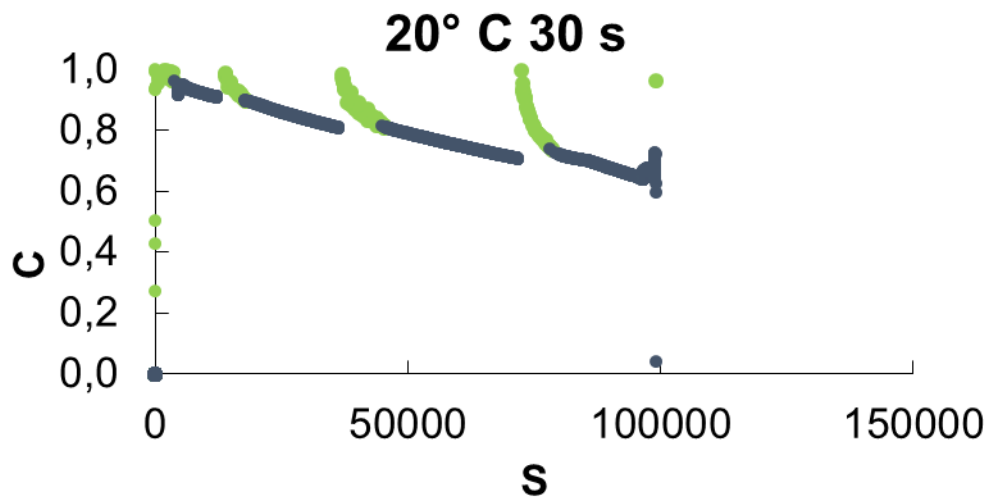
- **Curva C vs S;**
- **Curva C vs S deslocada;**
- **Ângulo de fase vs Número de ciclos.**

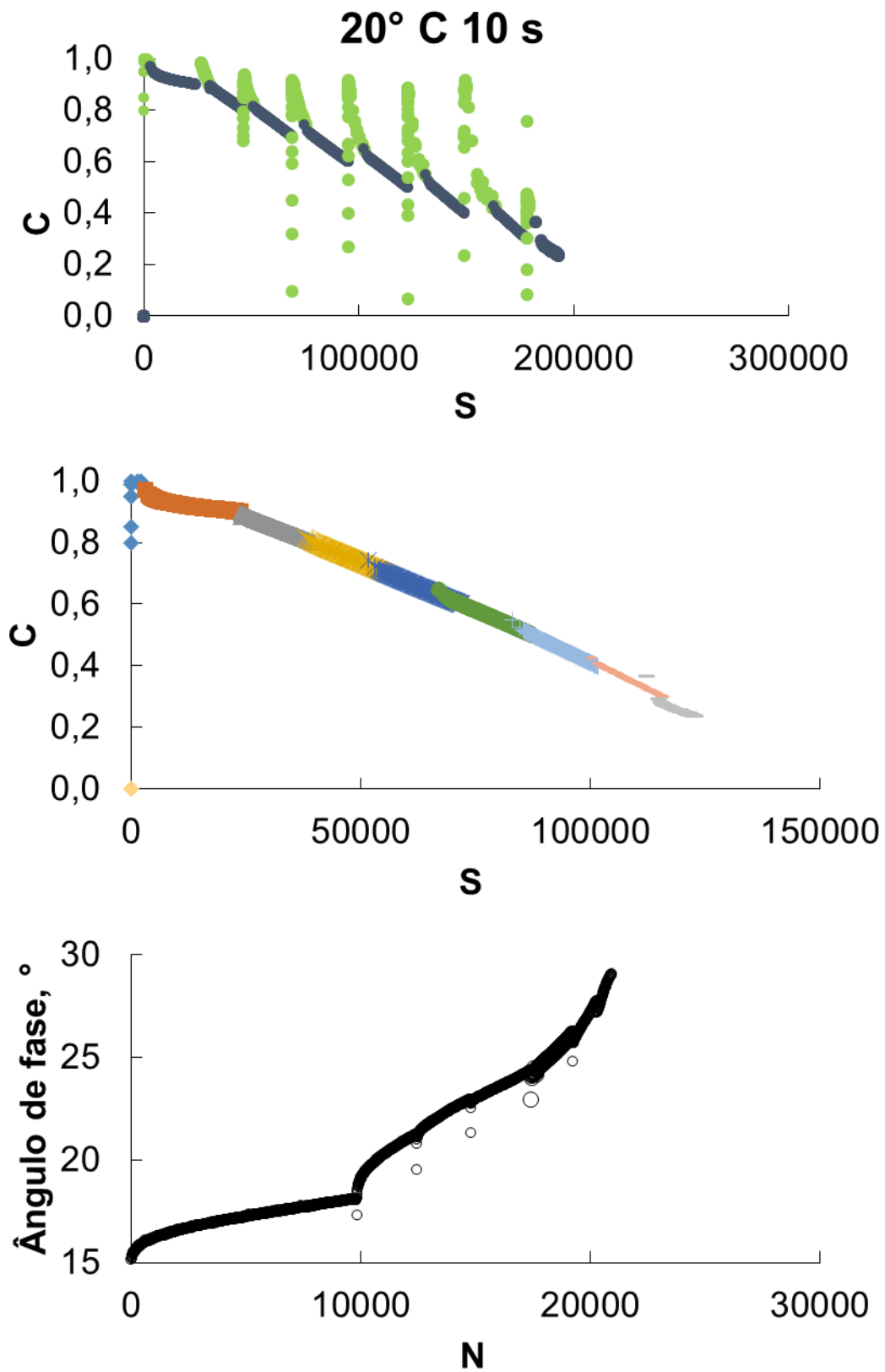


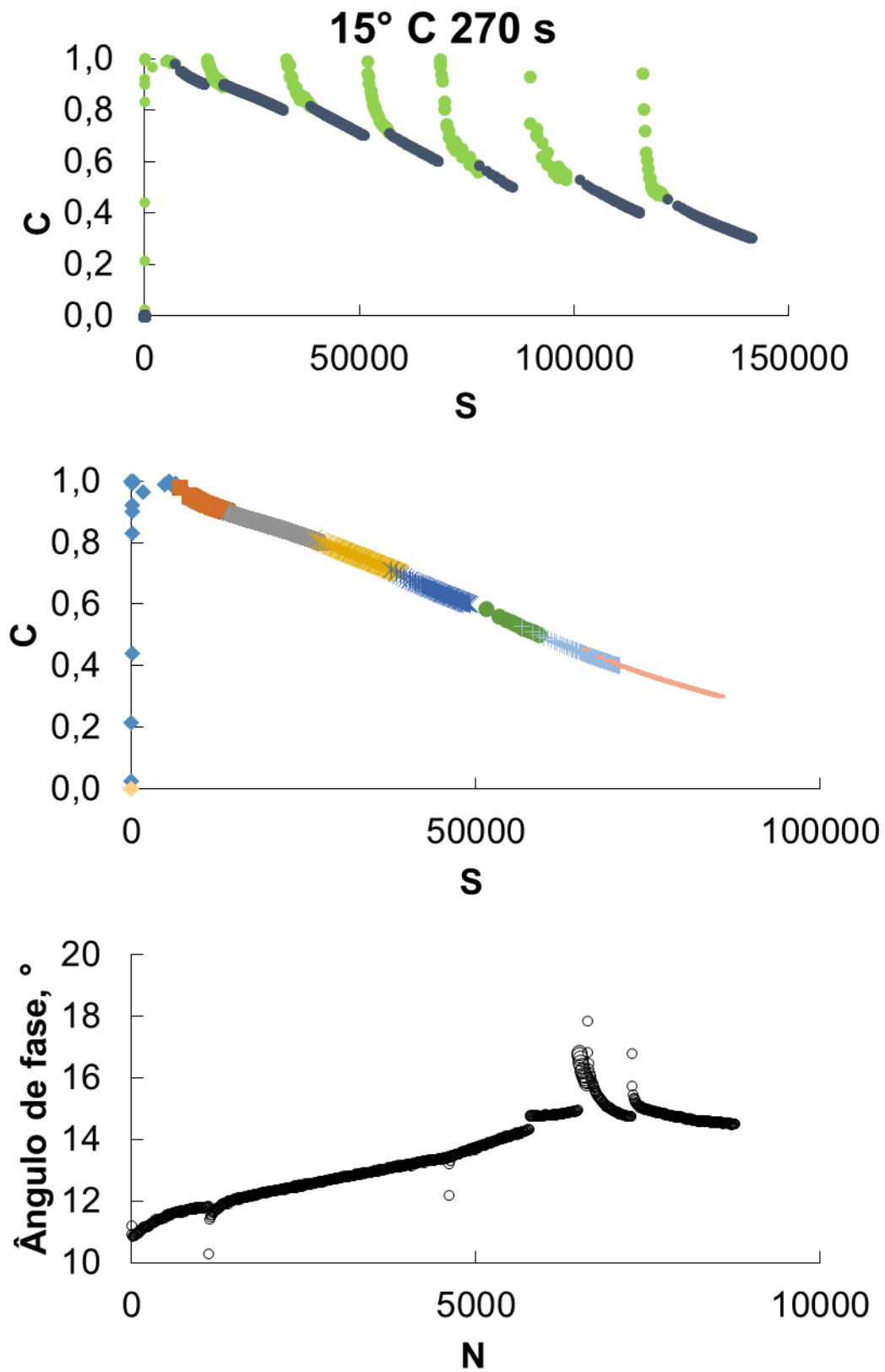


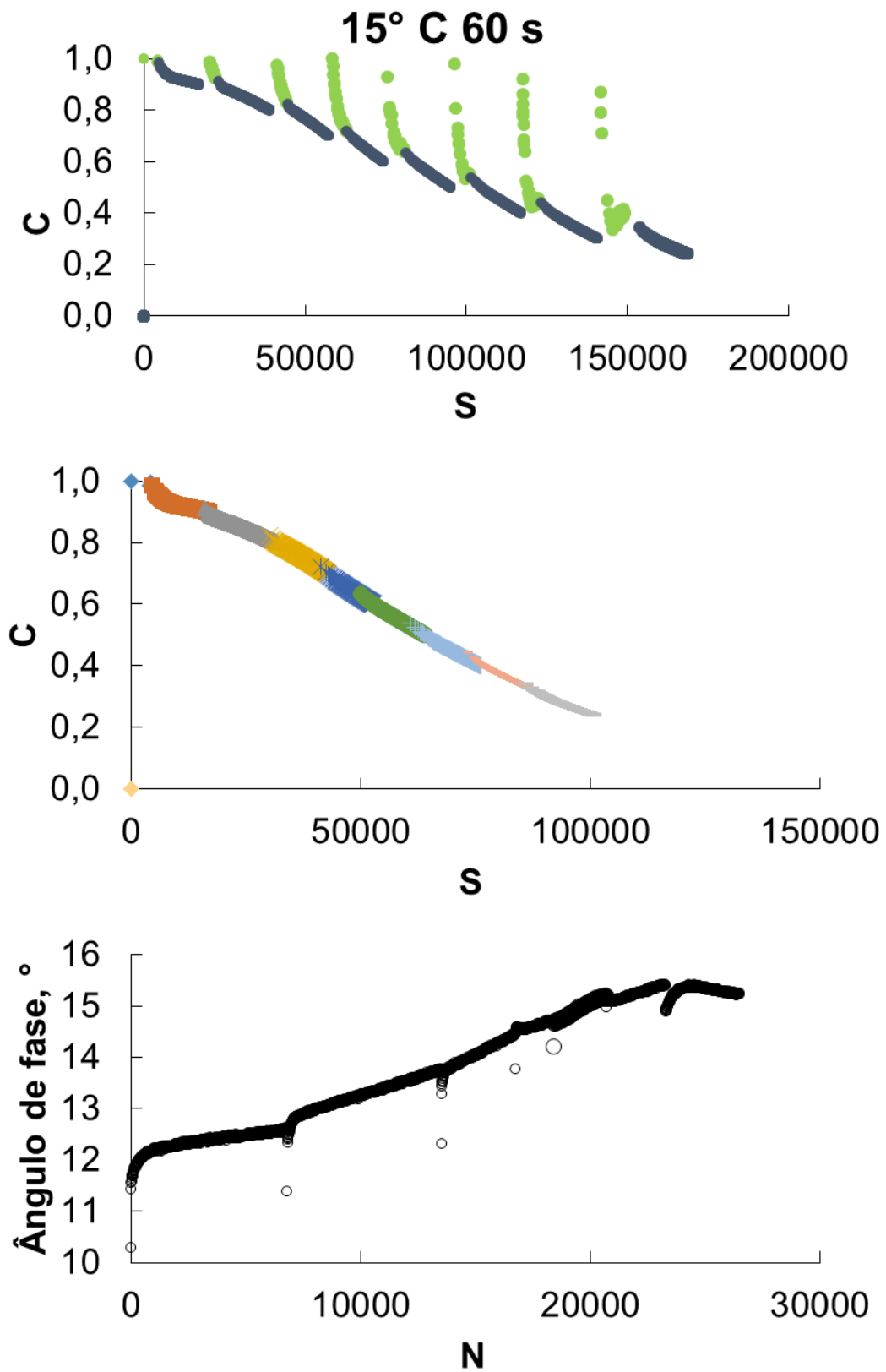


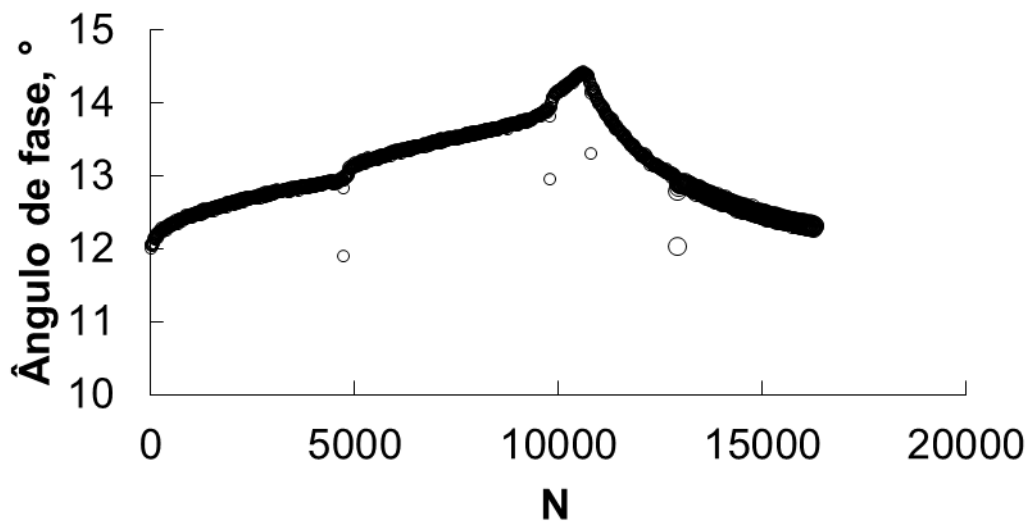
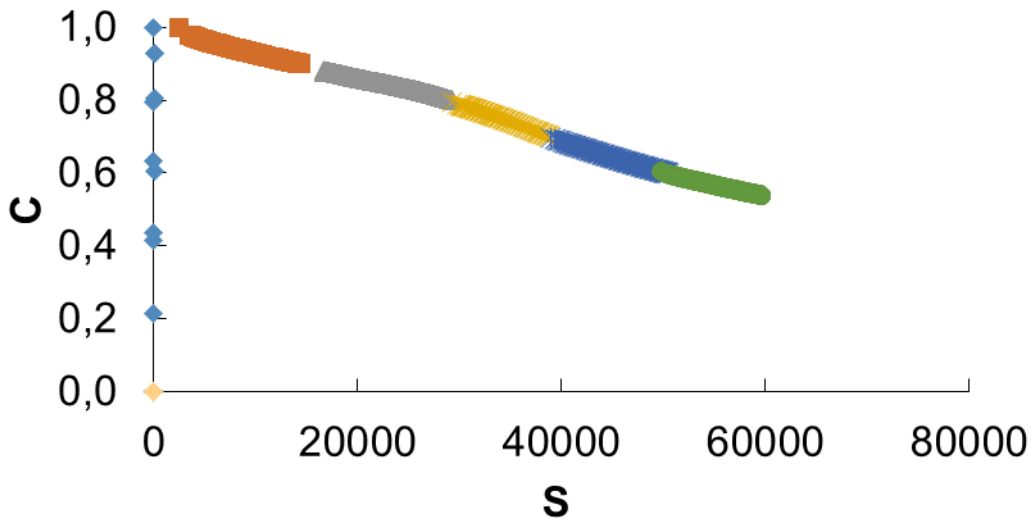
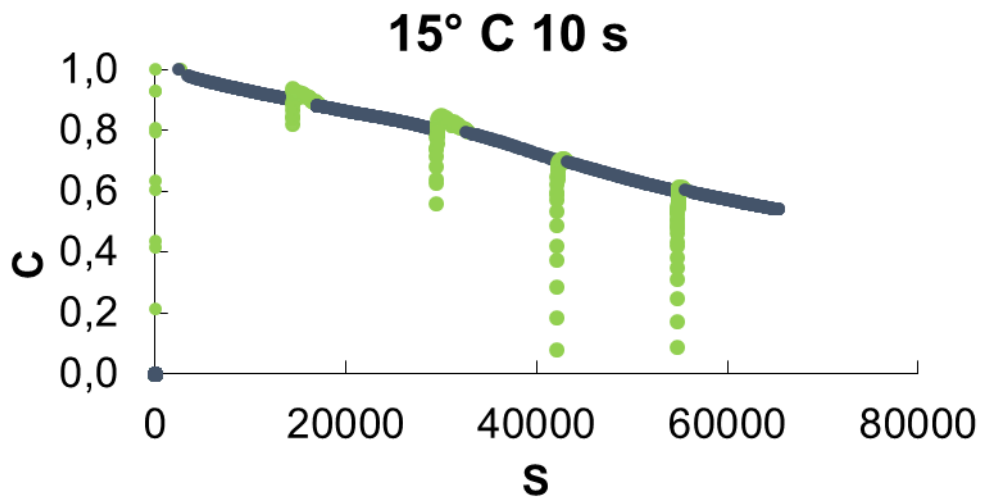






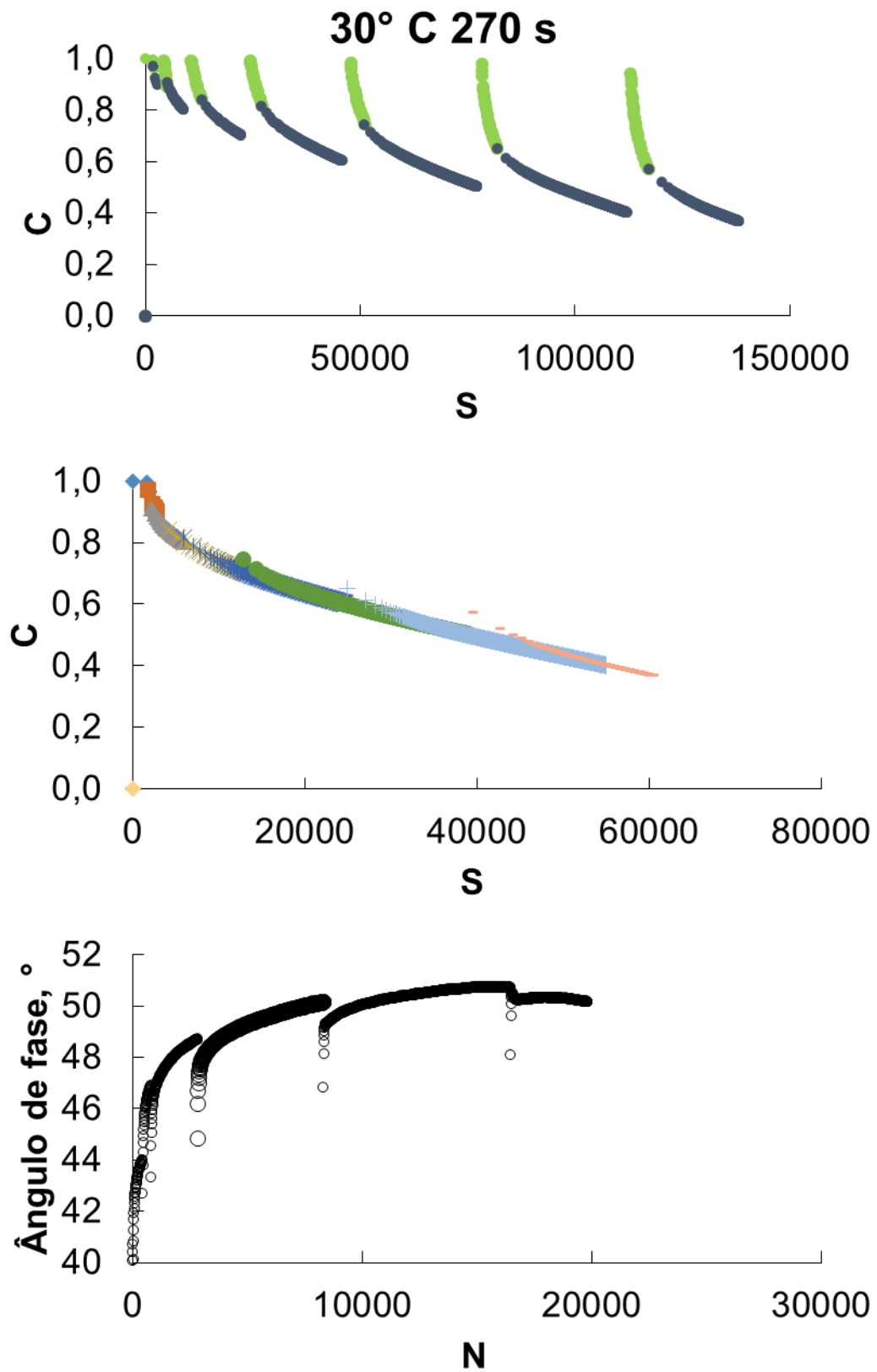


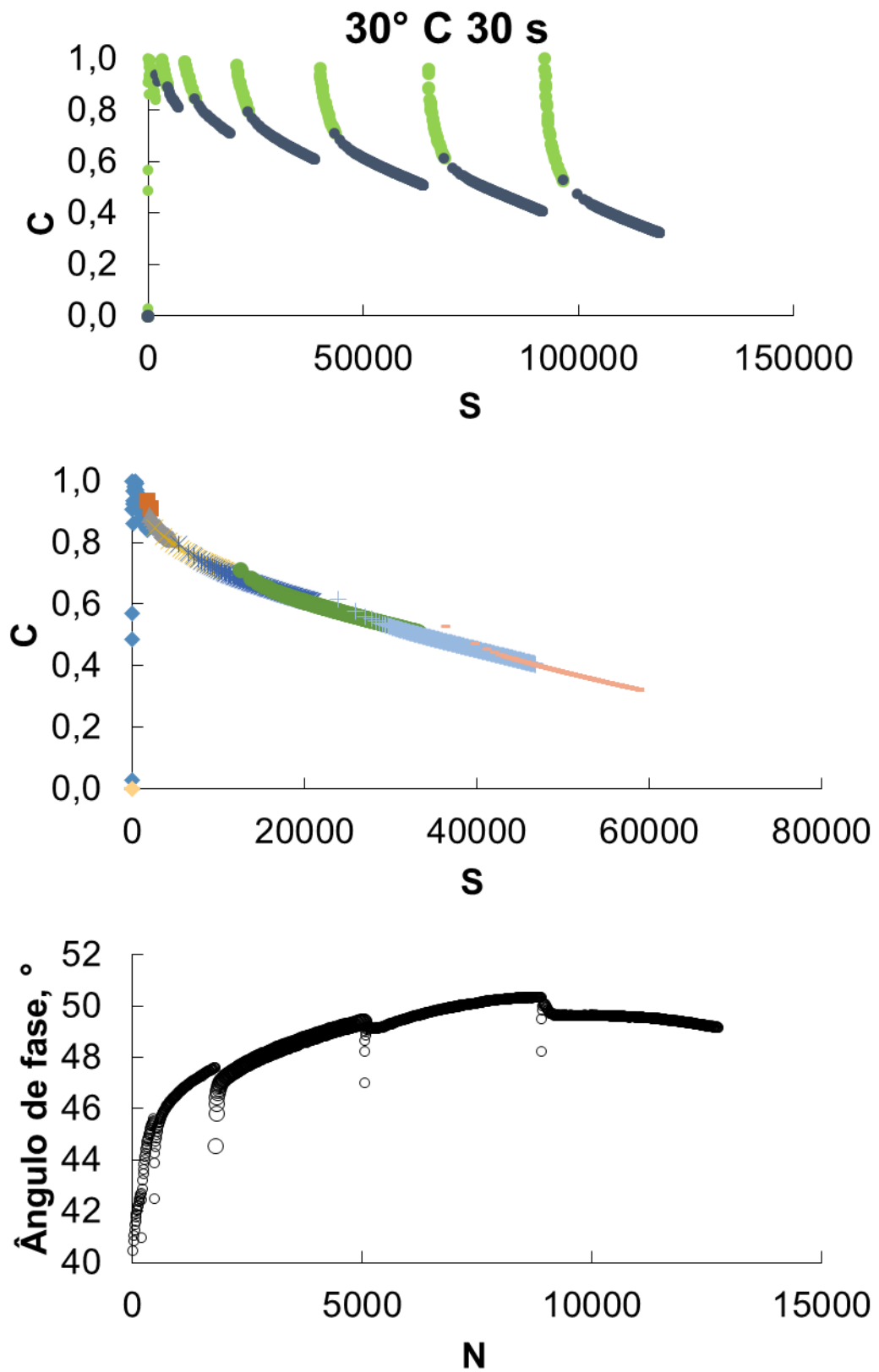


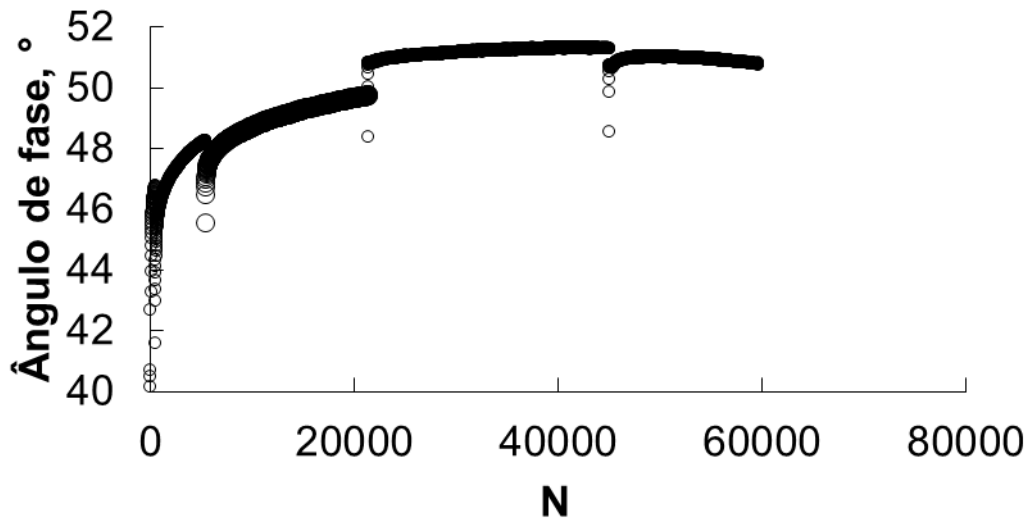
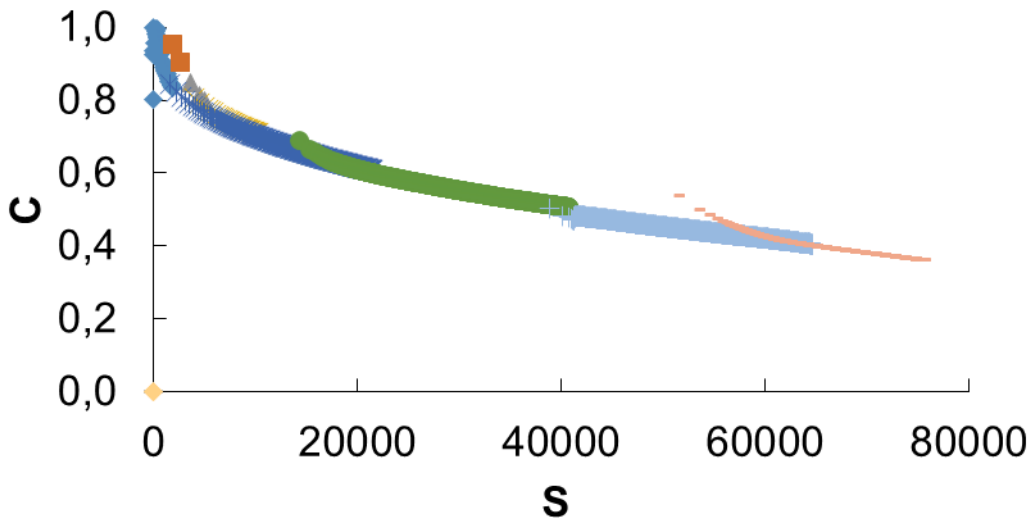
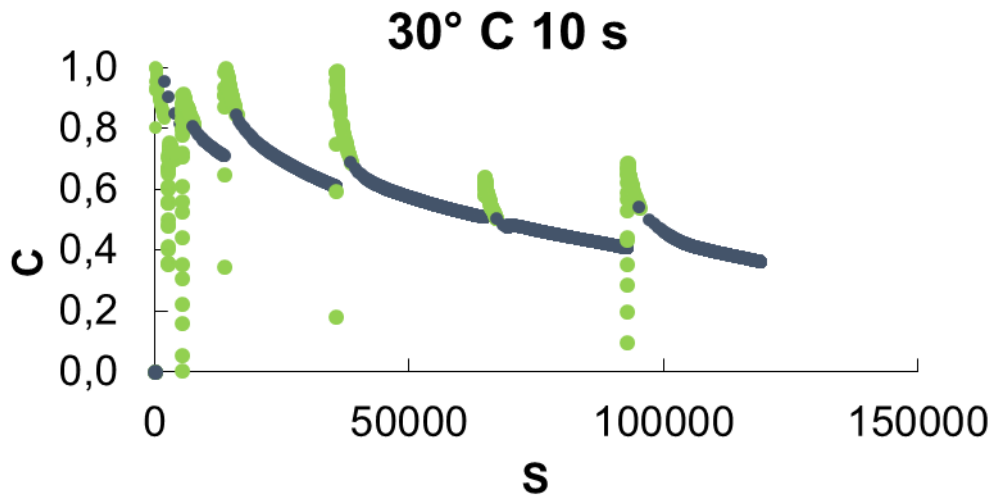


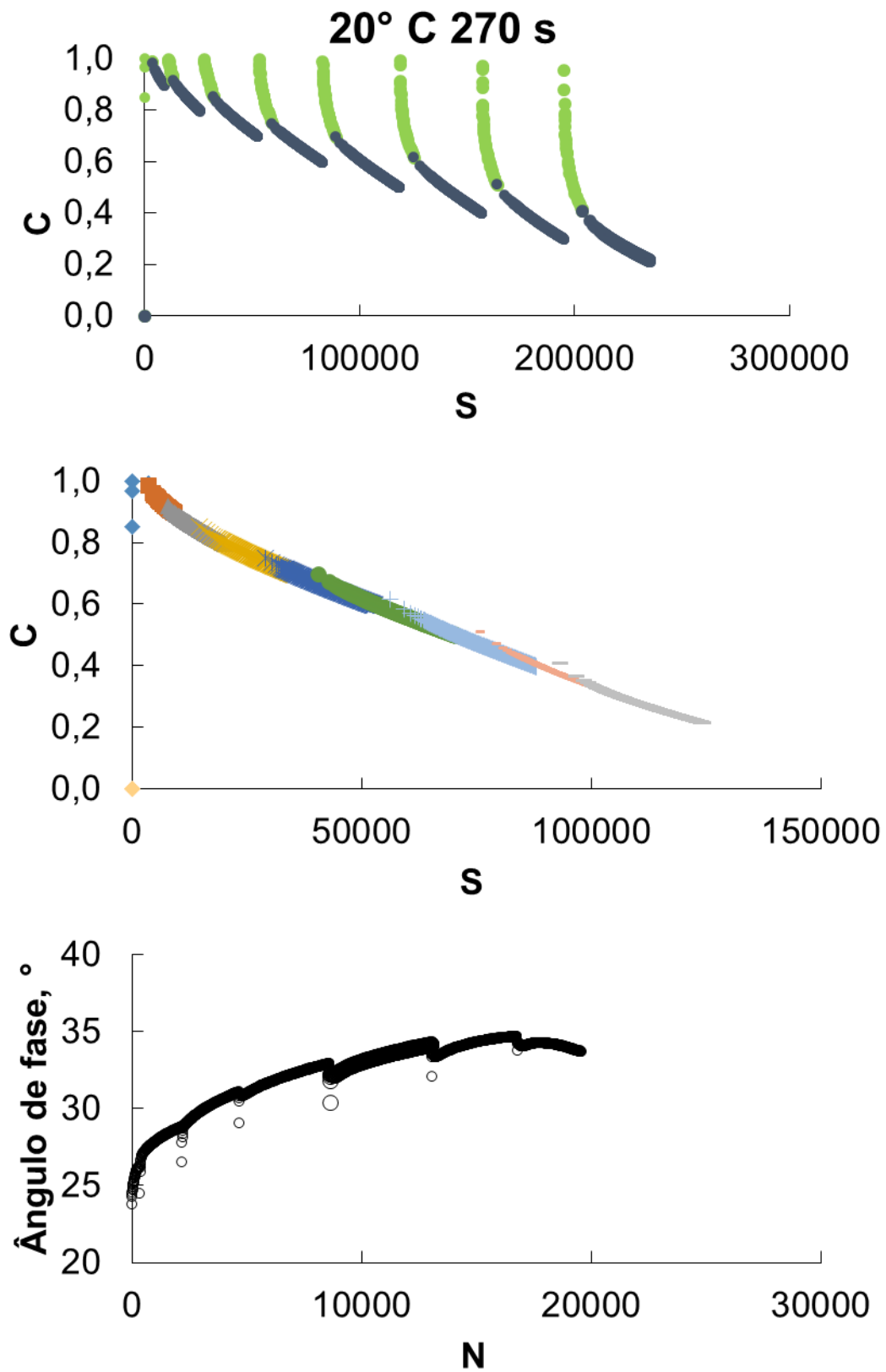
ANEXO B – Resultados de ensaio para mistura 13213:

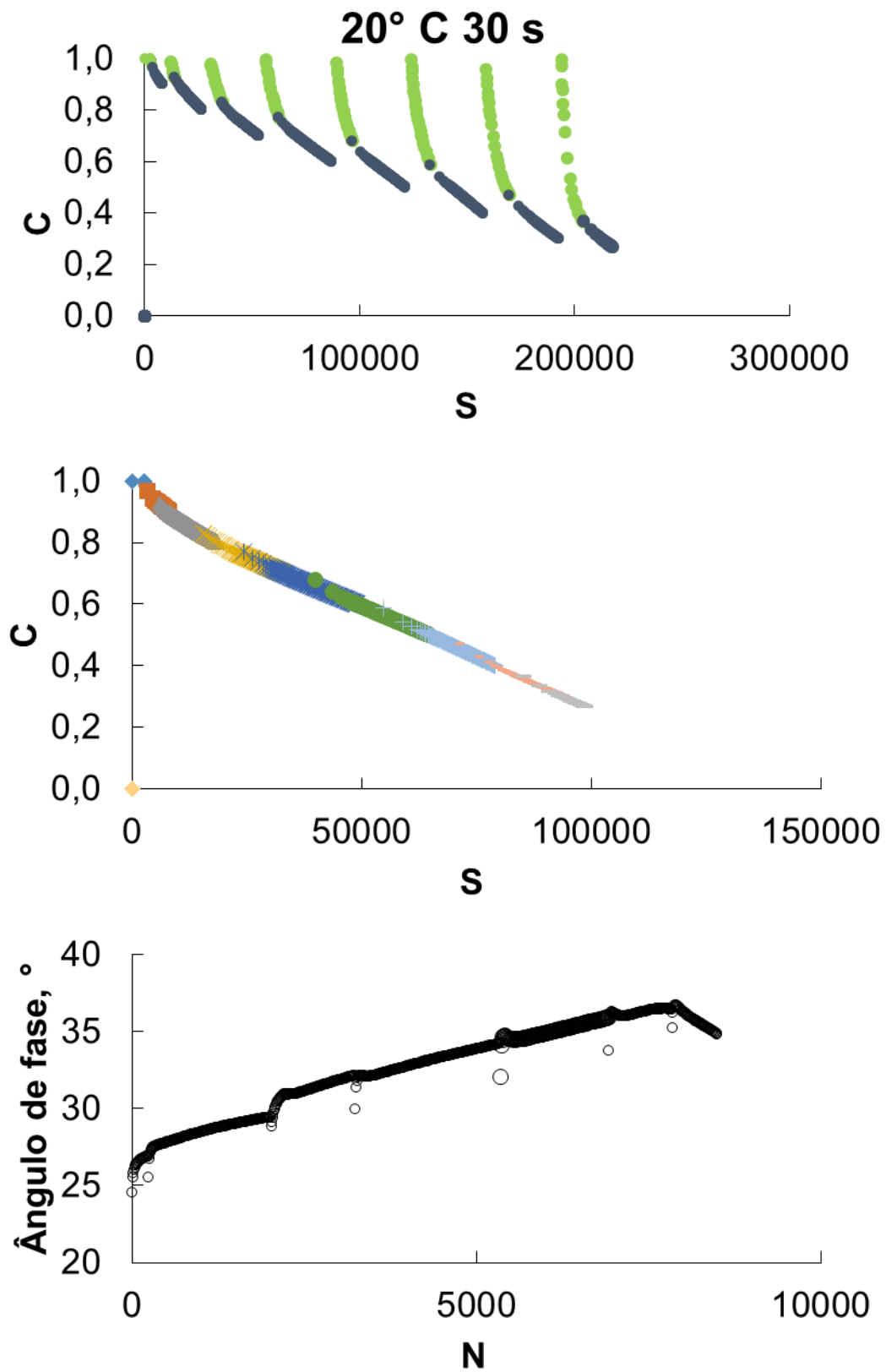
- **Curva C vs S;**
- **Curva C vs S deslocada;**
- **Ângulo de fase vs Número de ciclos.**

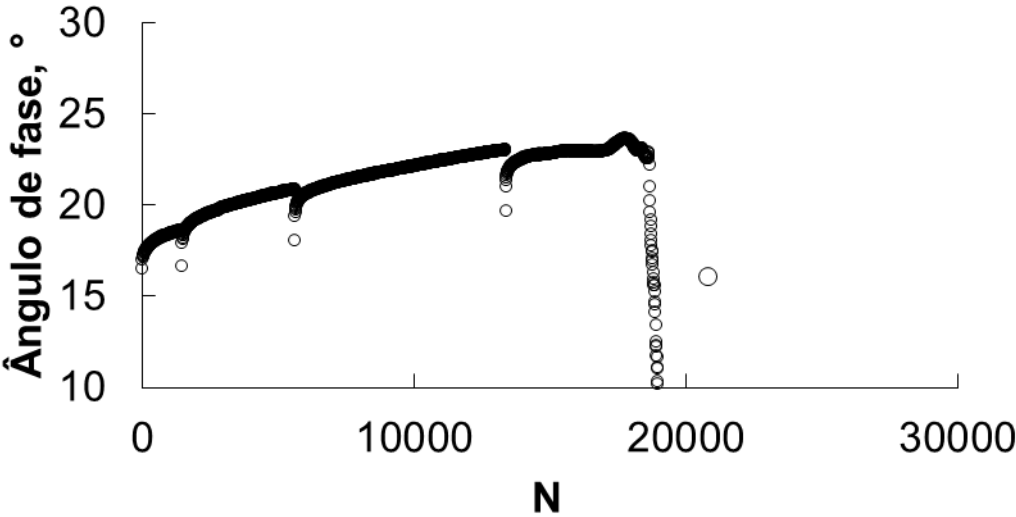
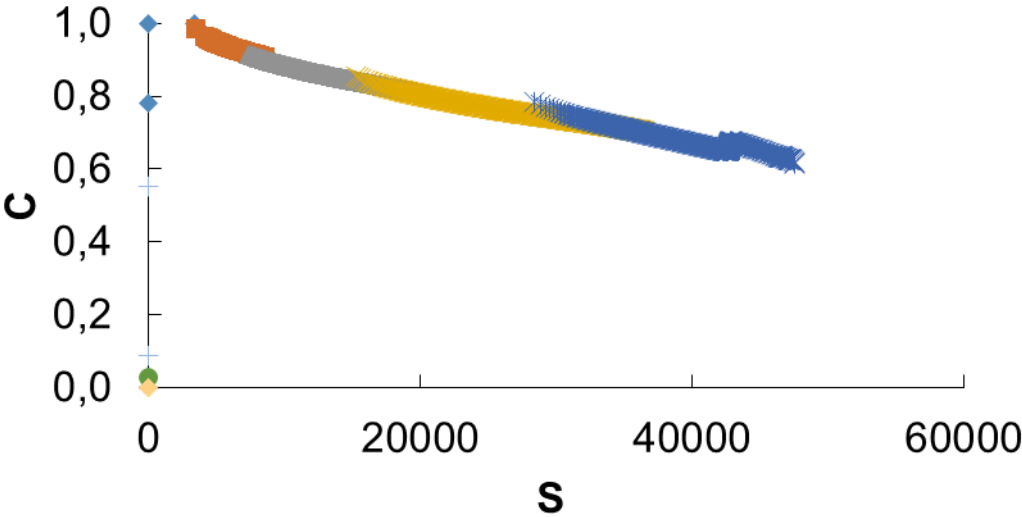
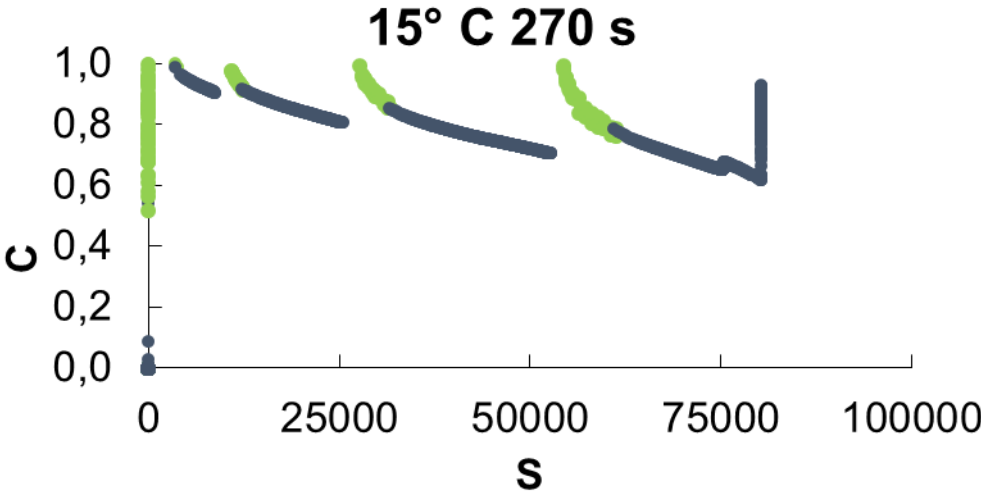


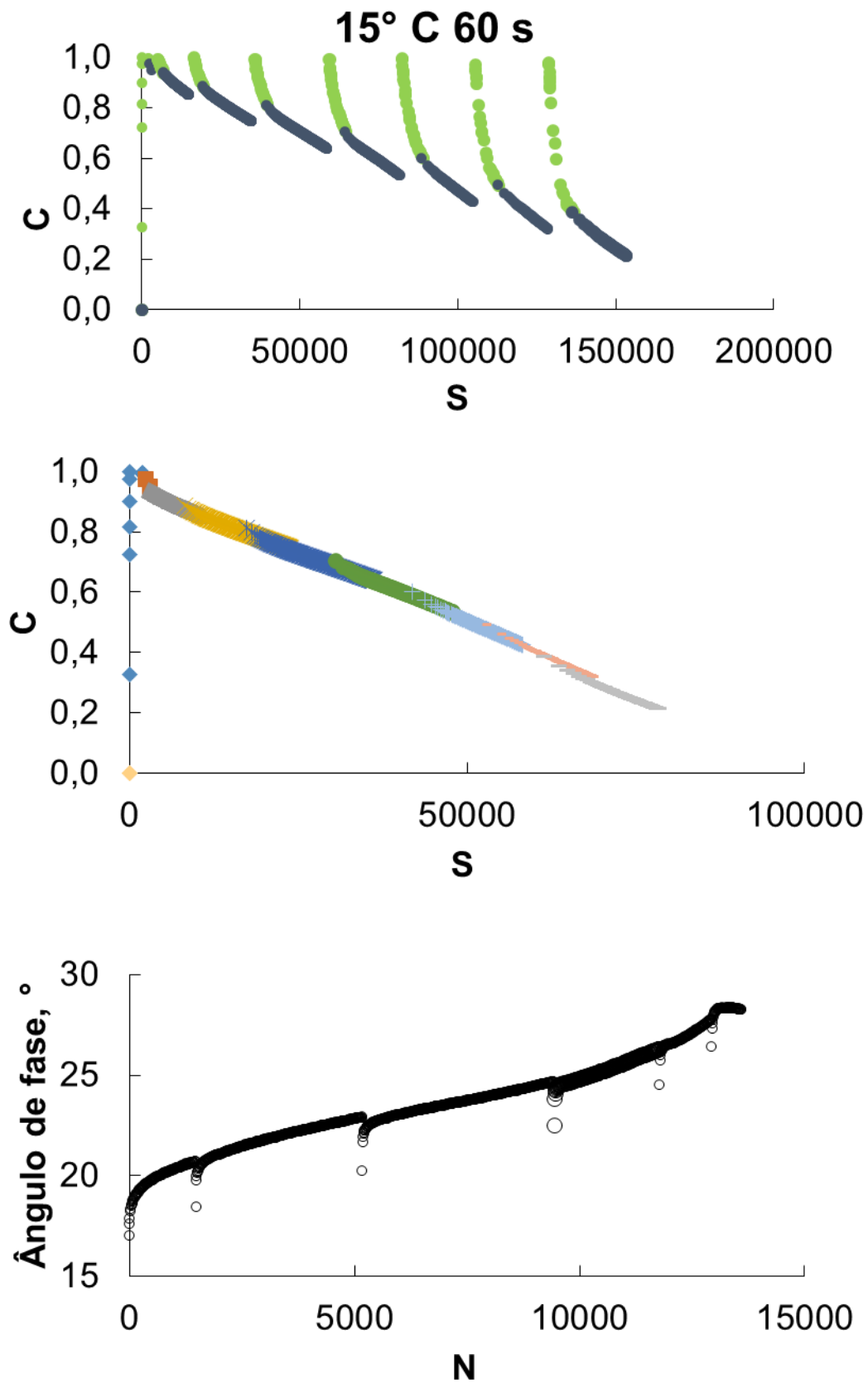


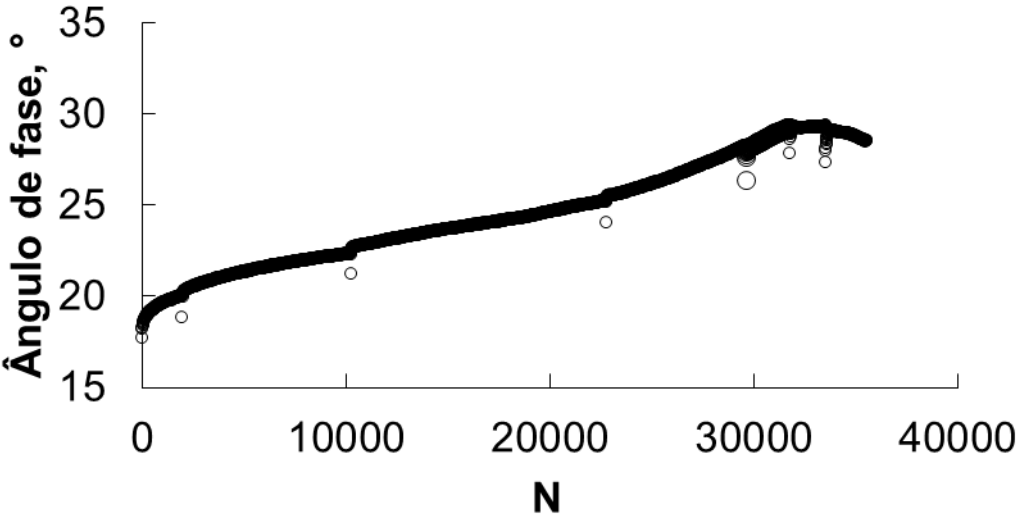
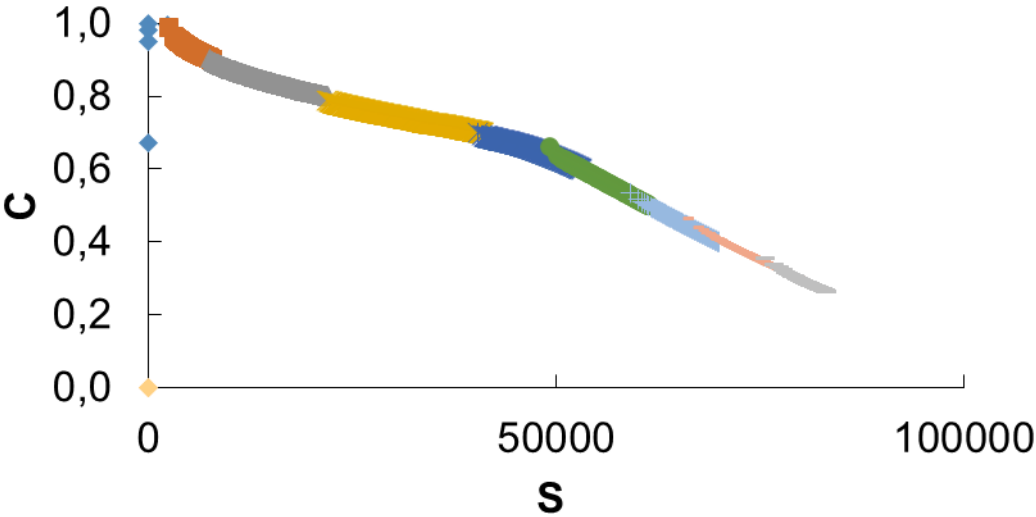
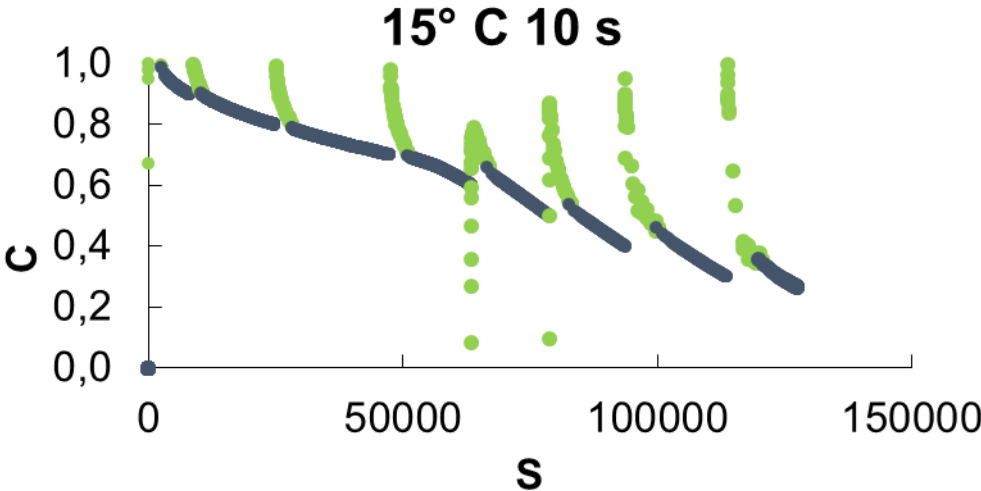












ANEXO C – Resultados de ensaio para mistura 11885:

- **Curva C vs S;**
- **Curva C vs S deslocada;**
- **Ângulo de fase vs Número de ciclos.**

