

**CAROLINA ISHIKAWA KUBIAMI**

**ESTUDOS ACERCA DA ABSORÇÃO DE ASFALTO POR DIFERENTES  
AGREGADOS PÉTREOS**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes.

Área de Concentração: Infraestrutura de Transportes.

**Orientador: Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri**

VERSÃO DEFINITIVA

**SÃO CARLOS**

2017



Class.	TESE ✓
Cutt.	9952
Tombo	T036/18
Sysno	2878139

31100210511

27.03.18

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

I95e Ishikawa Kubiaki, Carolina  
Estudos acerca da absorção de asfalto por diferentes agregados pétreos / Carolina Ishikawa Kubiaki; orientador Glauco Tulio Pessa Fabbri. São Carlos, 2017.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infraestrutura de Transportes -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

1. absorção de asfalto. 2. rice. 3. mistura asfáltica densa. 4. cal hidratada. 5. módulo de resiliência. 6. resistência à tração. I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **CAROLINA ISHIKAWA KUBIAKI**.

Título da dissertação: "Estudos acerca da absorção de asfalto por diferentes agregados pétreos".

Data da defesa: 18/12/2017.

### Comissão Julgadora:

### Resultado:

Prof. Dr. **Glauco Tulio Pessa Fabbri**  
**(Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Profa. Dra. **Lilian Tais Gouveia**  
(Universidade Estadual de Ponta Grossa/UEPG)

Aprovado

Prof. Dr. **Francis Massashi Kakuda**  
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes:  
Profª. Associada **Ana Paula Camargo Larocca**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:  
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

14 03 2018  
AW

*Aos meus pais, Paulo e Sueli,  
pelo incessante amor e apoio.  
Ao Diego por unir sua vida à  
minha.*

## *Agradecimentos*

Primeiramente aos meus pais, Paulo Kubiaki e Sueli Satie Ishikawa, não só pelo incentivo, mas também pelo interesse em cada etapa dessa pesquisa. Agradeço também pela criação pautada no estudo, curiosidade, ciência e história, da qual tenho imenso orgulho. Colhemos, com essa dissertação, mais um fruto de tudo que vocês plantaram ao longo dos meus vinte e cinco anos.

Ao Diego Vinicius Almeida Krik, por me ajudar a peneirar e preparar os agregados, usinar e compactar as amostras. Agradeço também pelo seu incentivo, por seu bom humor e por me motivar a finalizar essa dissertação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Glauco Túlio Pessa Fabbri, por guiar com constante esclarecimento e preocupação todos os aspectos dessa dissertação: desde a estrutura da pesquisa até os mínimos detalhes dos equipamentos de laboratório. Obrigada também por compartilhar parte de seu admirável conhecimento pela Engenharia. Desejo ao Senhor uma encantadora e próspera aposentadoria.

À Prof. Dr. Ana Paula Furlan, por diversas vezes me ajudar com os equipamentos do ensaio de Módulo de Resiliência. Pelas diversas dicas e questionamentos valiosos à minha dissertação. E, também, pelas conversas descontraídas e amigáveis.

Ao Prof. Dr. André Luiz Cunha, pela orientação com relação ao tratamento estatístico dos meus dados, esclarecendo minhas dúvidas e me auxiliando sempre prontamente.

Ao colega e Professor Msc. Lucas Assirati, pela imensa ajuda com a plataforma SPSS, pelos conselhos estatísticos e, principalmente, bom humor e amizade, dos quais sinto falta pela distância.

À amiga Msc. Andrise Buchweitz Klug, pelas conversas, apoio e pela amizade sincera. Desejo a você todo o sucesso que a carreira de Engenheira de Transportes possa lhe proporcionar.

Aos técnicos de laboratório, Ms. Antonio Carlos Gigante, Paulo Toyama e principalmente ao João D. Pereira Filho, pelo auxílio, compartilhamento de técnicas e apoio diário nas etapas de produção e mistura das amostras de CBUQ.

Aos docentes do STT, pelo compartilhamento de conhecimentos e apoio para além das aulas.

Aos funcionários do STT, Toco, Beti, Heloísa e Sabrina.

Às pedreiras Bandeirantes – Sítio Capão Preto, São Gerônimo – Valinhos e Lafarge Holcim – Cajamar, pelo fornecimento de agregados. À CCR Autoban – Rodovia dos Bandeirantes e à refinaria Replan – Paulínia, pelo fornecimento de ligantes asfálticos.

Ao CNPQ pela bolsa de estudo concedida para realização desta pesquisa.

*"We make our world significant by the courage  
of our questions and the depth of our answers."*

Carl Sagan

Essa dissertação apresenta os resultados de um experimento fatorial para avaliar a absorção de ligante asfáltico por diferentes agregados pétreos, tipos e teores de ligantes asfálticos em função do tempo. Para isso, foram produzidas misturas asfálticas com três tipos de agregados de diferentes origens mineralógicas: basalto, calcário e granito; três tipos de ligantes asfálticos: CAP 30/45, CAP 50/70 e CAP Modificado com polímero e três teores de ligante asfáltico: 4,5%, 5% e 5,5%. As misturas asfálticas foram ensaiadas pelo método Rice para avaliar a absorção do ligante ao longo de seis meses. Os resultados de absorção também foram comparados, para o período analisado, com os de amostras compostas por 1,5% de cal hidratada em substituição a parte do fíler. Ensaio de avaliação do comportamento mecânico, como o Módulo de Resiliência e Resistência à Tração, foram realizados em corpos de prova produzidos com as misturas estudadas. Os principais resultados encontrados foram (i) não estabilização da absorção de asfalto em longo prazo após a análise do último tempo proposto (180 dias), apenas uma tendência após 30 dias de usinagem; (ii) os elementos mais representativos da absorção, de acordo com a análise fatorial, foram o CAP Modificado e a Resistência à Tração, já o Tempo e o Módulo de Resiliência apresentaram baixa correlação e, por fim, o CAP 50/70 e o teor de 5,5 se mostraram não-representativos do modelo; (iii) a cal hidratada, de um modo geral, reduziu a absorção em longo prazo, porém, a tendência de estabilização das curvas se mostrou retardada quando em presença do material.

Palavras-chave: Absorção de Asfalto, Rice, Mistura Asfáltica Densa, Cal Hidratada, Módulo de Resiliência e Resistência à Tração.

The purpose of this study is to present the results of experiments, made by factorial design, of the Asphalt Absorption in different types of aggregates, types and content of asphalts. In this regard, three types of aggregates from different mineralogical origins: basaltic, limestone and granite; three types of asphalt: CAP 30/45, CAP 50/70 and CAP Modified with polymers and three asphalt contents: 4,5%, 5% e 5,5%, were combined with each other and tested for a period of six months, to determine the long-term absorption, onwards Rice's method. The results were yet compared, also over a period of six months, with specimens composed by 1,5% of hydrated lime in substitution of part of the filler. Mechanical tests, such as Resilience Modulus and Tensile Strength, were also carried out for all the combinations cited, with dense asphalt mixtures (HMA) specimens. The results were (i) the long-term asphalt absorption didn't show a stabilization after the last proposed time (180 days), just a tendency after 30 days; (ii) the most representative long-term absorption elements, according to the factorial analysis were: CAP Modified and the Tensile Strength, opposite from the Time and the Resilience Modulus and, lastly, the non-representative elements, eliminated from the model, were CAP 50/70 and the content 5,5%; (iii) the hydrated lime, in general terms, reduced the asphalt absorption, but the linearization tendency was delayed by the presence of the material.

Keywords: Asphalt Absorption; Rice, Dense Asphalt Mixture, Hydrated Lime, Resilience Module, Tensile Strength.

<i>Figura 1</i> - Agregados utilizados na pesquisa: (a) – Basalto; (b) – Granito; (c) – Calcário .....	39
<i>Figura 2</i> - Ensaio de densidade aparente: (a) - Etapa de pesagem hidrostática (Pi); (b) - Secagem superficial dos agregados; (c) - Pesagem dos agregados com superfície seca saturada.....	41
<i>Figura 3</i> - Equipamento e software para ensaio de Viscosidade Brookfield .....	44
<i>Figura 4</i> - Viscosidade Brookfield dos CAPs 50/70, 30/45 e Modificado com polímero .....	45
<i>Figura 5</i> - Esquema explicativo - Amostras Base.....	46
<i>Figura 6</i> - Esquema explicativo - Amostras Satélite .....	47
<i>Figura 7</i> - Esquema explicativo - Amostras Compactadas sem presença de Cal .....	48
<i>Figura 8</i> - Esquema explicativo - Amostras Compactadas com presença de Cal .....	49
<i>Figura 9</i> - Usinagem da massa asfáltica .....	50
<i>Figura 10</i> - Ensaio Rice, fase de agitação.....	52
<i>Figura 11</i> - Absorção de asfalto do agregado de Basalto em função do tempo e dos CAPs: (a) - Abs <sub>Asf</sub> (%) CAP 50/70; (b) - Abs <sub>Asf</sub> (%) CAP 30/45; (c) - Abs <sub>Asf</sub> (%) CAP Modificado.....	56
<i>Figura 12</i> - Absorção de asfalto do agregado de Calcário em função do tempo e dos CAPs: (a) - Abs <sub>Asf</sub> (%) CAP 50/70; (b) - Abs <sub>Asf</sub> (%) CAP 30/45; (c) - Abs <sub>Asf</sub> (%) CAP Modificado.....	57
<i>Figura 13</i> - Absorção de asfalto do agregado de Granito em função do tempo e dos CAPs: (a) - Abs <sub>Asf</sub> (%) CAP 50/70; (b) - Abs <sub>Asf</sub> (%) CAP 30/45; (c) - Abs <sub>Asf</sub> (%) CAP Modificado.....	58
<i>Figura 14</i> - Absorção de asfalto do agregado de Basalto em função do tempo e dos teores: (a) - Abs <sub>Asf</sub> (%) teor 4,5%; (b) - Abs <sub>Asf</sub> (%) teor de 5%; (c) - Abs <sub>Asf</sub> (%) teor de 5,5% .....	59
<i>Figura 15</i> - Absorção de asfalto do agregado de Calcário em função do tempo e dos teores: (a) - Abs <sub>Asf</sub> (%) teor de 4,5%; (b) - Abs <sub>Asf</sub> (%) teor de 5%; (c) - Abs <sub>Asf</sub> (%) teor de 5,5% .....	60

<i>Figura 16</i> - Absorção de asfalto do agregado de Granito em função do tempo e dos teores: (a) - Abs <sub>Asf</sub> (%) teor de 4,5%; (b) - Abs <sub>Asf</sub> (%) teor de 5%; (c) - Abs <sub>Asf</sub> (%) teor de 5,5%.....	61
<i>Figura 17</i> - Absorção de asfalto do em função do CAP 50/70, do tempo e dos teores: (a) - Abs <sub>Asf</sub> (%) teor 4,5%; (b) - Abs <sub>Asf</sub> (%) teor 5,0%; (c) - Abs <sub>Asf</sub> (%) teor 5,5%.....	62
<i>Figura 18</i> - Absorção de asfalto do em função do CAP 30/45, do tempo e dos teores: (a) - Abs <sub>Asf</sub> (%) teor 4,5%; (b) - Abs <sub>Asf</sub> (%) teor 5,0%; (c) - Abs <sub>Asf</sub> (%) teor 5,5%.....	63
<i>Figura 19</i> - Absorção de asfalto do em função do CAP Modificado, do tempo e dos teores: (a) - Abs <sub>Asf</sub> (%) teor 4,5%; (b) - Abs <sub>Asf</sub> (%) teor 5,0%; (c) - Abs <sub>Asf</sub> (%) teor 5,5%.....	63
<i>Figura 20</i> - Absorção de asfalto em função da presença de Cal, do tempo e dos agregados: (a) - Abs <sub>Asf</sub> (%) Basalto; (b) - Abs <sub>Asf</sub> (%) Granito; (c) - Abs <sub>Asf</sub> (%) Calcário .....	65
<i>Figura 21</i> - Resistência à Tração em função do tempo, do tipo de ligante, da presença ou não de cal e dos agregados: (a) Basalto; (b) Granito e (c) Calcário.....	67
<i>Figura 22</i> - Módulo de Resiliência em função do tempo, do tipo de ligante, da presença ou não de cal e dos agregados: (a) Basalto; (b) Granito e (c) Calcário.....	69
<i>Figura 23</i> - Elementos da absorção de asfalto em função dos ligantes asfálticos: (a) - Abs <sub>inicial</sub> ; (b) - Abs <sub>final</sub> ; (c) - Abs <sub>Δ</sub> .....	72
<i>Figura 24</i> - Elementos da absorção de asfalto em função dos teores: (a) - Abs <sub>inicial</sub> ; (b) - Abs <sub>final</sub> ; (c) - Abs <sub>Δ</sub> .....	74
<i>Figura 25</i> - Elementos da absorção de asfalto em função dos ligantes asfálticos e da presença de cal: (a) - Abs <sub>inicial</sub> ; (b) - Abs <sub>final</sub> ; (c) - Abs <sub>Δ</sub> .....	76
<i>Figura 26</i> - Exemplificação da aplicação de componentes não-numéricos para ranqueamento dos elementos .....	77
<i>Figura 27</i> - Matriz de Correlação .....	86

*Lista de Tabelas*

<i>Tabela 1</i> - Massa mínima de amostra para ensaio de Densidade Aparente .....	40
<i>Tabela 2</i> - Densidade Aparente, Real e Absorção de Água .....	42
<i>Tabela 3</i> - Caracterização dos asfaltos .....	43
<i>Tabela 4</i> - Temperaturas de Usinagem e Compactação .....	45
<i>Tabela 5</i> - Faixas granulométricas DNIT 031/2004 .....	49
<i>Tabela 6</i> - Quantidades mínimas de amostra para ensaio de Rice .....	52
<i>Tabela 7</i> - Valores médios da AbsAsf (%) .....	55
<i>Tabela 8</i> - AbsAsf (%) – Amostras Com Cal .....	64
<i>Tabela 9</i> - Resistência à Tração ( $N/m^2$ ) em função do tipo de agregado, tipo de ligante asfáltico, tempo e presença ou não de cal.....	66
<i>Tabela 10</i> - Módulo de Resiliência (kPa) em função do tipo de agregado, tipo de ligante asfáltico, tempo e presença ou não de cal.....	68
<i>Tabela 11</i> - Elementos da Absorção em Função dos Agregados .....	71
<i>Tabela 12</i> - Elementos da Absorção em Função dos Teores.....	73
<i>Tabela 13</i> - Elementos da Absorção em Função da Presença de Cal Hidratada .....	75
<i>Tabela 14</i> - Análise Fatorial por Regressão Linear Múltipla .....	78
<i>Tabela 15</i> - Coeficientes e Erros Médios das Equações Paramétricas .....	79
<i>Tabela 16</i> - Análise Fatorial por Regressão Linear Múltipla – Módulo de Resiliência .....	81
<i>Tabela 17</i> - Análise Fatorial por Regressão Linear Múltipla – Resistência à Tração	82
<i>Tabela 18</i> - Coeficientes e Erros Médios das Equações Paramétricas – Resistência à Tração .....	83
<i>Tabela 19</i> - Coeficientes e Erros Médios das Equações Paramétricas – Módulo de Resiliência .....	84

*Lista de Siglas e Abreviaturas*

$Ab_{\text{água}}$	Absorção de Água
$Ab_{\text{asf}}$	Absorção de Asfalto
$CAP$	<i>Concreto Asfáltico de Petróleo</i>
$D_{ap}$	Densidade Aparente
$DMC$	Dimensão Máxima Característica
$DMT$	Densidade Máxima Teórica
$D_r$	Densidade Real
$D_{ss}$	Densidade Efetiva
$MR$	Módulo de Resilência
$P_h$	Peso Hidrostático
$P_i$	Peso com a Superfície Seca Saturada
$P_s$	Peso Seco
$PT$	Porosidade Total
$RT$	Resistência à Tração
$\rho_{ef}$	Densidade Efetiva do Agregado
$\sigma_t$	Tensão de Tração
$\epsilon_t$	Deformação Horizontal Específica Recuperável

<i>Resumo</i> .....	IX
<i>Abstract</i> .....	XI
<i>Lista de Figuras</i> .....	XIII
<i>Lista de Tabelas</i> .....	XV
<i>Lista de Siglas e Abreviaturas</i> .....	XVII
<b>1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS</b> .....	<b>23</b>
1.1. INTRODUÇÃO.....	23
1.2. OBJETIVO GERAL.....	255
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
1.4. JUSTIFICATIVA.....	25
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>27</b>
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE A ABSORÇÃO DE ASFALTO.....	27
2.2. PRINCIPAIS PROPRIEDADES DO AGREGADO E DO ASFALTO QUE INFLUENCIAM A ABSORÇÃO DE ASFALTO.....	28
2.1.1 Porosidade.....	28
2.1.2 Tamanho, Distribuição dos Poros e Absorção Seletiva.....	28
2.1.3 Granulometria, Angularidade e Textura.....	31
2.3. ABSORÇÃO EM LONGO PRAZO.....	31
2.4. RELAÇÃO ENTRE A ABSORÇÃO DE ÁGUA E ASFALTO.....	32
2.5. CORREÇÃO DA ABSORÇÃO.....	33
2.6. INFLUÊNCIA DA ABSORÇÃO DE ASFALTO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DA MISTURA ASFÁLTICA.....	34
2.7. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ASFALTO.....	34
<b>3. MÉTODO DE ANÁLISE</b> .....	<b>39</b>
3.1. OS AGREGADOS MINERAIS.....	39
3.1.1 Ensaio de Densidade Aparente.....	40
3.2. OS ASFALTOS.....	42
3.1.2 Determinação das temperaturas de usinagem e compactação.....	43
3.3. MISTURAS ASFÁLTICAS.....	45
3.4. USINAGEM E COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	49
3.4.1 Faixa Granulométrica.....	49

3.4.2	Usinagem das Misturas Asfálticas.....	50
3.4.3	Compactação das amostras.....	51
3.5.	ENSAIOS RICE, MÓDULO DE RESILIÊNCIA E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	51
3.5.1	Ensaio Rice .....	51
3.5.2	Ensaio De Resistência à Tração Por Compressão Diametral .....	53
3.5.3	Ensaio De Módulo De Resiliência .....	53
<b>4.</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>55</b>
4.1.	ABSORÇÃO EM LONGO PRAZO DAS AMOSTRAS BASE .....	55
4.1.1	Valores Médios.....	55
4.1.2	Análise de CAPs em função dos agregados .....	56
4.1.3	Análise de teores em função dos agregados .....	58
4.1.4	Análise de teores em função dos CAPs .....	61
4.2.	ABSORÇÃO EM LONGO PRAZO DAS AMOSTRAS COM CAL.....	64
4.3.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	65
4.4.	MÓDULO DE RESILIÊNCIA .....	67
4.5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	69
<b>5.</b>	<b>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS APÓS TRATAMENTO</b>	
	<b>ESTATÍSTICO.....</b>	<b>72</b>
5.1.	ANÁLISE DA ABSORÇÃO EM FUNÇÃO DOS AGREGADOS.....	72
5.1.1	Elementos da Absorção - Média Entre os Agregados.....	72
5.1.2	Elementos da Absorção - Média Entre os Teores .....	74
5.1.3	Elementos da Absorção - Análise da CAL .....	76
5.2.	ANÁLISE FATORIAL DA ABSORÇÃO EM LONGO PRAZO EM FUNÇÃO	
	DOS AGREGADOS .....	78
5.2.1	Análise Fatorial por Regressão Linear Múltipla.....	78
5.3.	EQUAÇÃO PARAMÉTRICA POR CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO CRUZADA	80
5.4.	ANÁLISE FATORIAL DOS ENSAIOS DE RESPOSTA MECÂNICA –	
	MÓDULO DE RESILIÊNCIA E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	81
5.4.1	Equação Paramétrica por Calibração e Validação – Ensaio de Resposta	
	Mecânica .....	84
5.5.	MATRIZ DE CORRELAÇÃO .....	86
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>89</b>
6.1.	CURVAS DE ABSORÇÃO EM LONGO PRAZO.....	89
6.2.	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ELEMENTOS DA ABSORÇÃO .....	89

6.3. ANÁLISES FATORIAIS .....	89
6.4. EQUAÇÕES PARAMÉTRICAS .....	90
<b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>91</b>
<i>Referências</i> .....	<b>93</b>
<i>Anexo</i> .....	97

## 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

---

### 1.1. INTRODUÇÃO

No projeto de dosagem de misturas asfálticas para pavimentos flexíveis, nos quais o asfalto é utilizado como material ligante, é amplamente reconhecido que variações excessivas na sua quantidade poderão resultar em misturas com excesso ou falta de ligante. As que possuem material ligante em excesso tendem a apresentar exsudação e, eventualmente, deformação permanente; já as misturas pobres em ligante asfáltico e que, conseqüentemente possuem maior volume de vazios, podem vir a sofrer com a permeabilidade de água, que pode levar à falta de coesão, ou seja, perda de adesividade entre o agregado e o masticque asfáltico (Airey & Choi, 2002; Airey *et al.* 2007).

Dessa maneira, como os agregados tendem a absorver asfalto, seja em maior ou menor escala, negligenciar o fenômeno pode resultar em uma diminuição da quantidade de ligante asfáltico efetivo na mistura, principalmente em situações onde a substituição do agregado absorvedor por outro, de diferente origem mineralógica e de menor absorção, não é viável devido aos custos com transporte (Lettier *et al.*, 1949; Curtis *et al.*, 1993).

A absorção de asfalto é um fenômeno complexo, que envolve propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos agregados, bem como certas características dos asfaltos. Além disso, a absorção é um processo de caráter particular, que depende, principalmente, das características do agregado e do seu comportamento frente ao fenômeno. Devido a isso, não há uma relação que possa prever com confiança os valores de absorção que cada mistura pode atingir, o que torna necessário uma análise particular de cada caso.

A porosidade do agregado, principal característica dos agregados no fenômeno da absorção de asfalto, se caracteriza pela presença de poros e capilares que conectam toda uma rede de canaliculos na superfície e no interior do agregado e está diretamente relacionada, tanto com a quantidade de asfalto que o agregado é capaz de absorver, quanto ao modo com que o ligante asfáltico é absorvido. Lee (1969) e Lettier *et al.* (1949) observaram em seus estudos que existem poros que podem ser penetráveis pela água, porém não pelo asfalto, devido à viscosidade do ligante. A viscosidade é ainda a característica que influencia a chamada *absorção seletiva*,

fenômeno no qual os componentes do asfalto, como os asfaltenos e resinas, são absorvidos de maneiras diferentes dependendo tanto dos diferentes tamanhos que os poros podem apresentar quanto da distribuição dos tamanhos dos poros na superfície e no interior do agregado.

Além disso, a absorção ocorre tanto no momento da usinagem, em maior proporção, quanto ao longo da vida útil do revestimento asfáltico, de maneira menos acentuada, como observado por Gouveia *et al.* (2005). Assim, entender e, eventualmente, corrigir o problema também se torna um desafio, haja vista que adicionar mais asfalto para compensar a absorção por parte do agregado, pode provocar exsudação de ligante asfáltico e deformação permanente da camada de revestimento, pois o ligante asfáltico adicionado pode demorar meses até ser absorvido por completo pelo agregado.

Lee (1969) apresenta quatro consequências da absorção de asfalto para a camada de revestimento:

1. Variação dos parâmetros volumétricos (vazios do agregado mineral, volume de vazios e relação betume-vazios) determinados em projeto e aqueles encontrados na camada já compactada. Uma vez que esses parâmetros são usados como critério para o projeto de revestimento, incoerências entre os valores podem comprometer a durabilidade e estabilidade da camada;
2. Filme asfáltico que reveste os agregados mais fino e susceptível às tensões e intempéries;
3. Falta de ligante asfáltico na mistura, aumentando os vazios e a propensão à degradação por água;
4. A absorção seletiva pode alterar o comportamento físico, químico e até reológico do asfalto, visto que sua estrutura molecular é alterada pelo fenômeno.

Assim, dada a complexidade e particularidade da absorção de asfalto, o presente estudo teve por finalidade analisar o comportamento do fenômeno, tanto visualmente quanto estatisticamente, desde a usinagem até o período de seis meses em função de todos os elementos componentes das amostras além dos dados, também ao longo do tempo, dos ensaios de Resistência à Tração e do Módulo de Resiliência.

## 1.2. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é analisar a absorção de ligante asfáltico, ao longo de seis meses, para agregados pétreos de diferentes origens mineralógicas, tipos e teores de asfalto e com ou sem a presença de cal nas misturas asfálticas.

## 1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com base nos estudos, pretende-se desenvolver e analisar, em função da absorção de ligante asfáltico em longo prazo, as etapas:

- a) De planejamento experimental: escolha dos elementos das amostras, coleta e preparação;
- b) Da produção das amostras, incluindo a usinagem e compactação, de acordo com o método Marshall;
- c) Dos ensaios de Rice, Resistência à Tração e Módulo de Resiliência nos tempos determinados para o estudo;
- d) De composição de curvas de absorção de asfalto, Resistência à Tração e Módulo de Resiliência, em longo prazo, para cada amostra proposta, para fins de compreensão visual do fenômeno;
- e) Do ranqueamento dos elementos para determinação da influência dos mesmos no fenômeno a partir de Regressão Linear Múltipla;
- f) Da composição de equações para determinação da absorção de asfalto em longo prazo a partir do método de Calibração e Validação Cruzada;

## 1.4. JUSTIFICATIVA

A absorção de asfalto é uma característica intrínseca dos agregados, de difícil previsão e correlação com parâmetros volumétricos ou características físicas. Frequentemente a correção do teor de asfalto em relação à absorção, durante a etapa de projeto, é negligenciada ou feita de maneira inadequada pelos projetistas de misturas asfálticas, uma vez que a estabilização da absorção em longo prazo pode demorar meses para ocorrer. Assim, o estudo em questão pretende esclarecer, à luz das combinações propostas de agregados, tipos e teores de asfaltos e da presença ou não de cal, o modo como cada um desses elementos influencia a absorção de asfalto em longo prazo. E ainda, dada a complexidade do fenômeno e da sua predição, o estudo pretende contribuir para um melhor entendimento do mesmo a partir de sua

relação com os resultados dos ensaios de resposta mecânica propostos, Resistência à Tração e Módulo de Resiliência, comumente associados à diversas características físicas das misturas asfálticas.

### 2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE A ABSORÇÃO DE ASFALTO

O conceito geral de absorção, segundo Ferreira (1999), pode ser definido como a fixação de uma substância, líquida ou gasosa, no interior da massa de outra substância, geralmente sólida, e resultante de um conjunto complexo de fenômenos de capilaridade, atrações eletrostáticas, reações químicas etc. Em se tratando da absorção de ligante asfáltico pelos agregados, especificamente, o fenômeno é especialmente complexo, uma vez que depende de diversas características do agregado, como a porosidade, o tamanho e a distribuição dos tamanhos dos poros, a absorção seletiva e em longo prazo e ainda de características do ligante asfáltico, como a viscosidade e a composição química (Kandhal & Khatri, 1992; Gouveia, 2006).

Gouveia (2006) esclarece ainda que a absorção não é um fenômeno que ocorre eventualmente, pelo contrário, a maioria dos agregados apresenta algum grau de absorção. Deve-se considerar também o caráter particular da absorção de ligante asfáltico, pois cada mistura apresenta suas particularidades, sendo assim seria necessário o estudo de cada caso isoladamente.

Dada a ocorrência da absorção e a falta de correção do teor de ligante, menos asfalto presente na mistura estará atuando de maneira efetiva, pois parte dele terá sido absorvido pelo agregado, resultando em valores de propriedades volumétricas como volume de vazios, vazios do agregado mineral e vazios preenchidos pelo asfalto, diferentes daqueles determinados na fase de projeto. A diferença dos valores previstos em relação aos encontrados na camada já compactada pode comprometer a vida útil do revestimento, uma vez que toda a projeção de manutenções, restaurações e a própria vida útil, foi feita a partir dos dados obtidos na fase de projeto, apresentam-se diferentes dos parâmetros observados na camada de revestimento já em utilização.

De maneira geral, somando a complexidade da absorção com sua característica individual por parte dos agregados, o fenômeno necessita de uma análise particular durante o projeto de cada mistura asfáltica. Porém, o agregado é, segundo Lettier *et al.* (1949), o componente de maior impacto e responsabilidade na determinação da absorção de asfalto.

## 2.2. PRINCIPAIS PROPRIEDADES DO AGREGADO E DO ASFALTO QUE INFLUENCIAM A ABSORÇÃO DE ASFALTO

As principais propriedades dos agregados em relação ao fenômeno da absorção de asfalto são a porosidade, a distribuição e tamanho dos poros e as suas composições química e mineralógica (Gouveia *et al.*, 2004).

A principal característica do asfalto que influencia a taxa de absorção em longo prazo é a viscosidade (Khendal & Katri, 1991). A composição química do asfalto, no entanto, pode influenciar o fenômeno chamado *absorção seletiva*, a qual certos componentes são absorvidos por poros específicos do agregado, podendo fazer com que o asfalto sofra importantes modificações químicas, físicas e até reológicas (Hicks, 1991).

### 2.1.1 Porosidade

Os poros dos agregados foram observados em escala microscópica por Kandhal & Lee (1972) e definidos como cavidades de formas irregulares que podem ser conectadas por capilares onde ambos não possuem forma nem diâmetro definidos. As principais características dos poros que são geralmente determinadas são a porosidade, a distribuição e seus tamanhos, além de sua superfície específica (área interna do conjunto poros + capilares).

Lettier *et al.* (1949) ao analisarem microscopicamente a estrutura porosa dos agregados de calcário, quartzo e dolomita, também notaram que os agregados de absorção próxima ou igual a zero, possuíam estrutura cristalina compacta, densa e de grânulos pequenos, enquanto os que absorviam ligante consideravelmente se caracterizavam por inúmeros interstícios entre os cristais.

Os autores puderam ainda correlacionar a porosidade do agregado, definida de maneira simples como a relação entre o volume de vazios e o volume total de um material, com a densidade aparente do agregado. Quando analisados agregados de mesma origem mineralógica, tanto maior a absorção de água quanto menor fosse a densidade aparente, numa escala linear, o que confirma que a absorção de asfalto é um fenômeno que acontece tanto nos poros como entre suas conexões.

### 2.1.2 Tamanho, Distribuição dos Poros e Absorção Seletiva

O tamanho, a distribuição e a capilaridade, definida pela conexão entre os poros, podem determinar a quantidade e o mecanismo de absorção. Enquanto o

tamanho do poro influencia na seletividade da absorção, pois poros muito pequenos que são penetráveis pela água podem não ser penetráveis pelo asfalto, dada a maior viscosidade do material ligante, a distribuição dos poros é responsável pela diferença no comportamento da absorção de água e asfalto (Gouveia, 2006).

Um dos primeiros estudos para determinação da distribuição dos tamanhos dos poros em sólidos porosos foi proposto por Washburn (1921) *apud* Gouveia (2006)<sup>1</sup>, no qual o pesquisador sugeriu a utilização de mercúrio, baseado em um modelo de sistema de capilares circulares que foi utilizado como base para muitos métodos posteriores.

Lee (1969), em seus estudos de correlação entre as propriedades físicas e químicas dos agregados no processo de absorção, pôde notar pelos gráficos de distribuição dos tamanhos dos poros, uma variação desigual na superfície e no interior do agregado.

Lettier *et al.* (1949), no entanto, foram pioneiros na descoberta do caráter *seletivo* da absorção de asfalto pelos poros dos agregados. Ao analisar microscopicamente a absorção de um Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CBUQ) em um poro específico de dolomita, os pesquisadores notaram que certas moléculas diluentes presentes no asfalto – conhecidas como resinas e óleos aromáticos, tendem a serem absorvidas pelas fissuras dos agregados, que podem estar presentes tanto pelos efeitos do processo de britagem quanto pela própria formação geológica da rocha. Essas moléculas, quando em pouca quantidade, caracterizam os asfaltos como Sol – ligante com grande quantidade de óleos aromáticos, grande susceptibilidade térmica e baixa resistência à aplicação de cargas diretas – ou, quando em abundância, como Gel – asfaltos com baixa quantidade de moléculas diluentes, mais resistentes à aplicação das cargas e menos suscetíveis ao retorno (Leite, 1999; Shell, 2003).

Já em se tratando dos asfaltenos, responsáveis pela viscosidade do ligante, foram observados sendo absorvidos pelos poros, lentamente, enquanto o asfalto penetra o agregado. Khendal & Katri (1991) observaram ainda que, asfaltos contendo mais asfaltenos tendem a ser mais absorvidos pelos agregados, justamente pela presença mais evidente nos agregados dos poros frente às fissuras, facilitando a ocorrência da absorção seletiva.

---

<sup>1</sup> Edward W. Washburn (1921). *The Dynamics of Capillary Flow*. Physical Review.

No entanto, Curtis *et al.* (1993), ao analisarem os efeitos da absorção seletiva através de duas espectroscopias, não relacionaram o fenômeno com a definição de absorção, mas com a adsorção, onde as partículas seriam, sim, selecionadas pelos poros, mas não deixariam de fazer parte do ligante asfáltico, como previamente sugerido por Lettier *et al.* (1949).

A relação entre o tamanho do poro e a sua capacidade de absorção de materiais viscosos foi também observada por Lee (1969) onde, poros maiores que 0,5  $\mu\text{m}$  influenciam na quantidade e no mecanismo da absorção de asfalto, que continua sendo absorvido até o diâmetro limite de 0,1  $\mu\text{m}$ , tamanho no qual o poro deixa de ter influência. Ainda em relação ao agregado, a absorção seletiva faz com que as porções de asfalto absorvidas pela partícula passe do estado homogêneo, no qual qualquer porção de asfalto absorvido é composto pelos mesmos elementos, para o heterogêneo, onde cada montante absorvido é variável, devido aos diferentes componentes absorvidos pelos poros (Luo & Lytton 2012).

O caráter de absorção seletiva apresentado pelo agregado é passível de alterar o comportamento físico, reológico e químico do asfalto, que pode apresentar características diferentes quando analisado antes ou após a etapa de usinagem. A viscosidade do ligante, no entanto, influi diretamente na desagregação do revestimento asfáltico, pois ligantes asfálticos mais viscosos tendem a resistir mais ao descolamento da película do que asfaltos menos viscosos (Hicks, 1991). Assim, a perda da adesividade pode ser relacionada ao comportamento de absorção seletiva, uma vez que a ocorrência do fenômeno descaracteriza a estrutura molecular do ligante, alterando seu comportamento reológico (Huang *et al.*, 2003). Essa descaracterização do asfalto presente na massa asfáltica, pode levar a camada de revestimento à instabilidade ou até mesmo rompimento por fadiga (Curtis *et al.*, 1993)

Em relação à composição química dos agregados, Lee (1969) observou que agregados com maior presença de  $\text{MgCO}_3$  eram mais propensos à porosidade e, conseqüentemente, à absorção de asfalto. Porém, tanto Lee (1969) quanto Lettier *et al.* (1949) não encontraram relações químicas que confirmassem a maior absorção de asfalto por parte do agregado quando composto por determinados componentes, pois, agregados de composições químicas semelhantes podem apresentar diferentes taxas de absorção.

### 2.1.3 Granulometria, Angularidade e Textura

Alani *et al.* (1987) observaram um aumento na absorção de asfalto para faixas granulométricas mais graúdas (#3/4 até n. 10). Os agregados graúdos foram tidos, ainda, como responsáveis pela taxa de absorção de asfalto em longo prazo, uma vez que as faixas granulométricas mais finas são preenchidas mais rapidamente pelo ligante (Lee *et al.*, 1990).

Em relação à angularidade e textura do agregado, Curtis *et al.*, 1993, não encontraram nenhuma relação com a absorção de asfalto em longo prazo.

### 2.3. ABSORÇÃO EM LONGO PRAZO

A relação crescente da absorção de ligante asfáltico em relação ao tempo, pôde ser detectada por Nevitt & Krchma (1942), ainda em caráter pioneiro, por meio de ensaios com agregados imersos em querosene.

Lettier *et al.* (1949) puderam perceber que quanto mais viscoso é o material, mais tempo ele leva para penetrar nos poros e capilares, haja vista que nem mesmo a água, após imersão do agregado por 24 horas, é capaz de recobrir toda a superfície específica do mesmo. Chadbourn *et al.* (2000) observaram que, ao manterem a mistura asfáltica em estufa, após a usinagem, sob altos valores de temperatura (entre 120 e 170°C) a absorção ocorria continuamente. No entanto, na prática, Cooley & Williams (2009) detectaram uma absorção crescente durante as etapas de usinagem, estocagem, transporte e em serviço propriamente dito, sendo que a etapa mais significativa de absorção, em termos de amplitude, foi o tempo de transporte.

Lee (1969), ao avaliar a absorção de asfalto por agregados de diferentes composições químicas, pôde notar similaridades em relação ao tempo, como por exemplo, o primeiro minuto de imersão, é responsável pela absorção de mais de 50% da absorção total pelos agregados. As características dos líquidos que influenciam na taxa de absorção são a tensão superficial e o ângulo de contato do líquido com o agregado. O pesquisador observou ainda que apesar da absorção crescer ao longo do tempo, a taxa é decrescente, e tende à estabilização. A absorção de asfalto em função do tempo é ainda expressa como não-linear, haja vista que a mesma depende da força de capilaridade exercida pelos poros dos agregados, que pode, ainda, variar de acordo com a temperatura (Kandhal e Khatri, 1992).

Curtis *et al.* (1993), ao analisarem comparativamente os métodos de determinação da absorção de asfalto, apesar de terem analisado apenas a absorção em longo prazo de quatro horas após a etapa de usinagem, concluíram que a curva hiperbólica da absorção em longo prazo pode ser determinada, bem como a porcentagem limite de absorção de asfalto, a partir de somente três valores: ao tempo zero, ou logo após a etapa de usinagem, e a partir de mais dois tempos de análise.

Em se tratando da viscosidade, os pesquisadores concluíram ainda que a viscosidade do asfalto, somada à influência da porosidade, tem também efeito direto na taxa absorção de asfalto. O ângulo de contato e a tensão superficial exercida pela viscosidade são os fatores determinantes no comportamento da taxa de absorção de asfalto. Sendo assim, de maneira geral, quanto menor a viscosidade, maior e mais rápida será a taxa de absorção de asfalto em longo prazo (Gouveia *et al.*, 2005).

#### 2.4. RELAÇÃO ENTRE A ABSORÇÃO DE ÁGUA E ASFALTO

Ainda na fase de tentativas de determinação da absorção de ligante por meio do uso de outros materiais, como querosene, água e hidrocarbonetos, Donaldson *et al.* (1947) notaram, ao analisarem o querosene, particularmente, que não havia uma correlação entre a absorção de querosene e água. O mesmo foi observado por Lettier *et al.* (1949) e por Kandhal & Khatri (1992) em relação ao asfalto, onde, apesar de uma maior absorção de água predizer uma tendência de maior absorção de asfalto, não existe, no entanto, uma relação que possa prever uma a partir da outra. No entanto, os pesquisadores verificaram que a análise da absorção de ao menos dois hidrocarbonetos pode prever, com maior margem de acerto, o comportamento do agregado frente à presença de ligante asfáltico.

Alani *et al.* (1987) apesar de confirmar que o volume de asfalto absorvido é sempre menor que o de água, não encontrou nenhuma relação consistente de predição de uma a partir da outra. No entanto, Fadhil *et al.* (2015), ao analisarem a correlação entre a absorção de água e asfalto para agregados de calcário britados, não britados e ainda uma mistura das duas origens, notaram que a última foi a amostra a qual apresentou maior correlação entre os valores de absorção de água e asfalto ( $R^2$  de 0,89).

Kandhal & Khatri (1992) também obtiveram sucesso ao determinar uma correlação entre a absorção de água e asfalto para um mesmo agregado, no entanto, ao analisarem agregados de outras origens mineralógicas, os pesquisadores puderam

notar que agregados diferentes, com valores muito próximos de absorção de água, possuíam valores de absorção de asfalto bastante diferentes.

A diferença de viscosidade entre os dois líquidos faz com que sejam esperadas diferenças nos valores de absorção, sendo assim, pode-se concluir sobre o problema que:

- a) em geral, a absorção de água indica um *potencial* da absorção de asfalto. Agregados com altos valores de absorção de água tendem a absorver mais asfalto do que aqueles com baixos valores;
- b) determinações diretas da absorção de asfalto são sempre mais confiáveis e preferíveis do que predições indiretas.

## 2.5. CORREÇÃO DA ABSORÇÃO

Donaldson *et al.* (1947), apesar de julgarem que o problema da correção da absorção de asfalto pelo agregado como dependente da capacidade crítica e sensibilidade do engenheiro, notaram a particularidade de cada mistura asfáltica, onde as condições do campo, dos agregados, de consistência e temperatura do asfalto e da taxa de cura e resfriamento deveriam ser consideradas individualmente.

Lee *et al.* (1990) também descrevem a dificuldade de sanar o problema, pois, mesmo que se aumente o teor de asfalto para compensação da absorção em curto prazo, o problema não seria totalmente resolvido, pois os agregados poderiam continuar absorvendo asfalto meses após a compactação. Se, por outro lado, houvesse a adição de asfalto suficiente para compensar a absorção em longo prazo, a mistura poderia sofrer com exsudação e baixa estabilidade, devido ao excesso de ligante que demoraria para ser incorporado à mistura.

Lettier *et al.* (1947) avaliaram a adição de silicato de sódio, previamente a usinagem, para selagem dos poros da superfície do agregado tornando-os assim impermeáveis. Apesar de obterem sucesso no processo inicial, os pesquisadores notaram que após a usinagem, no período de secagem e resfriamento da mistura asfáltica, o ar presente dentro dos poros conseguiam escapar e craquelar o material selante, comprometendo a impermeabilização.

Os pesquisadores analisaram ainda o processo de usinagem da mistura asfáltica e de compactação do material, quando mantidos nas temperaturas limites mínimas. Dessa maneira, o aumento da viscosidade do ligante, frente à redução de

temperatura, tende a manter a absorção em um nível mínimo, onde, mesmo não corrigindo o problema por completo, pode ao menos reduzir os danos da absorção total e garantir mais qualidade ao revestimento do pavimento. Porém, apesar de notarem uma significativa redução da absorção de ligante quando a mistura asfáltica é usinada e compactada nas temperaturas limites mínimas, os pesquisadores ressaltam a dificuldade de controle de tais temperaturas, haja vista que trabalhar nos valores limites de temperatura, para os processos de usinagem e compactação, é sempre arriscado e pouco indicado.

## 2.6. INFLUÊNCIA DA ABSORÇÃO DE ASFALTO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DA MISTURA ASFÁLTICA

Apesar da absorção de asfalto beneficiar, em parte, a mistura asfáltica, com aumento da resistência à tração a partir do intertravamento entre as partículas (Curtis *et al.*, 1993; Lee *et al.*, 1990) e ainda ter sua flexibilidade melhorada a partir da presença de agregados altamente absorsores (Alani *et al.*, 1987), a principal consequência negativa da absorção de asfalto é a diminuição da espessura do filme de ligante que envolve o agregado. Conseqüentemente, a camada asfáltica apresentará uma quantidade menor de asfalto efetivo do que os valores determinados na fase de projeto. Facilitando, assim, o aparecimento de trincas precoces na camada de revestimento a partir da perda de elasticidade da mesma (Donaldson *et al.*, 1947).

Em função da absorção seletiva, a camada de revestimento pode ainda sofrer alterações em seu comportamento mecânico, principalmente em se tratando dos ensaios de resposta mecânica como o Módulo de Resiliência e Resistência à Tração, devido à alteração da composição do agregado, frente ao fenômeno, após a etapa de usinagem (Luo & Lytton, 2013).

Ainda em relação aos ensaios de resposta mecânica, Gouveia *et al.* (2004) constatou, ao relacionar a absorção em longo prazo com a Resistência à Tração da mistura asfáltica, que uma absorção em longo prazo maior, corresponde também à valores de Resistência à Tração maiores.

## 2.7. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ASFALTO

Os primeiros métodos para determinação da absorção de asfalto eram comparativos com outros líquidos, como o estudo proposto por Goshorn & Williams

(1942) *apud* Lettier *et al.* (1947)<sup>1</sup> que procurou identificar, em caráter pioneiro, uma relação entre a absorção de água, através da imersão dos agregados em água fervente por duas horas, com a absorção de asfalto. Dada a diferença de viscosidade e o comportamento seletivo dos agregados, outros líquidos começaram a ser testados, como o querosene e a gasolina, que apresentam estrutura molecular mais parecida com ligantes asfálticos por serem subprodutos da destilação do petróleo.

Hveem (1942) foi um dos primeiros pesquisadores a abordar o problema, desenvolvendo fórmulas que correlacionavam a absorção de querosene, através de um processo de centrifugação dos agregados saturados com o líquido, com a quantidade de asfalto requerida pelo agregado, observada por meio da absorção da camada de revestimento já em utilização. O autor notou que a absorção de querosene, à temperatura ambiente, era função da superfície de contato, da textura superficial e da porosidade do agregado.

Lohn (1947) e Donaldson *et al.* (1947), aprofundaram os estudos de Hveem (1942), comparando agregados de absorção nula, em estado natural e britados, com aqueles de absorção desconhecida. Os pesquisadores concluíram que era possível, a partir de uma fração granulométrica, prever a absorção total de querosene pela faixa granulométrica completa. Os estudos deram destaque ainda para o aumento da absorção de querosene pelos agregados britados, devido ao aumento da superfície de contato.

Nevitt & Krchma (1942) compararam a absorção de asfalto na camada já em utilização com a absorção de querosene, similarmente aos estudos de Hveem (1942), porém, os pesquisadores foram os pioneiros na detecção da absorção em longo prazo, na qual foram observados os valores crescentes de absorção de querosene ao longo de seis semanas. Os altos valores de absorção no momento da usinagem, comparativamente com a absorção em longo prazo, também foram notados pelos pesquisadores.

Foi somente com Rice (1953) que a absorção de asfalto deixou de ser comparativa e passou a ser calculada a partir de medidas na própria mistura asfáltica. O estudo relacionou medidas de peso da amostra - não compactada imersa em água e após sucção a vácuo de ar do sistema - com a densidade máxima teórica ( $D_{mt}$ ). O

---

<sup>1</sup> Goshorn, J. H., and Williams, F. M., A.A.P.T., 13, 41-51 (1942)

método é um dos que mais se aproxima dos valores reais de absorção de asfalto e é atualmente o mais adotado.

A aparelhagem necessária, no entanto, para execução do ensaio de Rice faz com o que o mesmo seja encarecido, a partir disso, o pesquisador Castro Neto (1996), apresentou uma alternativa mais rápida e com uso de aparelhagem mais simples, que pode ser levada à campo, para determinação da absorção de asfalto, utilizando querosene, em correlação com a densidade máxima calculada.

Em contrapartida, Liu *et al.* (2014) puderam notar que a relação entre o Volume de Vazios apresentado pela mistura asfáltica após o período de simulação de transporte (massa asfáltica mantida em estufa por 2h à 121°C após a mistura) não apresentou, necessariamente, os valores de porcentagem de massa esperados pela relação linear na qual o método de Rice se baseia, fato também observado por Doyle *et al.* (2012) em estudos acerca de determinação da absorção de asfalto para camadas recicladas. Sendo assim, os pesquisadores obtiveram significativo sucesso ao relacionarem, para seis agregados de diferentes origens mineralógicas, o Volume de Vazios diretamente à absorção de asfalto ao invés do método proposto por Rice, que considera a absorção de asfalto a partir da Densidade Máxima Teórica das misturas asfálticas.

A seguir, estão elencadas algumas das principais considerações a respeito da absorção de asfalto.

- A absorção de asfalto pode modificar os valores dos parâmetros volumétricos, previamente determinados para a mistura asfáltica, devido à redução de asfalto efetivo na mistura;
- A porosidade está diretamente relacionada com a absorção de asfalto, sendo ela a principal característica dos agregados a influenciar o fenômeno e pode, ainda, ser usada como um *indicador* da mesma, pois não existem correlações seguras devido à existência de poros permeáveis à água que não são permeáveis ao asfalto;
- O tamanho e a distribuição dos tamanhos dos poros são também indicadores da absorção de asfalto, pois se pode prever, a partir dessas características, a natureza (absorção seletiva) e a quantidade de asfalto que pode vir a ser absorvido;
- Tanto a água quanto o querosene não permitem inferir, corretamente, a absorção de asfalto, pois a diferença nas viscosidades bem como as características de porosidade dos agregados, influem tanto na quantidade absorvida quanto no modo de absorção dos materiais;
- A viscosidade do ligante é a principal característica dos asfaltos a influenciar a taxa de absorção em longo prazo, nos quais asfaltos menos viscosos tendem a ser absorvidos mais rapidamente que asfaltos mais viscosos;
- A absorção de asfalto em longo prazo dificulta a correção do problema, além de ser um obstáculo para a determinação da absorção total do agregado, pois podem ser necessários meses até que ela atinja valores estáveis;
- A absorção de asfalto influencia diversas características mecânicas da camada de revestimento, tanto positivamente, como melhorando o intertravamento entre as partículas, como principalmente negativamente, ao alterar valores de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração previamente estimados em fase de projeto;
- A absorção de asfalto é um fenômeno individual e que necessita de análise particular para cada mistura asfáltica proposta.



#### 3.1. OS AGREGADOS MINERAIS

Os agregados escolhidos foram os dois mais comumente utilizados em obras de pavimentação, Basalto e Granito, além do agregado de Calcário, que, apesar da reduzida utilização em obras viárias, apresenta, geralmente, valores altos de absorção, colaborando para com o estudo em questão.

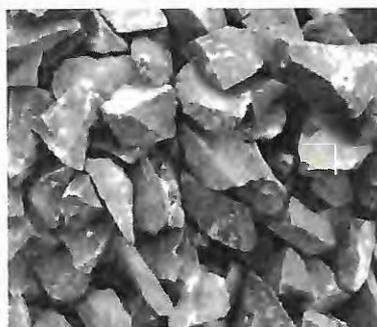
Dessa maneira, o agregado de Basalto escolhido, de coloração predominantemente preta com filer levemente amarronzado, é procedente da pedra Bandeirantes, localizada em Sítio Capão Preto, São Carlos. O Granito, de coloração predominantemente cinza claro com filer levemente rosado, é procedente da pedra São Gerônimo, na cidade de Valinhos e o Calcário, de coloração predominantemente cinza escuro com filer branco, é procedente da pedra Lafarge Holcim, em Cajamar. Todas as pedreiras se localizam no estado de São Paulo e cederam gentilmente os agregados para o estudo em questão. As Figuras 1 (a), (b) e (c) apresentam os agregados de Basalto, Granito e Calcário respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 2 - Agregados utilizados na pesquisa: (a) – Basalto; (b) – Granito; (c) – Calcário

### 3.1.1 Ensaio de Densidade Aparente

A determinação das Densidades Aparentes dos agregados foi feita seguindo a norma DNER-ME 081/98, que estabelece, de acordo com a *Tabela 1*, as massas mínimas de amostra para o ensaio, dependendo da dimensão máxima característica dos agregados (DMC), que é aquela na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

*Tabela 1* - Massa mínima de amostra para ensaio de Densidade Aparente

<i>Dimensão Máxima Característica (DMC) do agregado (mm)</i>	<i>Massa mínima da amostra de ensaio (kg)</i>
12,5 ou menor	2,0
19	3,0
25	4,0
38	5,0
50	8,0
64	12,0
76	18,0
100	40,0
125	75,0
152	125,0

Fonte: DNER-ME 081/98

Dessa maneira, como a DMC para todos os agregados analisados é igual a 12,5 mm, foram peneirados 2kg de cada material, passante na peneira de 19,5 mm e retidos na peneira de 4,75 mm. A norma determina que o material seja então lavado, para retirada do pó e imerso em água por no mínimo 24 horas. Após a imersão, o Peso Imerso (Pi), Peso com a Superfície Seca Saturada (Ph) e Peso Seco (Ps) podem ser obtidos das seguintes maneiras:

- Remove-se a amostra da água e, com ajuda de um pano absorvente levemente umedecido e com a amostra espalhada pelo mesmo, seca-se os agregados até que nenhuma película de água seja mais visível, tomando-se o cuidado para não pressionar demais os agregados e retirar a água absorvida. (Ph);
- A amostra é então colocada em um cesto metálico, próprio para pesagem hidrostática, que deve ser imerso completamente em água. (Pi);
- Por fim, seca-se a amostra em estufa, entre 105° C e 110 °C (Ps), até a constância de massa.

As Figuras 2 (a), (b) e (c) apresentam algumas etapas do ensaio descrito.

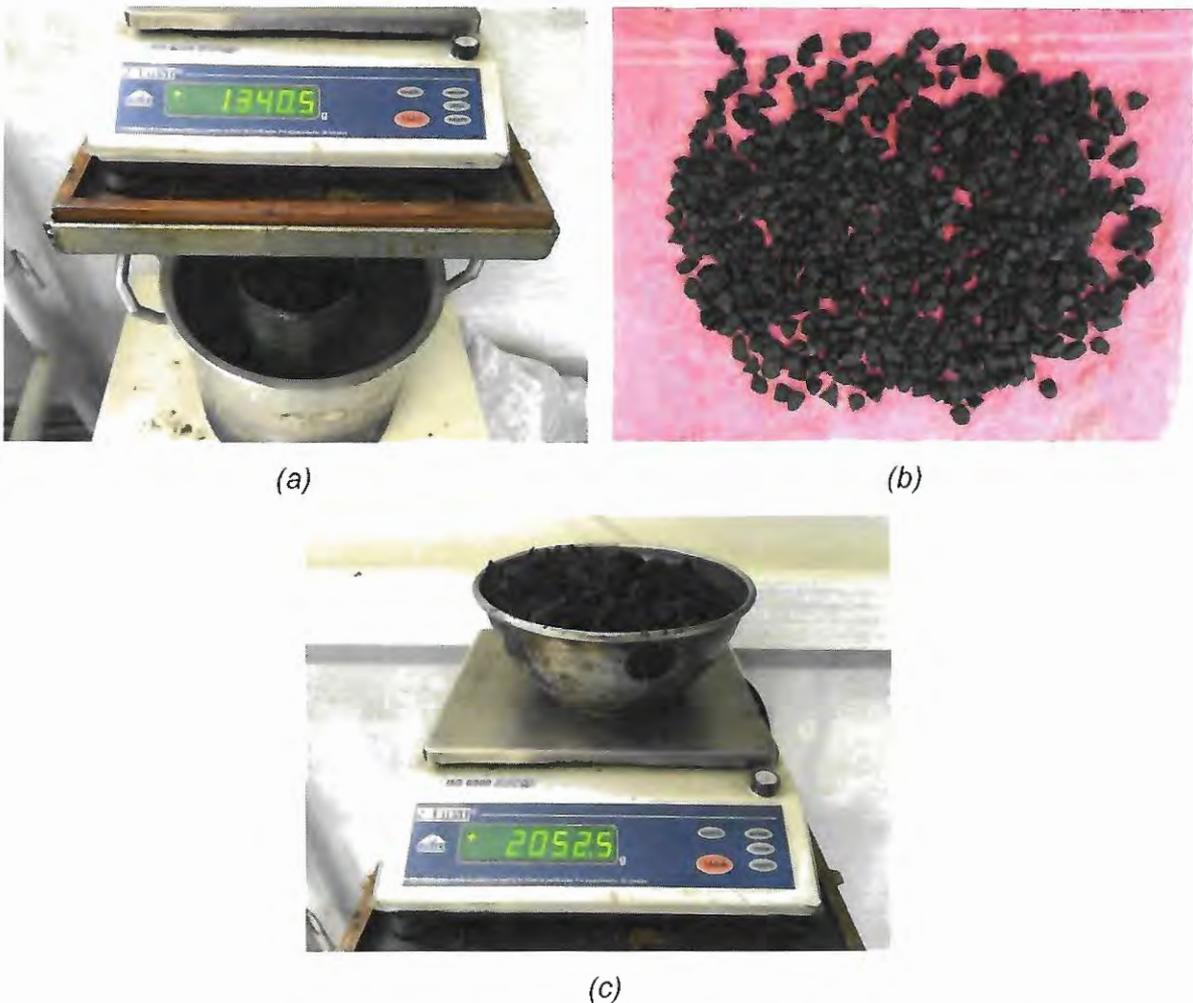


Figura 2 - Ensaio de densidade aparente: (a) - Etapa de pesagem hidrostática ( $P_i$ ); (b) - Secagem superficial dos agregados; (c) - Pesagem dos agregados com superfície seca saturada

A partir dos pesos obtidos, as seguintes densidades podem ser calculadas:

- Densidade do agregado saturado com superfície seca:  $D_{ss} = \frac{P_h}{P_h - P_i}$
- Densidade aparente do agregado:  $D_{ap} = \frac{P_s}{P_h - P_i}$
- Densidade real:  $D_r = \frac{P_s}{P_s - P_i}$
- Absorção de água (%):  $Abs_{\text{água}} = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$
- Porosidade Total (%):  $PT = 100 - \frac{D_{ap}}{D_r} \times 100$

Assim, após o ensaio de Densidade Aparente, obtiveram-se os valores de  $D_{ss}$ ,  $D_{ap}$ ,  $D_r$ ,  $Abs_{\text{água}}$  e  $PT$ , como apresentado pela *Tabela 2*.

*Tabela 2 - Densidade Aparente, Real e Absorção de Água*

Agregado	Densidade Saturada Superficialmente Seca ( $D_{ss}$ )	Densidade Aparente ( $D_{ap}$ )	Densidade Real ( $D_r$ )	Absorção de Água ( $Abs_{\text{água}}$ ) (%)	Porosidade Total ( $PT$ ) (%)
Calcário	2,755	2,685	2,888	2,625	7,048
Basalto	2,844	2,800	2,929	1,569	4,393
Granito	2,593	2,567	2,635	1,000	2,567

Liu *et al.* (2014), no entanto, criticam a precisão do ensaio devido à análise visual da absorção de água superficial, que é dependente do senso crítico do operador, pois, a norma sugere que o agregado saturado seja seco com uma toalha absorvente até que sua superfície esteja opaca. A reprodutibilidade, nesse caso, é questionável, pois a secagem pode ser feita retirando-se mais ou menos água em excesso da superfície do agregado, dependendo do operador. O estudo sugeriu ainda, a análise da densidade aparente, bem como de outras propriedades volumétricas do agregado, através de ensaios tomográficos de raio-x, que permite que se conheça a densidade diretamente, ao invés da obtenção dos valores de massa e volume separadamente.

### 3.2. OS ASFALTOS

Os asfaltos escolhidos para comporem as misturas asfálticas se constituíram de dois asfaltos puros (CAP 30/45 e CAP 50/70), que se diferenciavam entre si principalmente em relação à viscosidade, e um asfalto modificado com polímero (CAP STYLINK, modificado com SBS - estireno-butadieno-estireno). Os asfaltos puros foram gentilmente cedidos pela CCR Autoban, localizada na Rodovia dos Bandeirantes no município de Jundiaí – SP, e são provenientes da refinaria Replan, em Paulínia - SP. O asfalto modificado foi, também, gentilmente cedido pela Betunel de Ribeirão Preto - SP.

As caracterizações básicas dos asfaltos também foram fornecidas pelas refinarias e estão apresentadas na *Tabela 3*.

Tabela 3 - Caracterização dos asfaltos

Caracterização dos Asfaltos			
CAP 30/45			
Ensaio	Método	Especificação	Resultados
Penetração, 100g, 5s, 25°C, dmm	NBR 6576	De 30 a 45	43
Ponto de Amolecimento, °C	NBR 6560	52 Mín.	53,7
Ponto de Fulgor	D 92	235 min.	342
Densidade Relativa a 20/4 °C	D 70	-	1,009
Viscosidade Brookfield a 135 °C, cP, Sp 21	NBR 14950	274 min.	448
Viscosidade Brookfield a 150 °C, cP, Sp 21	NBR 14950	112 min.	238
Viscosidade Brookfield a 177 °C, cP, Sp 21	NBR 14950	57 a 285	82
Índice de Susceptibilidade Térmica	NBR 6576	De -1,5 a 0,7	-1,3
CAP 50/70			
Ensaio	Método	Especificação	Resultados
Penetração, 100g, 5s, 25°C, dmm	D 5	De 50 a 70	52
Ponto de Amolecimento, °C	D 36	46 min.	50,2
Ponto de Fulgor	D 92	235 min.	344
Densidade Relativa a 20/4 °C	D 70	-	1,006
Viscosidade Brookfield a 135 °C, cP, Sp 21	D 4402	274 min.	395
Viscosidade Brookfield a 150 °C, cP, Sp 21	D 4402	112 min.	192
Viscosidade Brookfield a 177 °C, cP, Sp 21	D 4402	57 a 285	70
Índice de Susceptibilidade Térmica	X 018	De -1,5 a 0,7	-1,1
CAP Modificado			
Ensaio	Método	Especificação	Resultados
Penetração, 100g, 5s, 25°C, dmm	NBR 6576	De 40 a 70	55
Ponto de Amolecimento, °C	NBR 6560	60 Mín.	66,5
Ponto de Fulgor	NBR 11341	235 min.	>235
Densidade Relativa a 20/4 °C	NBR 6296	-	1,004
Viscosidade Brookfield a 135 °C, cP, Sp 21	NBR 15184	3000 Máx.	1133
Viscosidade Brookfield a 150 °C, cP, Sp 21	NBR 15184	2000 Máx.	551
Viscosidade Brookfield a 177 °C, cP, Sp 21	NBR 15184	1000 Máx.	207
Rec. Elástica Dutilômetro, 20cm, 25°C, %	NBR 15086	85 Mín.	90,5
Estabilidade na Estocagem - DIF. P. AM., °C	NBR 15166	5 Máx.	2

### 3.1.2 Determinação das temperaturas de usinagem e compactação

Normalizado pela ASTM D4402/D4402M-12, o ensaio de Viscosidade Brookfield permite que se conheçam as viscosidades de um ligante asfáltico na faixa de temperatura que varia de 38 a 260°C, utilizando um viscosímetro rotacional com agulha imersa na amostra de asfalto, chamada de *Spindle*, acoplada a uma câmara térmica com controle externo de temperatura.

O viscosímetro, neste caso, transforma a medida em torque, que deve ser mantida sempre acima de 10% da capacidade de leitura do sistema, obtida através da resistência à rotação provocada pelo ligante quando em diferentes temperaturas, conjuntamente com a velocidade de rotação, em valores de viscosidade, chamados de Viscosidade Brookfield (cP).

No entanto, para determinação das Temperaturas de Usinagem e Compactação (TUC), de acordo com as recomendações do manual SUPERPAVE®, deve-se multiplicar os resultados por 0,001, para obtenção da viscosidade em Pa.s. Assim, a faixa de temperaturas recomendada para usinagem é aquela na qual o ligante apresenta uma viscosidade de  $0,17 \pm 0,02$  Pa.s e de  $0,28 \pm 0,03$  Pa.s para a compactação.

Para determinar as temperaturas de usinagem e compactação, foi utilizado o *Spindle* N° 21 no equipamento apresentado pela *Figura 3*, no qual as leituras de torque, provocado pela resistência à rotação do material ligante, são convertidas em valores de viscosidade, a partir dos quais pode-se obter as faixas de temperatura para usinagem e compactação.



*Figura 3* - Equipamento e software para ensaio de Viscosidade Brookfield

Dessa forma, a partir do ensaio de Viscosidade Brookfield é possível obter os valores limites para as temperaturas de usinagem e compactação dos asfaltos analisados, como apresentado pela *Figura 4*.

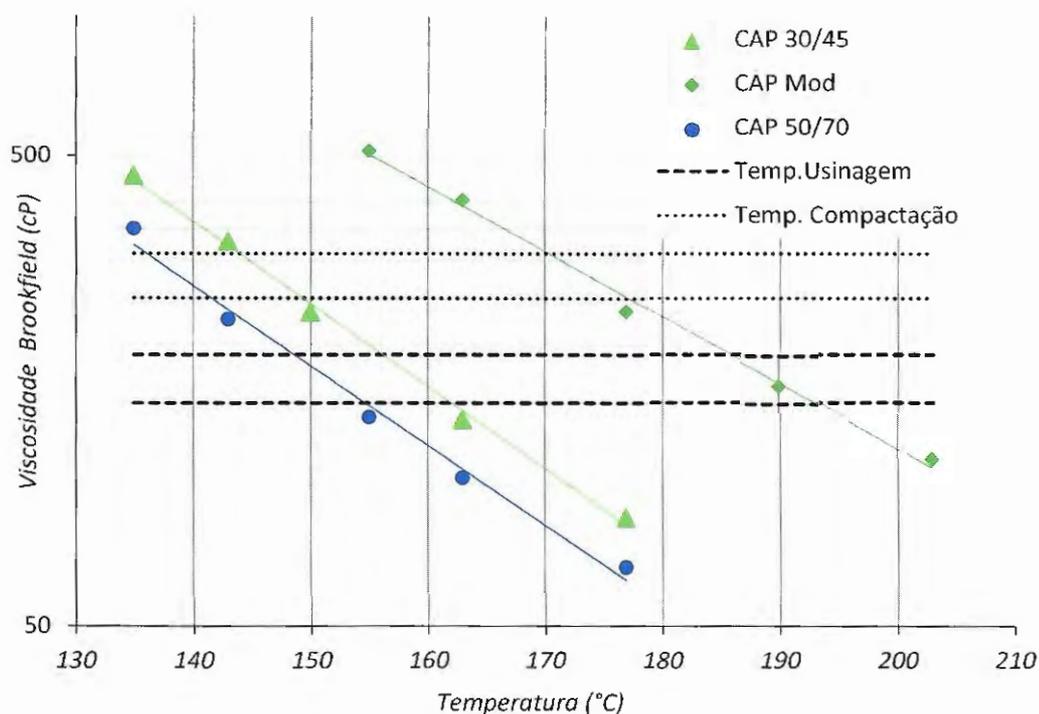


Figura 4 - Viscosidade Brookfield dos CAPs 50/70, 30/45 e Modificado com polímero

A partir dos gráficos, é possível determinar os valores médios das temperaturas de usinagem e compactação para os três asfaltos, como apresentado pela Tabela 4.

Tabela 4 - Temperaturas de Usinagem e Compactação

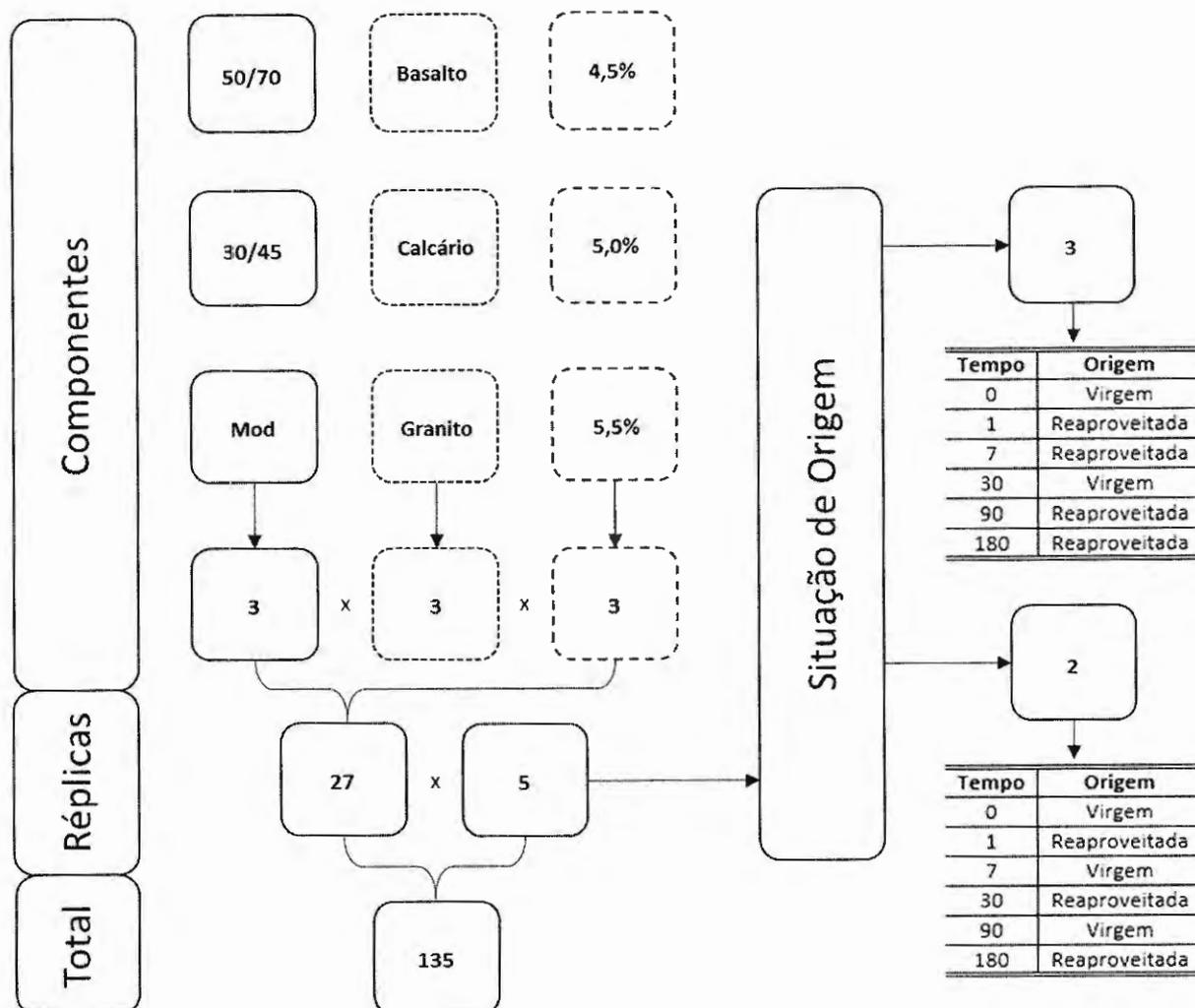
CAP	Temperaturas (°C)			
	Compactação	Média	Usinagem	Média
Modificado	170-175	172,5	186-193	188,5
30/45	145-149	147	155-162	158
50/70	136-141	138,5	147-153	150

### 3.3. MISTURAS ASFÁLTICAS

As amostras analisadas pelo método de Rice ao longo de seis meses, em relação à absorção de asfalto, foram chamadas de Amostras Base, que foram compostas pelas combinações dos três tipos de agregados: basalto, calcário e granito, dos três tipos de asfalto: CAP 30/45, CAP 50/70 e CAP Modificado por polímero e por três teores de asfaltos: 4,5%, 5,0% e 5,5%.

Dessa forma, foram compostas cinco amostras para cada combinação de agregados, tipos e teores de asfaltos, totalizando 135 Amostras Base. Os tempos analisados em relação às Amostras Base foram: imediatamente, 1, 7, 30, 90 e 180

dias. A *Figura 5* apresenta um esquema explicativo das composições, réplicas, amostras totais e origens para cada tempo de análise das Amostras Base.



*Figura 5* - Esquema explicativo - Amostras Base

As amostras quando reaproveitadas foram armazenadas permanecendo ao abrigo do Sol e das intempéries. Após a reutilização, as amostras que não seriam mais reaproveitadas foram descartadas em local adequado, seguindo as normas ambientais do programa USP Recicla.

Amostras com 1,5% de cal no filer, chamadas Amostras Com Cal ou Amostras Satélites, foram analisadas em tempos semelhantes às Amostras Base, porém, apenas para o teor de 5% de asfalto, como apresentado pela *Figura 6*. As amostras foram todas reutilizadas após o tempo imediato, totalizando, assim, 18 amostras virgens.

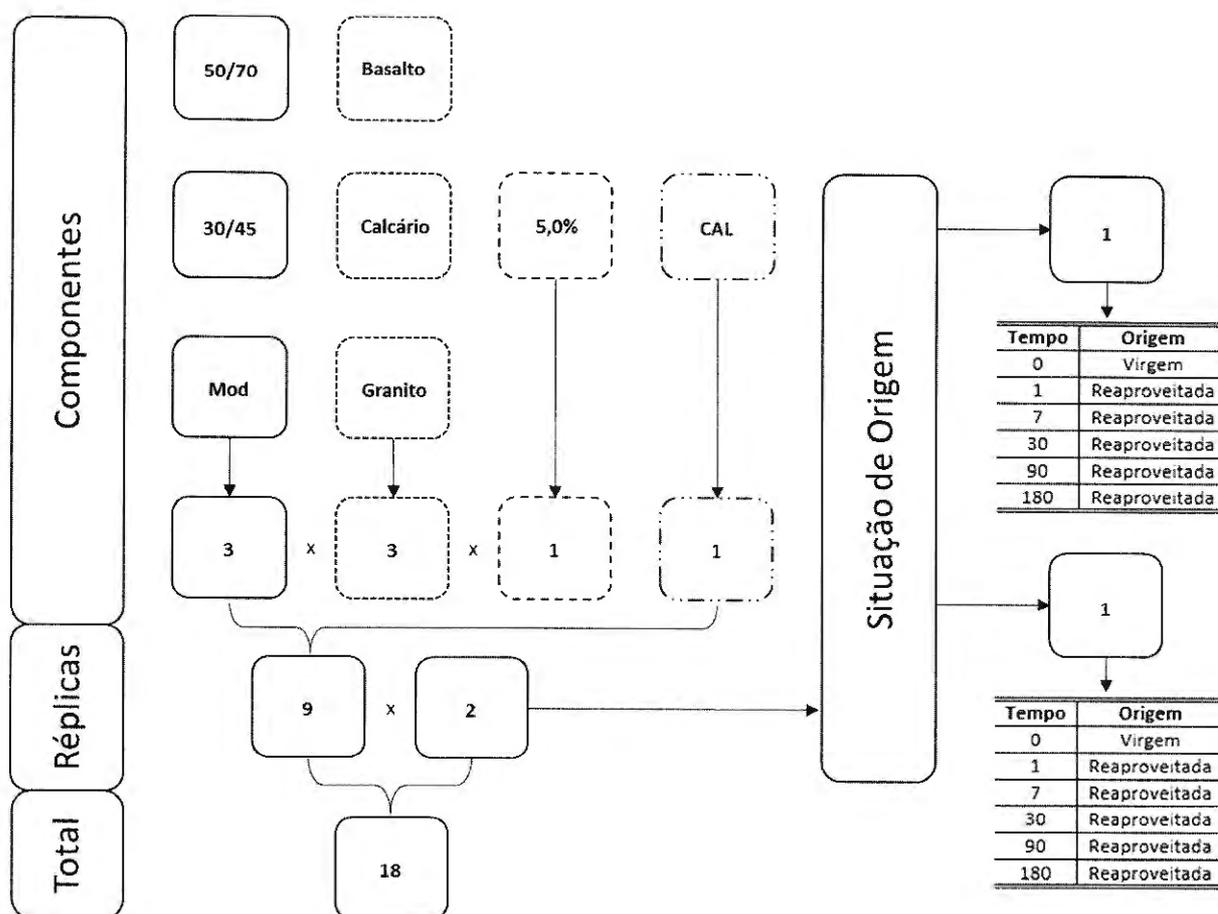


Figura 6 - Esquema explicativo – Amostras Satélite

As amostras utilizadas nos ensaios de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração, chamadas Amostras Compactadas, foram produzidas, também somente para o teor de 5% de asfalto. A Figura 7 apresenta o esquema explicativo para as Amostras Compactadas sem presença de cal, enquanto que a Figura 8 mostra a composição e origem das amostras com adição de cal.

As Amostras Compactadas eram virgens em todos os ensaios de Resistência à Tração devido ao caráter destrutivo do ensaio. Os tempos analisados para esse ensaio foram: 1, 30 e 180 dias. Já os ensaios de Módulo de Resiliência foram realizados para os tempos de: 1, 7, 30, 90 e 180 dias, dos quais as amostras eram virgens nos tempos de 1, 7 e 90 dias. Ao todo foram feitas seis amostras para cada combinação, totalizando 108 Amostras Compactadas.

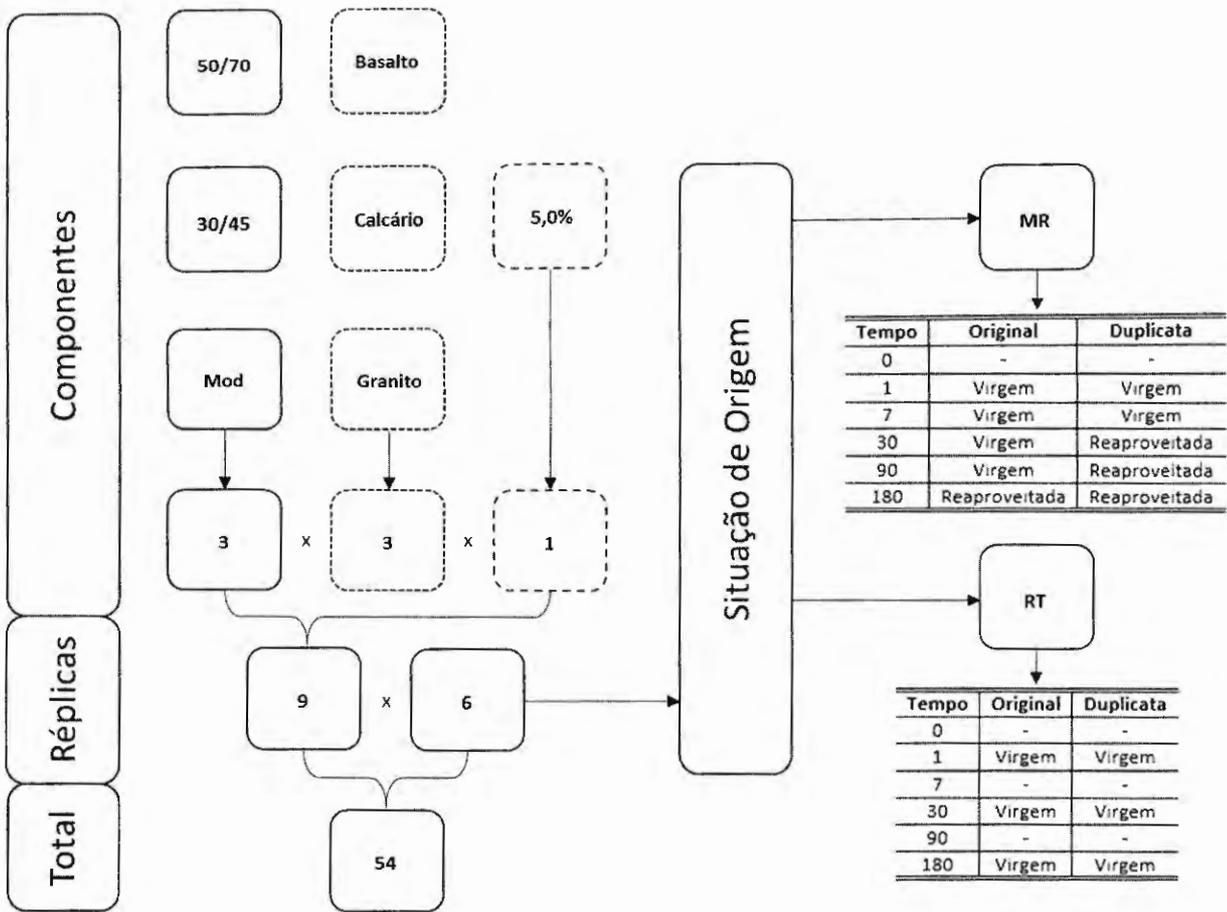


Figura 7 - Esquema explicativo – Amostras Compactadas sem presença de Cal

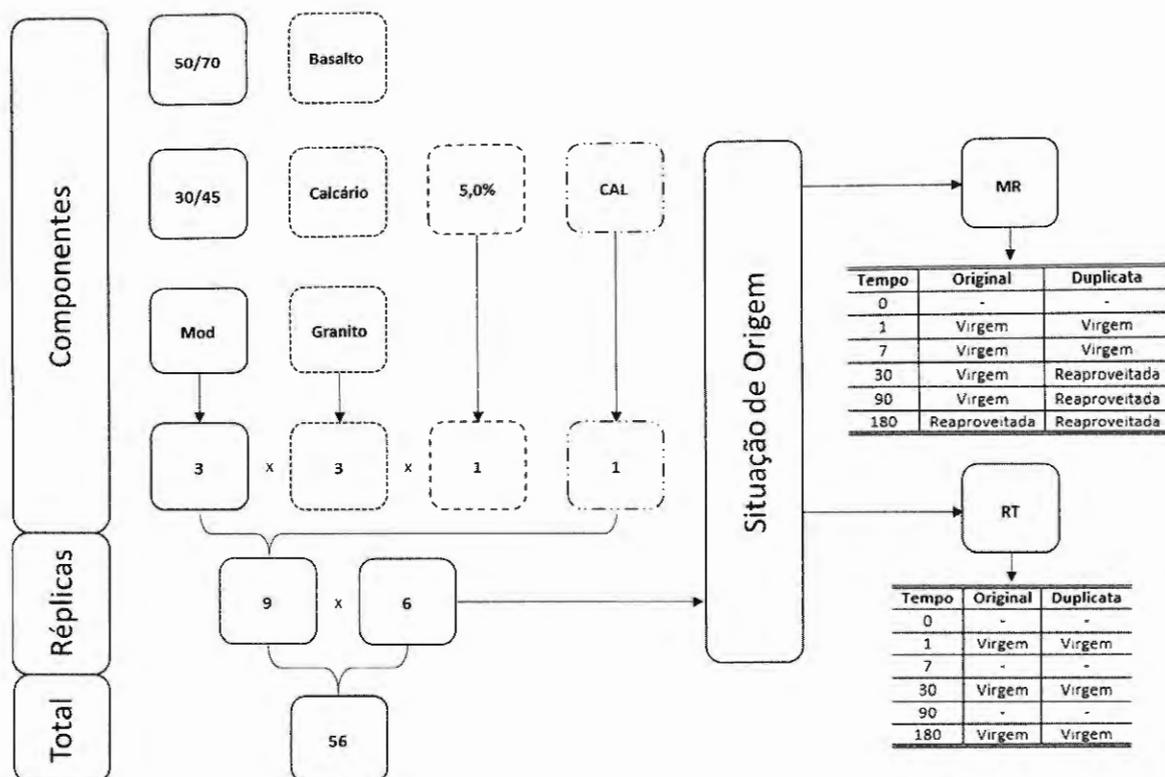


Figura 8 - Esquema explicativo - Amostras Compactadas com presença de Cal

### 3.4. USINAGEM E COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

#### 3.4.1 Faixa Granulométrica

A distribuição granulométrica escolhida para composição das amostras foi a média dos valores limites recomendados para a Faixa C (ES - DNIT 031/2006), como apresentado pela Tabela 5.

Tabela 5 - Faixas granulométricas DNIT 031/2004

Peneira de Malha Quadrada (mm)	% em massa, passando (Faixa C)	Tolerância
50,8	-	-
38,1	-	± 7%
25,4	-	± 7%
19,1	100	± 7%
12,7	80 - 100	± 7%
9,5	70 - 90	± 7%
4,8	44 - 72	± 5%
2	22 - 50	± 5%
0,42	8 - 26	± 5%
0,18	4 - 16	± 3%
0,075	2 - 10	± 2%

Fonte: DNIT 031/2006

### 3.4.2 Usinagem das Misturas Asfálticas

A usinagem das misturas asfálticas que tiveram os CAPs 30/45 e 50/70 como um dos seus componentes, foi feita de acordo com a norma do DNIT 031-2006, que especifica as temperaturas mínima e máxima de aquecimento dos ligantes asfálticos. Sendo assim, a partir das faixas de temperatura de usinagem dos CAPs, determinada pelo ensaio de Viscosidade Brookfield, é possível obter a temperatura de aquecimento dos agregados, que deve ser entre 10 e 15°C acima das temperaturas dos ligantes. O processo de mistura do ligante com os agregados pode ser observado na *Figura 9*.



*Figura 9* – Usinagem da massa asfáltica

Como o CAP Modificado com polímero não faz parte das especificações da normativa, respeitou-se a média de temperatura proposta pelo ensaio de Viscosidade Brookfield, o qual atingiu o valor de 188,5°C para a viscosidade ideal de usinagem.

Tanto os ligantes asfálticos quanto os agregados foram mantidos em estufa, por pelo menos duas horas, em temperatura de usinagem, para estabilização e homogeneização da mesma.

Após a adição de asfalto, as misturas foram mantidas em estufa, por um período de duas horas, na temperatura de compactação. Procedimento esse sugerido pela AASHTO PP2, para que o tempo de transporte da massa asfáltica da usina até o local de compactação seja simulado.

### 3.4.3 Compactação das amostras

As amostras utilizadas nos ensaios de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência foram compactadas segundo a norma DNER-ME 043/95, que sugere todos os procedimentos de compactação Marshall para Concreto Asfáltico Usinado à Quente.

Sendo assim, após a usinagem, todas as amostras foram mantidas em estufa, na temperatura de compactação, por pelo menos duas horas. Após a estabilização da temperatura, seguiu-se com o procedimento de compactação, por aparelhagem padrão e aplicação de 75 golpes por face dos corpos-de-prova.

Após a compactação todos os corpos-de-prova foram desmoldados e deixados em descanso, por um período de pelo menos 12 horas, antes de uso em qualquer ensaio de resposta mecânica.

## 3.5. ENSAIOS RICE, MÓDULO DE RESILIÊNCIA E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

### 3.5.1 Ensaio Rice

Rice (1953) propôs um método de determinação indireta da absorção de asfalto através da Densidade Máxima Teórica (DMT) das misturas asfálticas. Neste método há a necessidade de cobertura total das partículas do agregado pela película de asfalto, pois, no momento da saturação por vácuo parcial, se as partículas não estiverem completamente envolvidas pelo asfalto, estas passam a absorver água, comprometendo os resultados do ensaio. O método é normalizado pela ASTM D2041/D2041M-11.

O sistema consiste em uma bomba a vácuo, responsável pela extração de ar do sistema, acoplada ao frasco tipo Kitassato por meio de uma tubulação plástica devidamente vedada. O recipiente é então posicionado em cima de uma mesa agitadora que auxilia na retirada de ar devido aos movimentos rotacionais. O equipamento é apresentado pela *Figura 10* e tempo de agitação deve ter duração mínima de 20 minutos.

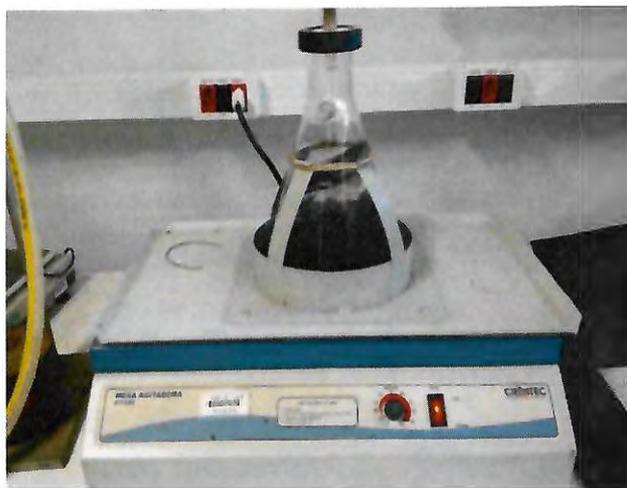


Figura 10 - Ensaio Rice, fase de agitação

As quantidades mínimas necessárias, em massa, para ensaio das amostras também são normalizadas de acordo com a Dimensão Máxima Característica (DMC) dos agregados, como mostrado pela *Tabela 6*.

*Tabela 6* - Quantidades mínimas de amostra para ensaio de Rice

DMC (mm)	Quantidade Mínima de Amostra (g)
37,5 ou maior	5000
19 a 25	2500
12,5 ou menor	1500

Fonte: ASTM D2041/D2041M-11

Dessa maneira, a DMT pode ser calculada através da *Equação 1*:

$$DMT = \frac{A}{A+D-E} \quad (1)$$

Sendo:

- A = massa da amostra seca;
- D = massa do kitassato preenchido com água, em função da temperatura (curva de calibração);
- E = massa do conjunto.

Assim, a Densidade Efetiva do agregado ( $\rho_{ef}$ ) pode ser obtida por meio da *Equação 2*:

$$\rho_{ef} = \frac{1-Pb}{\frac{1}{DMT} - \frac{Pb}{\rho b}} \quad (2)$$

Sendo:

- Pb = teor de asfalto;
- pb = densidade do asfalto

Por fim, tem-se a Absorção de Asfalto ( $Abs_{Asf}(\%)$ ) através da *Equação 3*:

$$Abs_{Asf}(\%) = \frac{\rho_{ef} - \rho_{ap}}{\rho_{ef} \times \rho_{ap}} \times \rho_b \times 100 \quad (3)$$

### 3.5.2 Ensaio De Resistência à Tração Por Compressão Diametral

Normalizado pela DNER – ME 138/09, o ensaio permite obter a resistência à tração do material, a partir da aplicação crescente de carga até a ruptura. O ensaio é normalmente realizado a 25°C, por meio do qual pode-se conhecer a Resistência a Tração (RT) do corpo de prova, como mostrado pela *Equação 4*:

$$RT = \frac{2 \times F}{100 \times \pi \times D \times H} \quad (4)$$

Sendo:

- F = carga de ruptura, N;
- D = diâmetro do corpo de prova, cm;
- H = altura do corpo de prova, cm;
- RT = resistência à tração, MPa.

### 3.5.3 Ensaio De Módulo De Resiliência

Normalizado pelo DNIT 135/2010, o ensaio permite determinar o Módulo de Resiliência (MR), em kgf/cm<sup>2</sup>, do corpo de prova através da relação entre a Tensão de Tração ( $\sigma_t$ ), aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica e medida a partir da deformação horizontal específica recuperável ( $\epsilon_t$ ), de tração, correspondente à tensão aplicada, como mostrado pela *Equação 5*.

$$MR = \frac{RT}{\epsilon_t} \quad (5)$$

A aparelhagem necessária para o ensaio consiste em uma prensa com sistema pneumático de carregamento e sistema de medição de deslocamento (deslocamento diametral horizontal) do corpo de prova. O software responsável pelo controle e leituras do ensaio foi desenvolvido pelo Professor Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri, em plataforma LabView.

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O comportamento da absorção de asfalto em longo prazo, pode ser analisado, visualmente, através da composição dos valores da absorção *versus* os tempos de análise. Assim, a partir dos valores obtidos pelo ensaio Rice, e de acordo com cada um dos grupos de análise propostos (Amostras Base e Amostras com Cal), é possível analisar e comparar as curvas para entendimento do fenômeno.

Os ensaios de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência, também podem ser analisados comparativamente a partir de suas curvas em função dos tempos de análise.

### 4.1. ABSORÇÃO EM LONGO PRAZO DAS AMOSTRAS BASE

#### 4.1.1 Valores Médios

A *Tabela 7* apresenta os valores médios da  $Abs_{Asf}$  (%), ao longo de seis meses, para todas as combinações de elementos propostos para as Amostras Base.

*Tabela 7 – Valores médios da  $Abs_{Asf}$  (%)*

Agregado	Dias	CAP 50/70			CAP 30/45			CAP Mod		
		4,50%	5,00%	5,50%	4,50%	5,00%	5,50%	4,50%	5,00%	5,50%
<i>Basalto</i>	0	0,365	0,496	0,512	0,654	0,571	0,532	0,709	0,673	0,721
	1	0,610	0,540	0,624	0,733	0,669	0,646	0,836	0,745	0,762
	7	0,794	0,704	0,787	0,871	0,857	0,803	0,989	0,843	0,927
	30	0,882	0,843	0,910	0,979	0,874	0,987	1,028	0,929	0,982
	90	0,896	0,890	0,914	1,049	0,986	0,992	1,065	1,014	1,038
	180	0,928	0,932	0,933	1,060	1,011	1,025	1,120	1,025	1,112
<i>Calcário</i>	0	0,934	0,887	0,768	0,757	0,918	0,872	0,880	1,046	0,603
	1	0,996	0,940	0,839	0,923	0,959	1,032	0,995	1,050	0,815
	7	1,058	1,022	0,933	0,957	1,010	1,041	1,068	1,054	1,028
	30	1,060	1,076	0,960	1,010	1,019	1,060	1,141	1,085	1,056
	90	1,063	1,093	1,009	1,012	1,027	1,052	1,151	1,091	1,060
	180	1,058	1,100	1,000	1,006	1,068	1,045	1,138	1,091	1,173
<i>Granito</i>	0	0,728	0,642	0,615	0,644	0,790	0,633	0,834	0,774	0,789
	1	0,750	0,757	0,750	0,766	0,836	0,755	0,857	0,867	0,796
	7	0,824	0,878	0,841	0,888	0,882	0,878	0,861	0,908	0,997
	30	0,986	0,946	0,908	0,922	0,957	1,121	0,905	0,932	1,038
	90	1,002	1,014	0,940	1,113	0,993	1,129	0,949	0,955	1,078
	180	1,022	1,050	0,988	1,100	1,003	1,194	0,938	0,982	1,116

#### 4.1.2 Análise de CAPs em função dos agregados

As Figuras 11 (a), (b) e (c) apresentam as curvas de  $Abs_{Asf}(\%)$ , de todos os asfaltos analisados em função do agregado de Basalto.

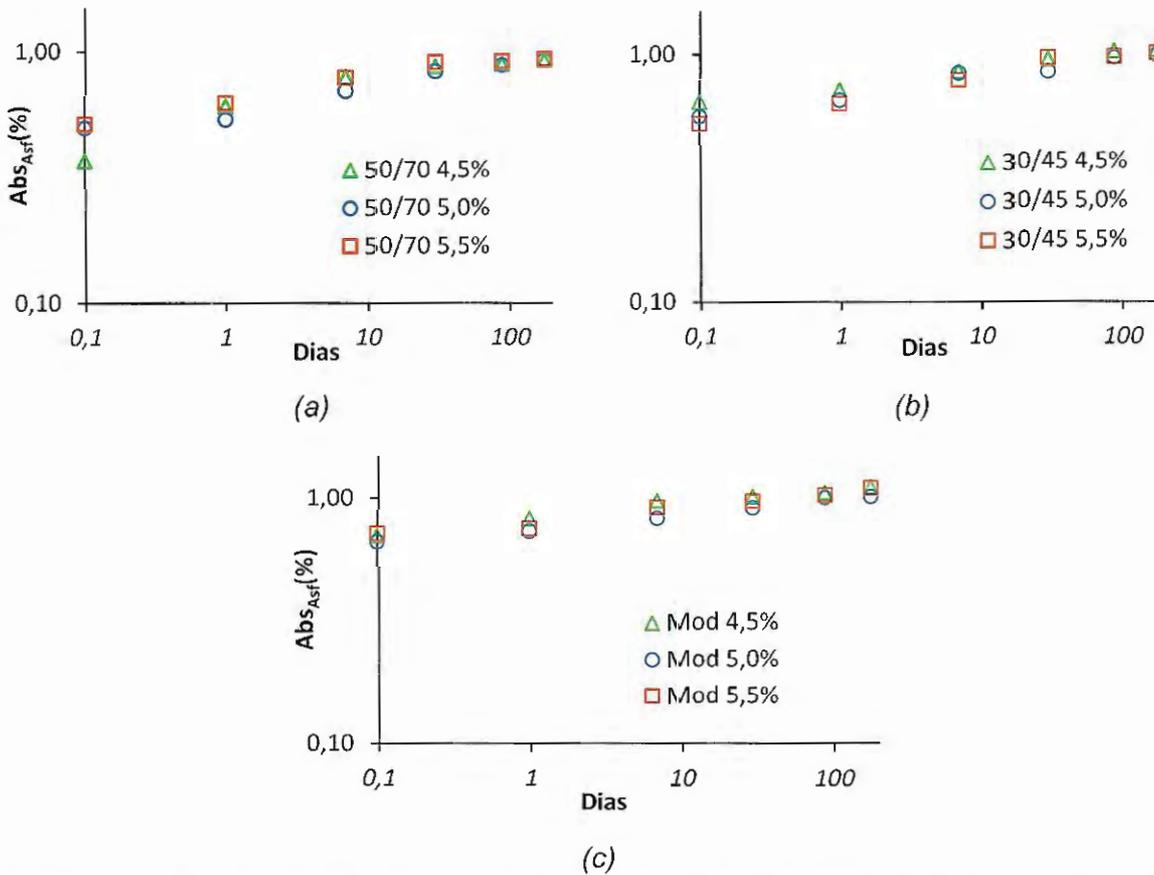


Figura 11 – Absorção de asfalto do agregado de Basalto em função do tempo e dos CAPs:

(a) -  $Abs_{Asf}(\%)$  CAP 50/70; (b) -  $Abs_{Asf}(\%)$  CAP 30/45; (c) -  $Abs_{Asf}(\%)$  CAP Modificado

Já as Figuras 12 (a), (b) e (c) apresentam as curvas de  $Abs_{Asf}(\%)$ , de todos os asfaltos analisados em função do agregado de Calcário.

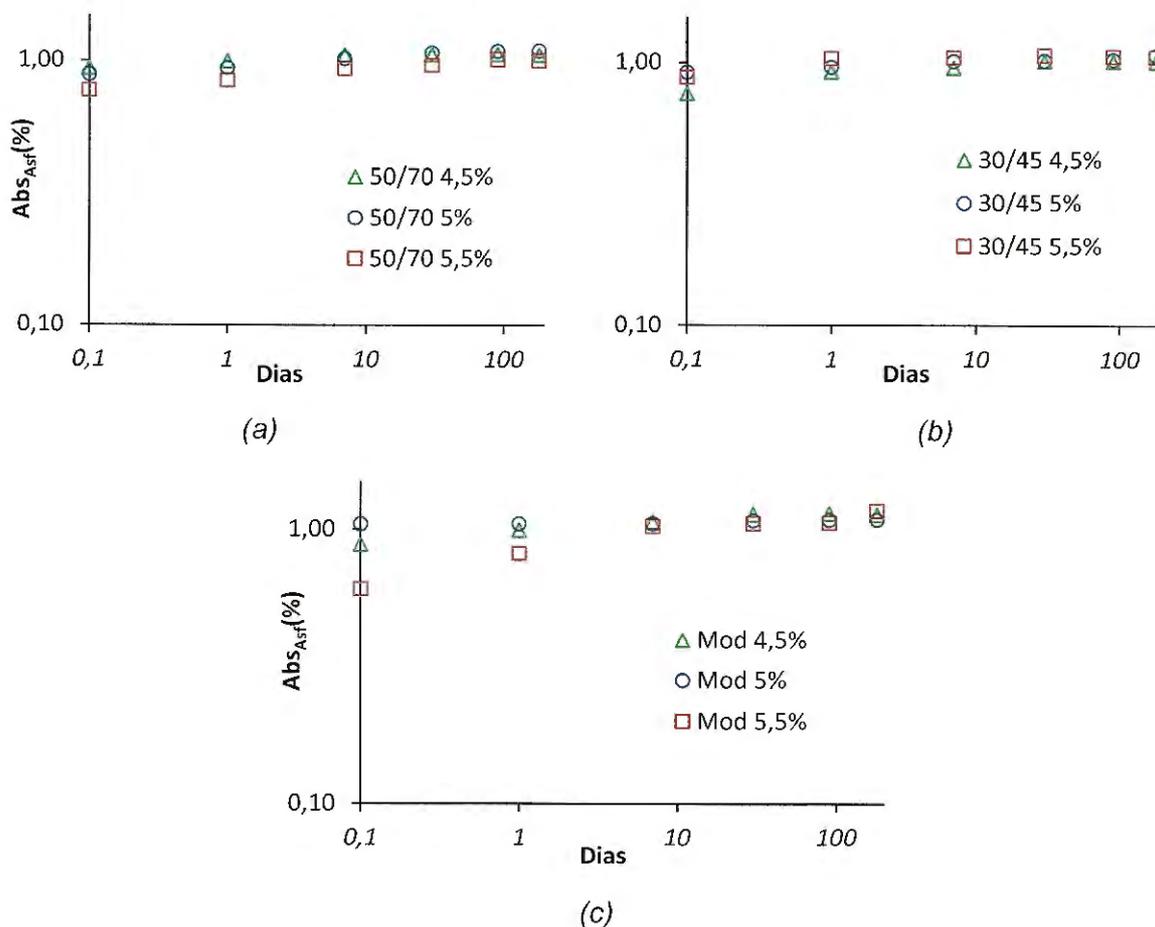
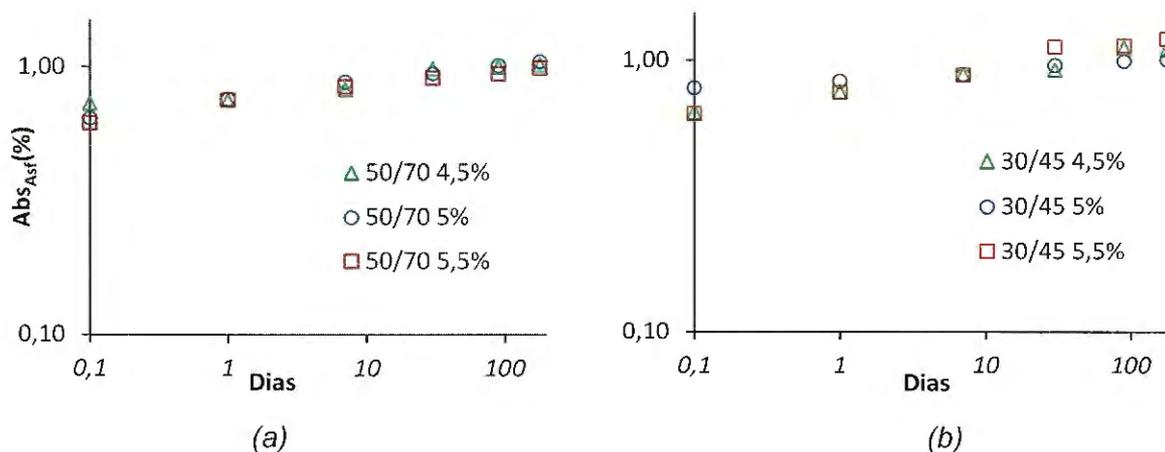


Figura 12 - Absorção de asfalto do agregado de Calcário em função do tempo e dos CAPs:  
 (a) - AbsAsf (%) CAP 50/70; (b) - Abs<sub>Asf</sub> (%) CAP 30/45; (c) - Abs<sub>Asf</sub> (%) CAP Modificado

E, por fim, as Figuras 13 (a), (b) e (c) apresentam as curvas de Abs<sub>Asf</sub> (%), de todos os asfaltos analisados em função do agregado de Granito.



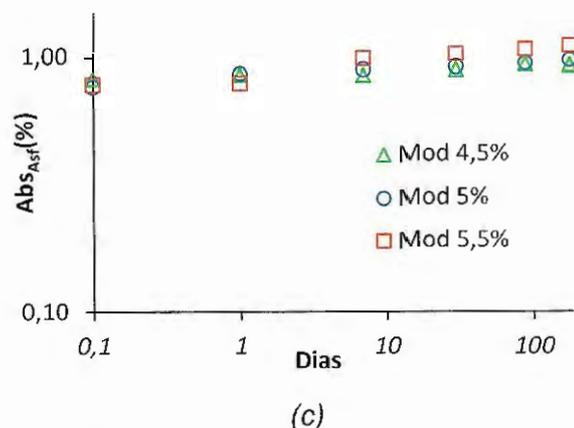


Figura 13 - Absorção de asfalto do agregado de Granito em função do tempo e dos CAPs: (a) - Abs<sub>Asf</sub> (%) CAP 50/70; (b) - Abs<sub>Asf</sub> (%) CAP 30/45; (c) - Abs<sub>Asf</sub> (%) CAP Modificado

A partir das curvas de absorção em longo prazo em função dos agregados, é possível observar que o agregado de Calcário apresentou tanto uma absorção inicial, quanto final, maiores que os valores apresentados pelos agregados de Basalto e Granito. Porém, de maneira geral, a estabilização da absorção em longo prazo parece ocorrer com mais homogeneidade, para todos os agregados, a partir do tempo de 30 dias. Essa tendência de estabilização é mais evidente, primeiramente, para o agregado de Basalto, em segundo lugar para o agregado de Calcário e, em último lugar, para o agregado de Granito, que possui uma linearização menos evidente.

Ainda em relação aos agregados, a absorção inicial foi mais variável entre os teores de ligantes asfálticos para o agregado de Calcário, já em relação à absorção final, o agregado de Granito foi o que apresentou valores mais dispersos. Os valores mais concentrados, no entanto, foram apresentados tanto para a absorção inicial quanto para a final, pelo agregado de Basalto.

Em relação aos teores, é possível notar que o teor de 5,0% apresenta a maioria dos valores inferiores de absorção de asfalto em relação ao agregado de Basalto. Já o teor de 5,5% apresenta o efeito oposto para o agregado de Granito, ou seja, os maiores valores de absorção de asfalto em longo prazo. Porém, de maneira geral, a análise de teores não apresenta padrões perceptíveis.

#### 4.1.3 Análise de teores em função dos agregados

As Figuras 14 (a), (b) e (c) apresentam as curvas de Abs<sub>Asf</sub> (%), de todos os teores analisados em função do agregado de Basalto.

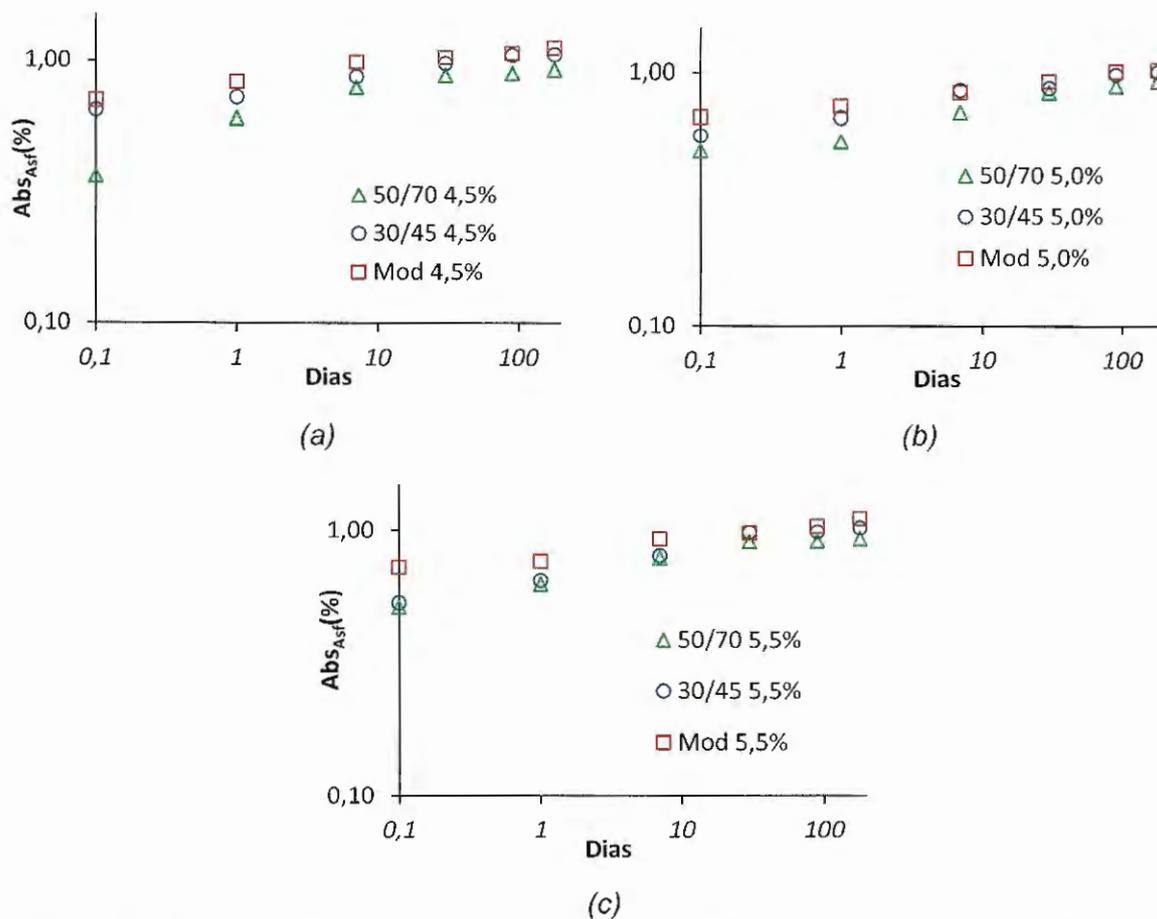
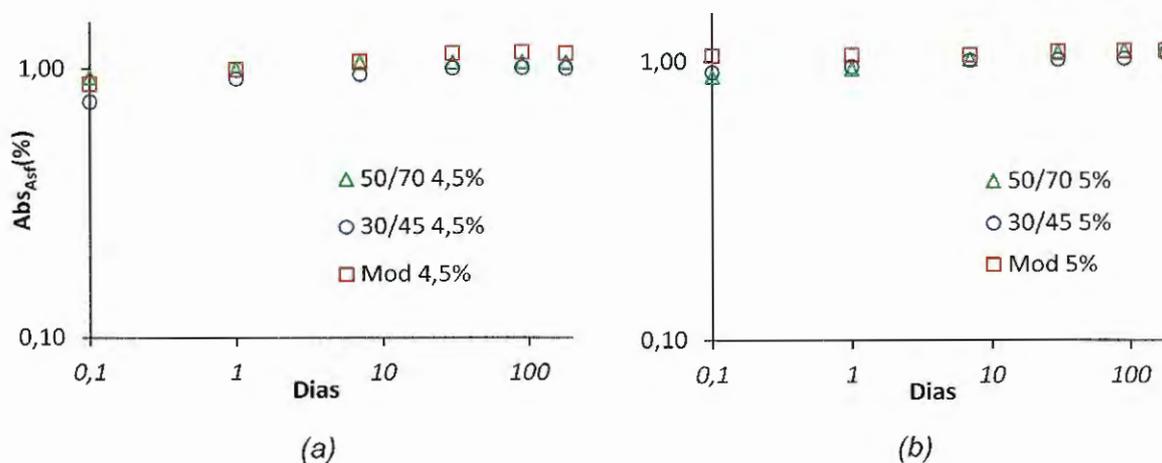
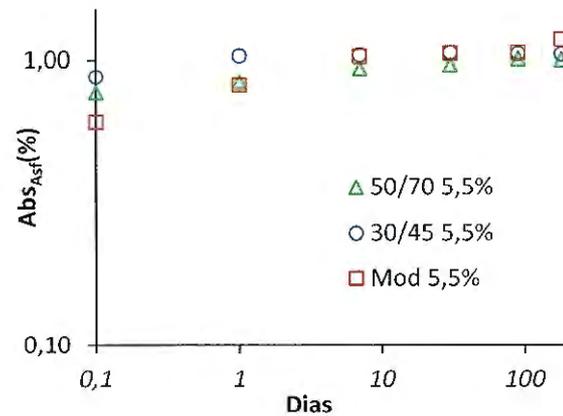


Figura 14 - Absorção de asfalto do agregado de Basalto em função do tempo e dos teores:  
 (a) - AbsAsf (%) teor 4,5%; (b) - Abs<sub>Asf</sub> (%) teor de 5,0%; (c) - Abs<sub>Asf</sub> (%) teor de 5,5%

Já as Figuras 15 (a), (b) e (c) apresentam as curvas de Abs<sub>Asf</sub> (%), de todos os teores analisados em função do agregado de Calcário.



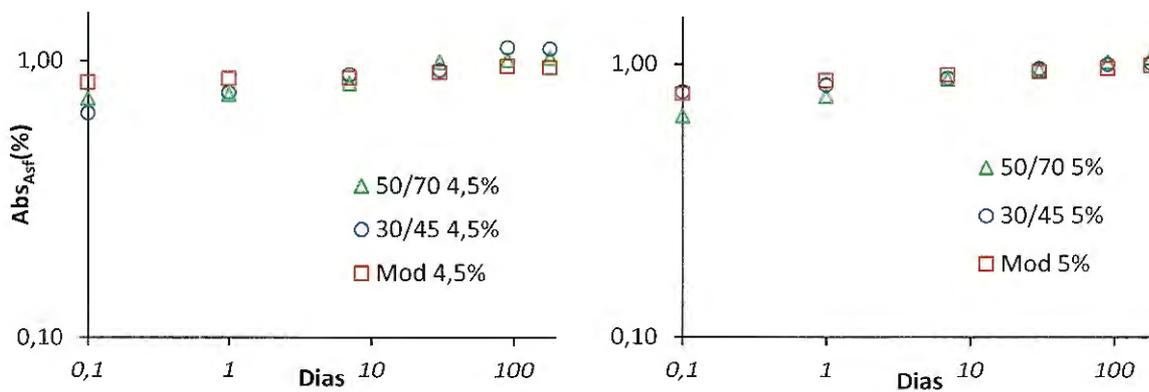


(c)

Figura 15 - Absorção de asfalto do agregado de Calcário em função do tempo e dos teores:

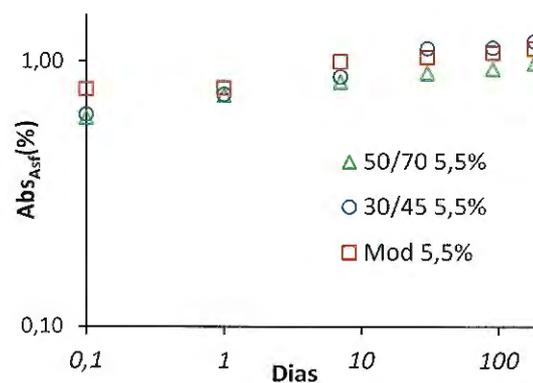
(a) -  $Abs_{Asf}(\%)$  teor de 4,5%; (b) -  $Abs_{Asf}(\%)$  teor de 5%; (c) -  $Abs_{Asf}(\%)$  teor de 5,5%

E, por fim, as Figuras 16 (a), (b) e (c) apresentam as curvas de  $Abs_{Asf}(\%)$ , de todos os teores analisados em função do agregado de Granito.



(a)

(b)



(c)

Figura 16 - Absorção de asfalto do agregado de Granito em função do tempo e dos teores:

(a) -  $Abs_{Asf}(\%)$  teor de 4,5%; (b) -  $Abs_{Asf}(\%)$  teor de 5%; (c) -  $Abs_{Asf}(\%)$  teor de 5,5%

A partir da análise de teores, é possível observar que o agregado de Calcário é o que apresenta valores mais homogêneos entre os teores, sendo que os maiores valores estão relacionados, em sua maioria, com o CAP Modificado e os menores com o CAP 30/45.

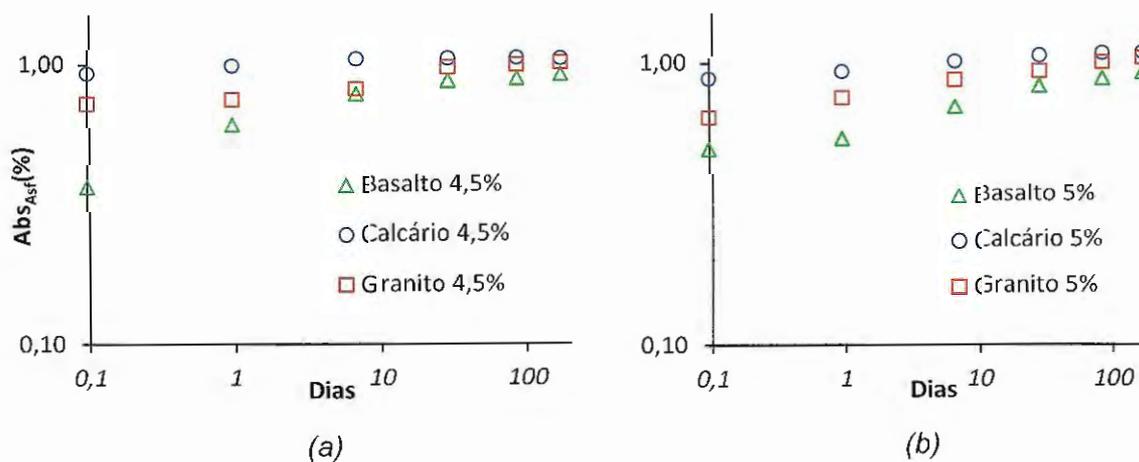
Em relação à tendência de estabilização, a análise de teores também apresenta valores mais lineares a partir dos 30 dias, porém, menos convergentes do que a análise de ligantes asfálticos.

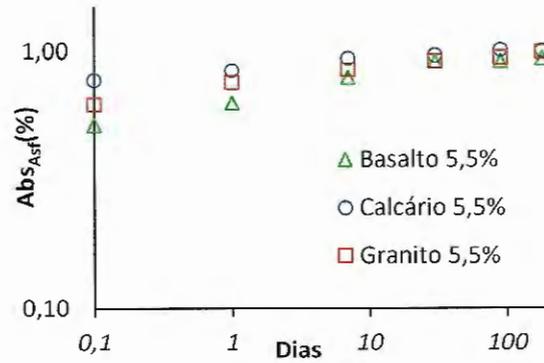
O CAP 50/70 apresentou, na maioria das análises, curvas inferiores de absorção em longo prazo, contrariamente ao CAP Modificado, que se manteve com valores altos em quase todas as curvas.

O agregado de Granito apresentou, novamente, comportamentos distintos entre os próprios teores, sendo que em cada um deles os ligantes asfálticos obtiveram valores heterogêneos.

#### 4.1.4 Análise de teores em função dos CAPs

As Figuras 17 (a), (b) e (c) apresentam as curvas de  $Abs_{Asf}(\%)$ , de todos os teores analisados em função do CAP 50/70.

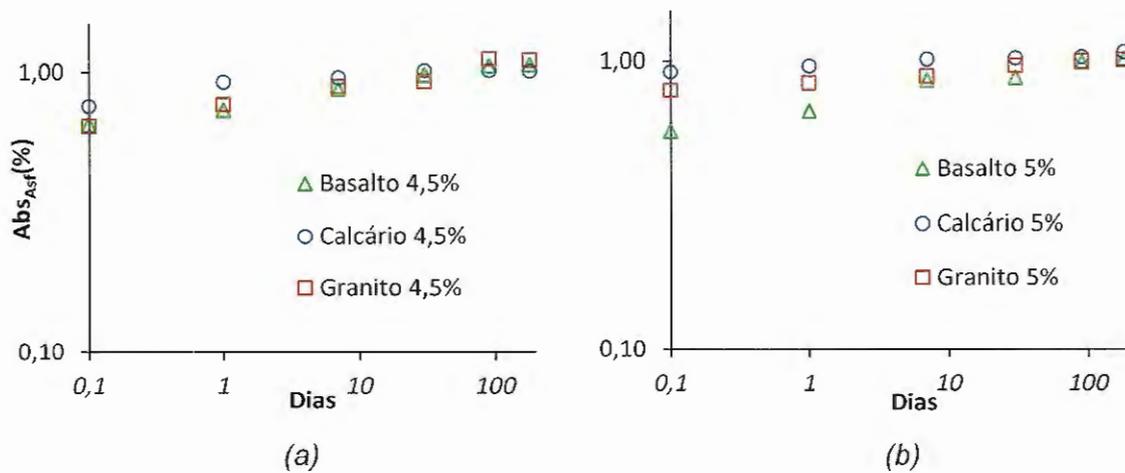




(c)

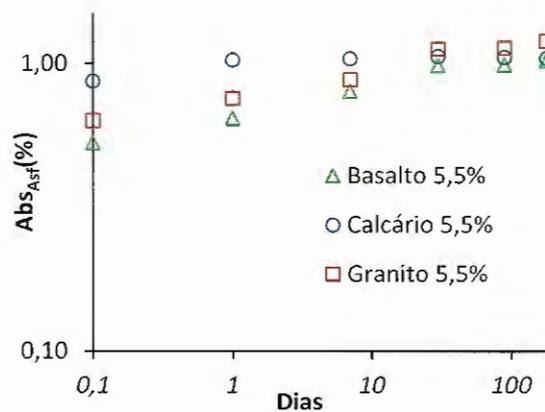
Figura 17 - Absorção de asfalto do em função do CAP 50/70, do tempo e dos teores: (a) - AbsAsf (%) teor 4,5%; (b) - Abs<sub>Asf</sub> (%) teor 5,0%; (c) - Abs<sub>Asf</sub> (%) teor 5,5%

Já as Figuras 18 (a), (b) e (c) apresentam as curvas de Abs<sub>Asf</sub> (%), de todos os teores analisados em função do agregado de Calcário.



(a)

(b)



(c)

Figura 18 - Absorção de asfalto do em função do CAP 30/45, do tempo e dos teores: (a) - AbsAsf (%) teor 4,5%; (b) - Abs<sub>Asf</sub> (%) teor 5,0%; (c) - Abs<sub>Asf</sub> (%) teor 5,5%

E, por fim, as Figuras 19 (a), (b) e (c) apresentam as curvas de  $Abs_{Asf}(\%)$ , de todos os teores analisados em função do agregado de Granito.

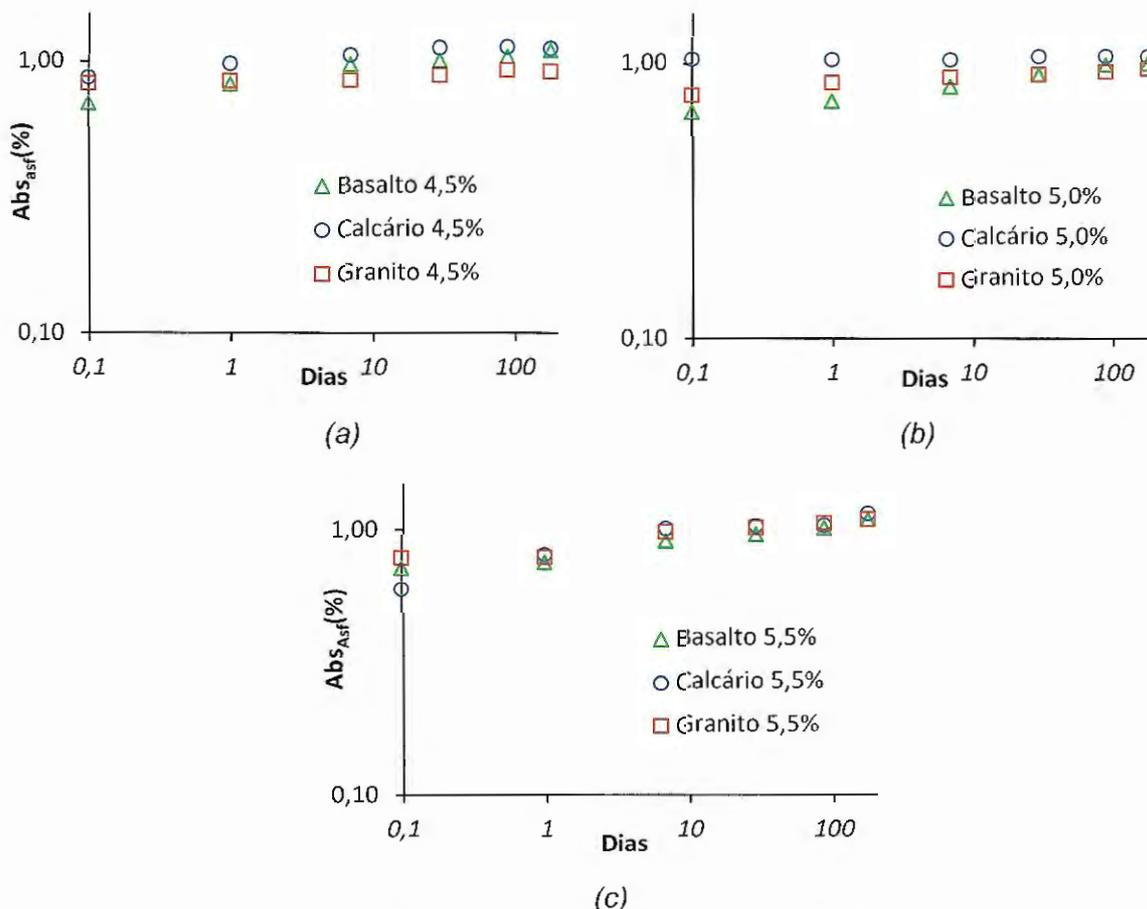


Figura 19 - Absorção de asfalto do em função do CAP Modificado, do tempo e dos teores:  
(a) -  $Abs_{Asf}(\%)$  teor 4,5%; (b) -  $Abs_{Asf}(\%)$  teor 5,0%; (c) -  $Abs_{Asf}(\%)$  teor 5,5%

Em função dos CAPs é possível observar que o CAP 50/70 apresentou as maiores dispersões entre os agregados, contrariamente ao CAP Modificado, que obteve valores mais convergentes.

Em relação aos agregados, o Calcário apresentou valores superiores para as curvas de absorção em longo prazo na maioria das análises dos CAPs, sendo que os valores inferiores foram obtidos majoritariamente pelo agregado de Basalto.

A tendência de estabilização a partir dos 30 dias se manteve, com mais uniformidade para o CAP Modificado e com uma linearização menos evidente para o CAP 30/45.

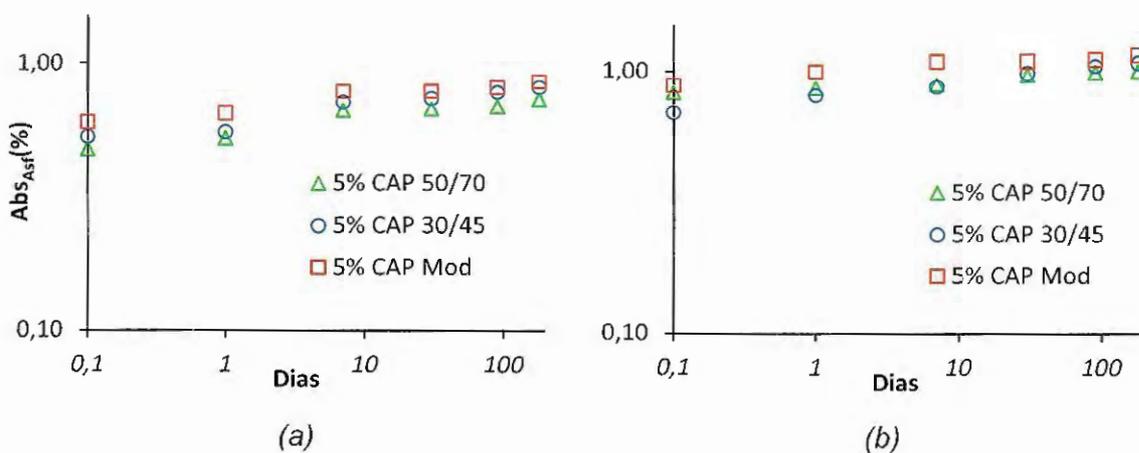
#### 4.2. ABSORÇÃO EM LONGO PRAZO DAS AMOSTRAS COM CAL

A Tabela 8 apresenta os valores médios da  $Abs_{Asf}$  (%), ao longo de seis meses, para todas as amostras com Cal no filler.

Tabela 8 -  $Abs_{Asf}$  (%) – Amostras Com Cal

Situação	Dias	Basalto			Granito			Calcário		
		50/70	30/45	Mod	50/70	30/45	Mod	50/70	30/45	Mod
Com presença de Cal	0	0,475	0,528	0,596	0,706	0,429	0,759	0,825	0,692	0,881
	1	0,521	0,551	0,643	0,742	0,684	0,874	0,86	0,809	0,998
	7	0,662	0,712	0,778	0,774	0,814	0,932	0,895	0,875	1,09
	30	0,672	0,734	0,781	0,938	1,002	1,007	0,983	1,001	1,101
	90	0,686	0,779	0,807	0,967	1,053	1,102	1,002	1,059	1,112
	180	0,729	0,811	0,854	0,975	1,138	1,109	1,013	1,085	1,164
Sem presença de Cal	0	0,496	0,571	0,673	0,887	0,918	1,046	0,642	0,79	0,774
	1	0,54	0,669	0,745	0,94	0,959	1,05	0,757	0,836	0,867
	7	0,704	0,857	0,843	1,022	1,01	1,054	0,878	0,882	0,908
	30	0,843	0,874	0,929	1,076	1,019	1,085	0,946	0,957	0,932
	90	0,89	0,986	1,014	1,093	1,027	1,091	1,014	0,993	0,955
	180	0,932	1,011	1,025	1,1	1,068	1,091	1,05	1,003	0,982

As Figuras 20 (a), (b) e (c) apresentam as curvas de  $Abs_{Asf}$  (%), de todos os asfaltos analisados, por agregado, em função da presença de Cal.



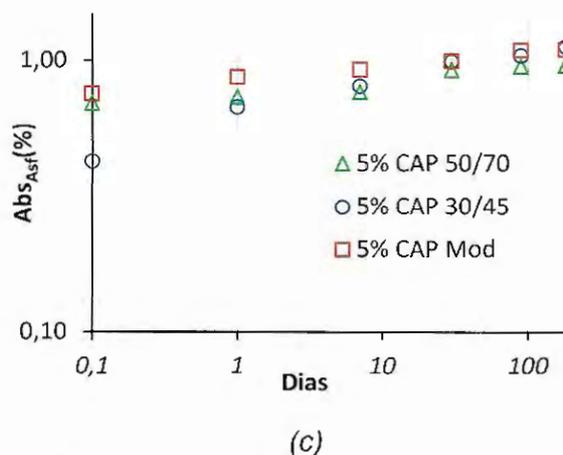


Figura 20 - Absorção de asfalto em função da presença de Cal, do tempo e dos agregados: (a) -  $Abs_{Asf}$  (%) Basalto; (b) -  $Abs_{Asf}$  (%) Granito; (c) -  $Abs_{Asf}$  (%) Calcário

A partir da presença de cal na avaliação da absorção em longo prazo, é possível notar que os agregados de Calcário e Granito ainda apresentam os maiores valores para as curvas de longo prazo, sendo que no último, os ligantes asfálticos aparecem com curvas mais heterogêneas. Ainda em relação aos valores maiores, é possível observar que o CAP Modificado é predominante, contrariamente ao CAP 50/70.

Em relação à estabilização, nota-se uma convergência a partir dos 30 dias para todos os agregados, porém, as curvas de absorção em longo prazo dos agregados de Basalto e Calcário não mantêm uma tendência de linearidade no último tempo de análise.

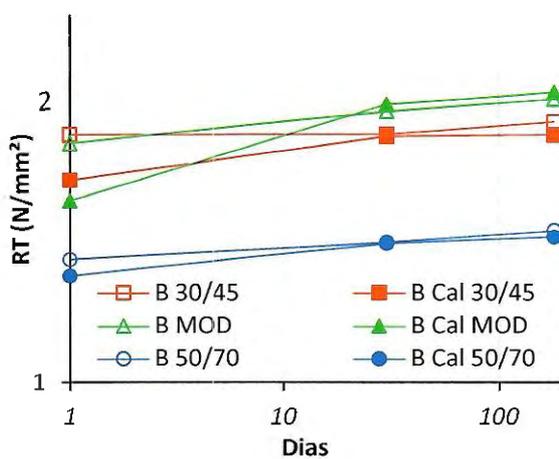
#### 4.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A Tabela 9 apresenta os valores médios de Resistência à Tração ( $N/mm^2$ ) para todas as amostras analisadas nos períodos de 1, 30 e 180 dias.

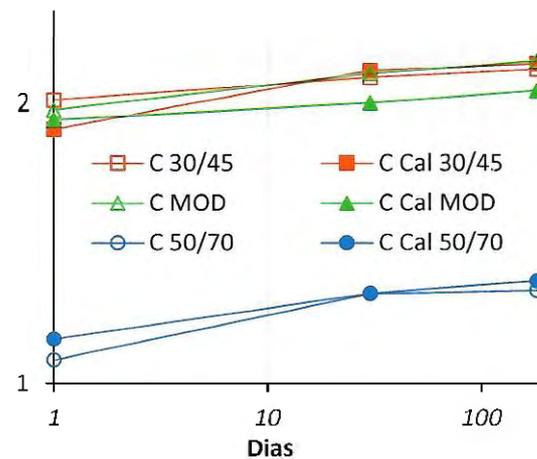
Tabela 9 - Resistência à Tração ( $N/mm^2$ ) em função do tipo de agregado, tipo de ligante asfáltico, tempo e presença ou não de cal

Agregado	CAP	Dias		
		1	30	180
Basalto	50/70	1,36	1,42	1,46
	50/70 CAL	1,31	1,42	1,44
	30/45	1,85	1,85	1,91
	30/45 CAL	1,66	1,84	1,85
	Mod	1,82	1,96	2,02
	Mod CAL	1,58	2,00	2,05
Granito	50/70	1,31	1,14	1,17
	50/70 CAL	1,20	1,21	1,25
	30/45	1,78	1,99	2,05
	30/45 CAL	1,74	2,15	2,21
	Mod	1,72	2,21	2,27
	Mod CAL	1,51	1,92	1,98
Calcário	50/70	1,06	1,25	1,26
	50/70 CAL	1,12	1,25	1,29
	30/45	2,00	2,12	2,16
	30/45 CAL	1,87	2,15	2,19
	Mod	1,96	2,14	2,21
	Mod CAL	1,91	1,99	2,05

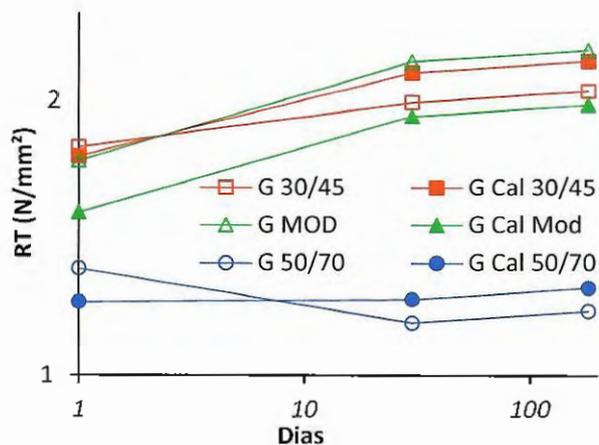
As Figuras 21 (a), (b) e (c) apresentam as curvas dos valores médios de RT, em função do tempo e da presença ou não de Cal, para os agregados de Basalto (B), Calcário (C) e Granito (G), respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 21 – Resistência à Tração em função do tempo, do tipo de ligante, da presença ou não de cal e dos agregados: (a) Basalto; (b) Granito e (c) Calcário

Os maiores valores médios de resistência à tração podem ser observados para o agregado de Calcário, que é o agregado que apresentou também os maiores valores de absorção de asfalto em longo prazo, relação esta, também observada por Gouveia *et al.* (2004).

A presença de cal significou, com menos evidência para o agregado de Calcário, uma redução dos valores de resistência à tração em longo prazo.

#### 4.4. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

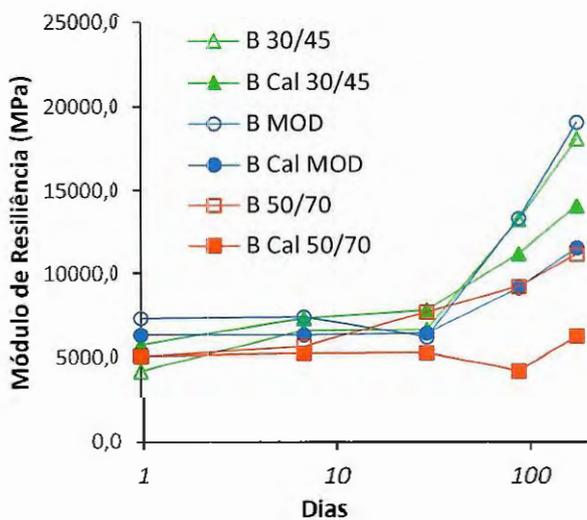
A Tabela 10 apresenta os valores médios de Módulo de Resiliência (MPa) para todas as amostras analisadas nos períodos de 1, 7, 30, 90 e 180 dias.



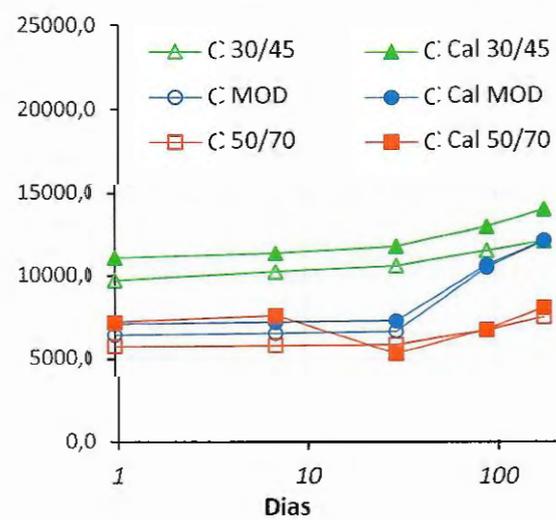
Tabela 10 - Módulo de Resiliência (MPa) em função do tipo de agregado, tipo de ligante asfáltico, tempo e presença ou não de cal

Agregado	CAP	Dias				
		1	7	30	90	180
Basalto	50/70	5011,4	5632,5	7679,0	9205,2	11109,7
	50/70 CAL	5049,6	5226,8	5233,5	4141,9	6237,8
	30/45	4145,9	6612,0	6642,4	13219,2	18092,3
	30/45 CAL	5765,6	7325,6	7821,7	11160,1	14056,4
	MOD	7334,8	7398,2	6213,6	13292,6	19056,5
	MOD CAL	6335,9	6333,7	6429,1	9133,0	11502,4
Granito	50/70	3397,7	4403,3	4906,4	7016,1	9056,2
	50/70 CAL	3811,0	3959,6	5533,6	7468,9	9503,7
	30/45	4878,0	7245,4	7966,0	11152,4	13012,4
	30/45 CAL	6240,5	6450,9	7908,4	12089,7	16245,6
	MOD	4780,3	7005,5	8432,3	11467,9	14062,2
	MOD CAL	4155,4	5530,3	7295,1	6927,7	10201,5
Calcário	50/70	5777,0	5821,6	5866,2	6746,1	7532,1
	50/70 CAL	7225,9	7642,4	5345,7	6775,1	8109,4
	30/45	9746,2	10269,2	10604,2	11517,1	12098,7
	30/45 CAL	11095,9	11381,3	11769,1	12963,9	14035,5
	MOD	6474,0	6581,7	6689,4	10503,7	12094,3
	MOD CAL	7148,5	7241,8	7335,2	10635,9	12134,3

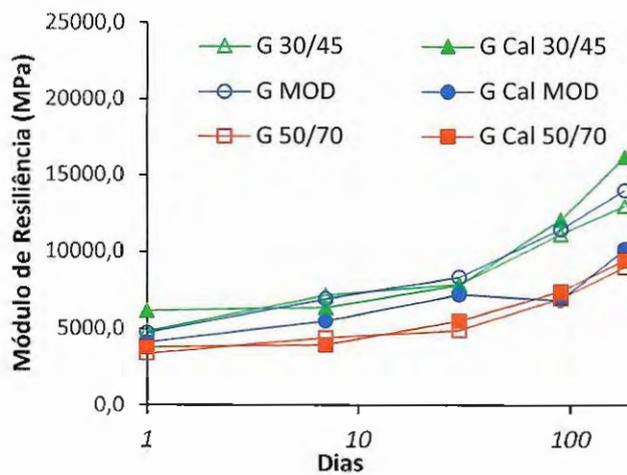
As Figuras 22 (a), (b) e (c) apresentam os valores médios para os Módulos de Resiliência (MPa) dos agregados de Basalto, Granito e Calcário para os períodos de 1, 7, 30 e 180 dias.



(a)



(b)



(c)

Figura 22 - Módulo de Resiliência em função do tempo, do tipo de ligante, da presença ou não de cal e dos agregados: (a) Basalto; (b) Granito e (c) Calcário

A partir dos dados de Módulo de Resiliência obtidos em longo prazo, pode-se notar que o Basalto, agregado que apresentou os menores valores de absorção de asfalto em longo prazo, foi o agregado que apresentou os maiores valores de Módulo de Resiliência.

Já em relação à presença de cal, é possível notar que o agregado de Basalto teve seus valores de Módulo de Resiliência reduzidos, enquanto os agregados de Calcário e Granito apresentaram valores maiores quando em presença do material.

#### 4.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O agregado de Calcário apresentou os maiores valores de absorção inicial e final, sendo ainda, o agregado com valores mais concentrados e semelhantes, contrariamente ao agregado de Granito que não apresentou homogeneidade de comportamento em relação às análises propostas.

A estabilização, no entanto, não foi atingida para nenhuma análise no tempo proposto (180 dias), porém, é possível observar uma tendência de linearidade a partir do tempo de 30 dias na maioria das análises e também com mais evidência para o agregado de Basalto.

Nas curvas em função dos teores, notou-se que o teor de 4,5% apresentou os menores valores, principalmente em relação ao agregado de Basalto, já os maiores valores foram apresentados pelo teor de 5,5% para o agregado de Granito. Sendo

assim, o teor de 5,0% apresentou, na maioria dos casos, valores intermediários de absorção.

Na análise de CAPs, apesar do CAP 50/70 ter apresentado os menores valores, os mesmos são mais dispersos e heterogêneos, já o CAP Modificado, responsável pelos maiores valores de absorção em longo prazo, apresentou resultados mais convergentes e semelhantes.

De modo geral, a maior influência para a absorção em longo prazo parece ser, primeiramente, os agregados, que regem de maneira mais significativa o comportamento da absorção, devido aos padrões mais expressivos que suas curvas apresentam entre si, independentemente da análise proposta. Em segundo lugar, os asfaltos parecem influenciar o fenômeno e, por fim, os teores, que apresentam pouca homogeneidade de resultados.

A partir da presença de cal na avaliação da absorção em longo prazo, é possível notar que todas as absorções iniciais foram reduzidas, porém, o único agregado que manteve valores finais também reduzidos foi o Basalto, uma vez que, para os agregados de Calcário e Granito, algumas análises apresentaram um aumento da absorção em longo prazo.

Em relação à estabilização, a presença de cal significou curvas menos estáveis e mais heterogêneas, principalmente em relação à linearização do último tempo analisado, ou seja, a presença de cal parece aumentar o tempo necessário para estabilização da absorção em longo prazo ou ainda para início do processo de linearização.

A Resistência à Tração se apresentou como sendo diretamente proporcional à absorção em longo prazo, ou seja, o agregado de Calcário, responsável pelos maiores valores, apresentou também curvas mais expressivas de RT. Já o Módulo de Resiliência se mostrou contrário à RT, pois os maiores valores foram apresentados pelo agregado de Basalto que obteve as curvas menos expressivas de absorção em longo prazo. Porém, como ambos os ensaios apresentaram curvas crescentes que, dado o pequeno intervalo de tempo analisado não estão relacionadas ao envelhecimento das amostras, é possível que a absorção de asfalto, ao enrijecer as misturas em longo prazo, tenha relação com o fenômeno.

Já em relação à estabilização dos ensaios de resposta mecânica, nenhuma análise apresentou tendências de linearização, o que é esperado, pois as misturas

tendem a enrijecer ao longo do tempo, similarmente às camadas de revestimento durante a vida útil.

## 5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS APÓS TRATAMENTO ESTATÍSTICO

### 5.1. ANÁLISE DA ABSORÇÃO EM FUNÇÃO DOS AGREGADOS

Em função dos três tipos de agregados analisados é possível obter os valores médios dos seguintes elementos da absorção:

- Absorção inicial ( $Abs_{inicial}$ ): obtida no tempo zero de análise, ou seja, absorção após a etapa de usinagem;
- Absorção final ( $Abs_{final}$ ): obtida no último tempo de análise proposto, ou seja, após 180 dias;
- Velocidade de absorção ( $Abs_{\Delta}$ ): diferença entre a  $Abs_{final}$  e a  $Abs_{inicial}$  dividida pelo tempo de análise (180 dias).

#### 5.1.1 Elementos da Absorção - Média Entre os Agregados

Os valores médios dos elementos da absorção obtidos somente pela análise de agregados, ou seja, pela média entre todos os teores de asfalto propostos, em função dos ligantes asfálticos, estão apresentados na *Tabela 11*.

*Tabela 11 – Elementos da Absorção em Função dos CAPs*

	CAP	CAP 50/70	CAP 30/45	CAP Modificado
$Abs_{inicial}$	Basalto	0,458	0,586	0,701
	Calcário	0,863	0,849	0,843
	Granito	0,662	0,689	0,799
$Abs_{final}$	Basalto	0,931	1,032	1,086
	Calcário	1,053	1,040	1,134
	Granito	1,020	1,099	1,012
$Abs_{\Delta}$	Basalto	0,0026	0,0025	0,0021
	Calcário	0,0011	0,0011	0,0016
	Granito	0,0020	0,0023	0,0012

As *Figuras 23 (a), (b) e (c)* apresentam os gráficos em barra dos elementos  $Abs_{inicial}$ ,  $Abs_{final}$  e  $Abs_{\Delta}$ , respectivamente, em função dos CAPs.

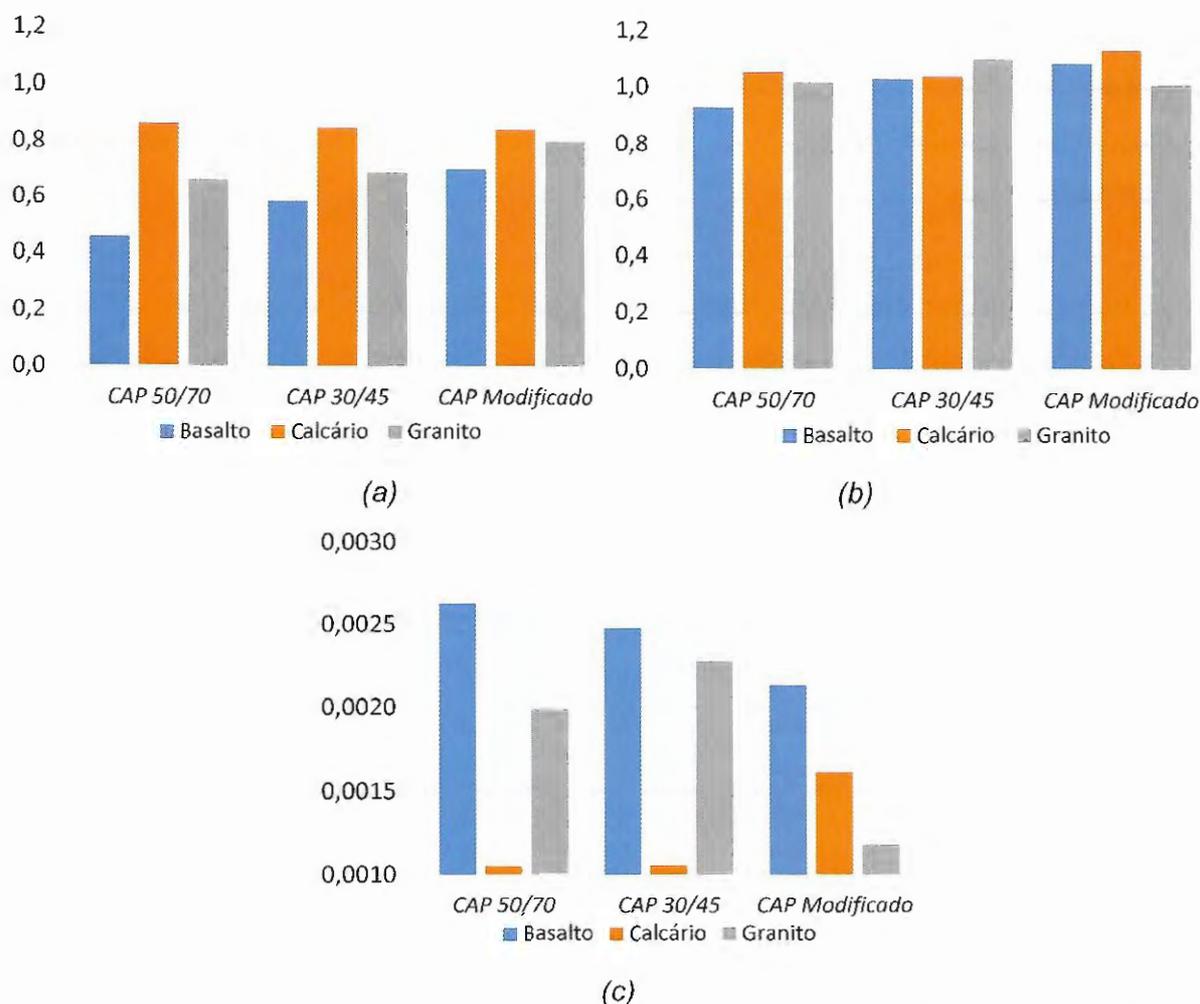


Figura 23 - Elementos da absorção de asfalto em função dos ligantes asfálticos: (a) -  $Abs_{inicial}$ ; (b) -  $Abs_{final}$ ; (c) -  $Abs_{\Delta}$

Nota-se, pelos gráficos dos elementos da absorção em função dos CAPs, que a  $Abs_{inicial}$  se mostrou mais evidente para o agregado de Calcário para todos os CAPs analisados, seguindo pelo agregado de Granito e, por fim, pelo agregado de Basalto que apresentou os menores valores iniciais médios de absorção. Analisando somente os CAPs, observa-se que o CAP 50/70 apresentou, na maioria das vezes, valores menores de absorção inicial e final, sendo que os maiores valores ficaram à cargo do CAP Modificado.

Em relação à  $Abs_{final}$ , todos os agregados apresentaram valores próximos, sendo que os picos máximos foram apresentados pelo Calcário para os CAPs 50/70 e Modificado e pelo Granito para o CAP 30/45. Todos os valores mínimos, em função dos CAPs, ficaram à cargo do agregado de Basalto.

A velocidade da absorção, no entanto, foi bem mais evidente para o agregado de Basalto em todas as análises dos CAPs. Já o agregado de Granito ficou em segundo lugar, sendo ultrapassado pelo agregado de Calcário somente em relação ao CAP Modificado.

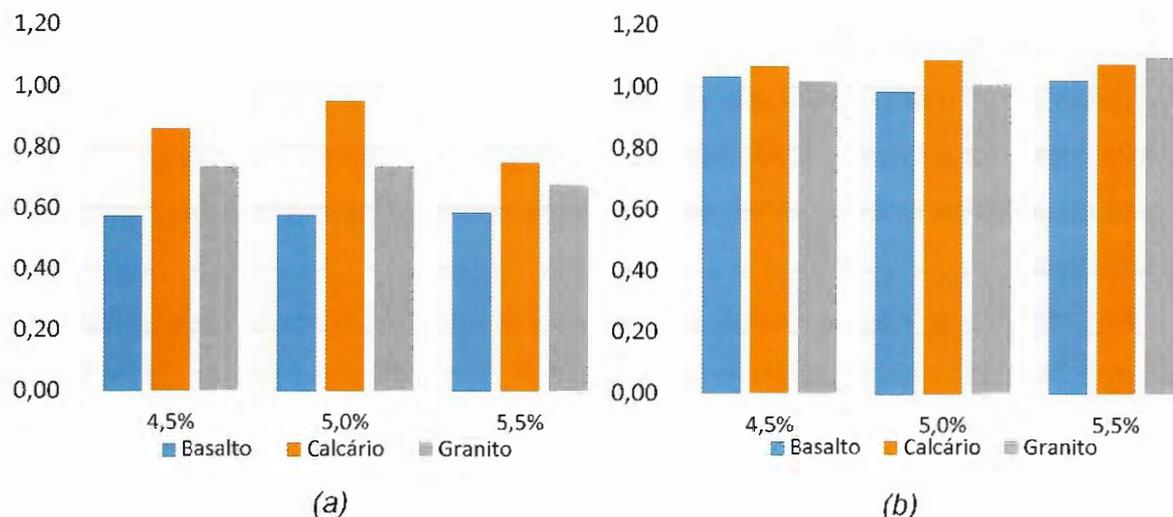
### 5.1.2 Elementos da Absorção - Média Entre os Teores

Os valores médios dos elementos de absorção obtidos somente pela análise de teores, ou seja, pela média entre todos os agregados propostos, estão apresentados na *Tabela 12*.

*Tabela 12* – Elementos da Absorção em Função dos Teores

Teor		4,5%	5,0%	5,5%
$Abs_{inicial}$	Basalto	0,576	0,580	0,588
	Calcário	0,857	0,950	0,748
	Granito	0,735	0,735	0,679
$Abs_{final}$	Basalto	1,036	0,989	1,023
	Calcário	1,067	1,086	1,073
	Granito	1,020	1,012	1,099
$Abs_{\Delta}$	Basalto	0,0026	0,0023	0,0024
	Calcário	0,0012	0,0008	0,0018
	Granito	0,0016	0,0015	0,0023

As *Figuras 24 (a), (b) e (c)* apresentam os gráficos em barra dos elementos  $Abs_{inicial}$ ,  $Abs_{final}$  e  $Abs_{\Delta}$ , respectivamente, em função dos teores.



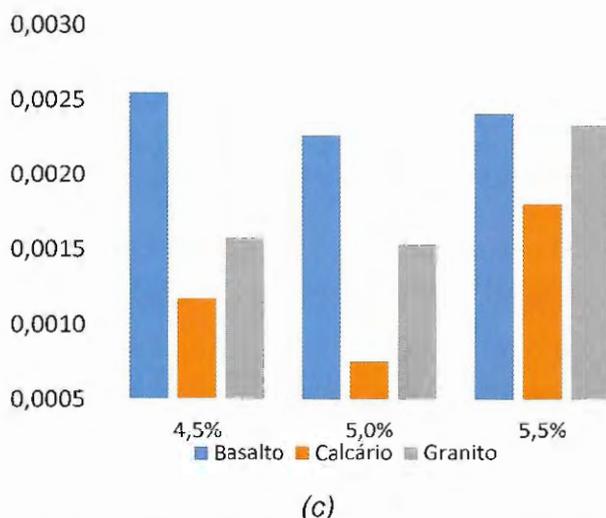


Figura 24 - Elementos da absorção de asfalto em função dos teores: (a) -  $Abs_{inicial}$ ; (b) -  $Abs_{final}$ ; (c) -  $Abs_{\Delta}$

Em função dos teores, nota-se que o agregado de Calcário apresentou os maiores valores iniciais médios, seguido pelo agregado de Granito e, por último, o Basalto, em semelhança à análise de CAPs. Já na observação dos teores, propriamente ditos, o teor de 5% apresentou valores ligeiramente maiores que o teor de 4,5% ficando, assim, o teor de 5,5% com os menores valores iniciais médios de absorção.

Já em função da  $Abs_{final}$ , o agregado de Calcário foi superado pelo agregado de Granito somente para o teor de 5,5%, sendo que os menores valores continuaram a serem apresentados pelo agregado de Basalto, em semelhança à  $Abs_{inicial}$ . Já em relação aos teores propriamente ditos, os maiores valores podem ser observados para o teor de 5,5%, sendo que os teores de 4,5% e 5% apresentaram valores quase semelhantes.

Por fim, em relação à velocidade da absorção, mais uma vez o agregado de Basalto apresentou uma absorção crescente mais evidente, em semelhança à análise de CAPs, sendo que em segundo lugar está o agregado de Granito e, por fim, o agregado de Calcário com os menores valores de amplitude de absorção. Já em função dos teores, a porcentagem de 5,5% apresentou os maiores valores de  $Abs_{\Delta}$ , seguido do teor de 4,5% e por último o teor de 5%, o qual apresentou uma estabilização do crescente de absorção mais rápida.

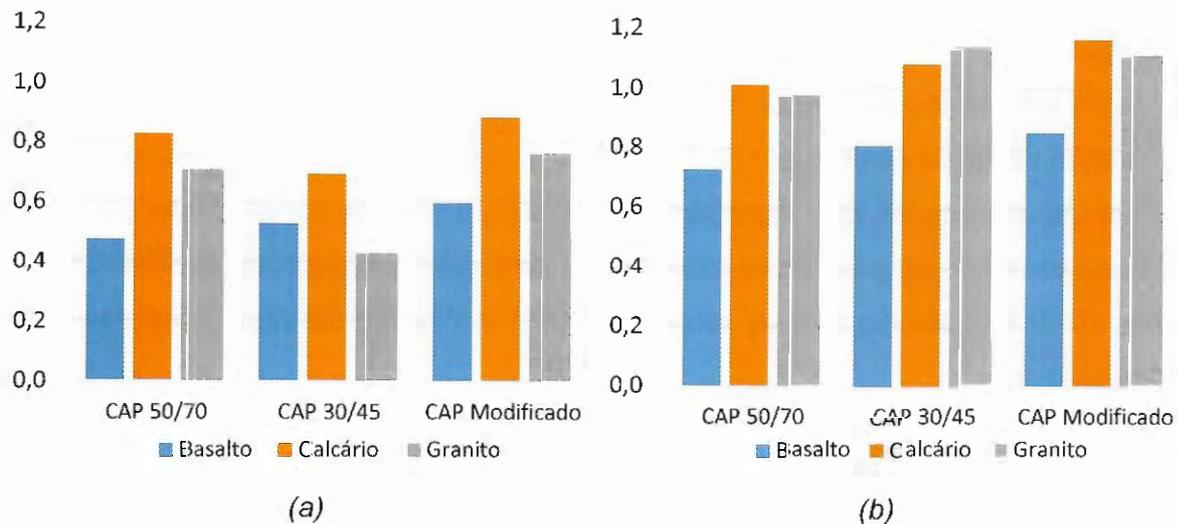
### 5.1.3 Elementos da Absorção - Análise da CAL

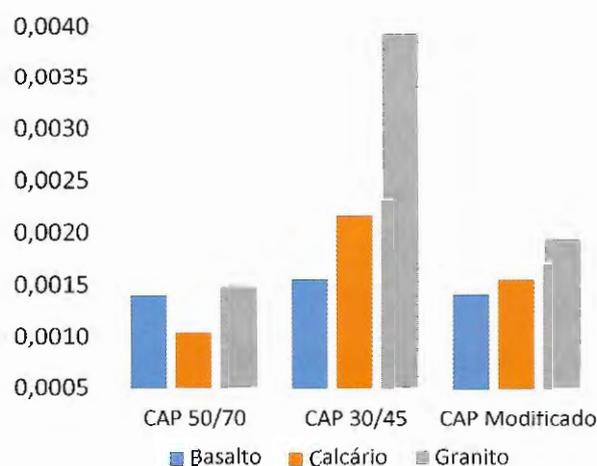
Os valores médios dos elementos de absorção da Cal, obtidos pela análise de CAPs, também em função dos agregados, estão apresentados na *Tabela 13*.

*Tabela 13* – Elementos da Absorção em Função da Presença de Cal Hidratada

CAP		CAP 50/70	CAP 30/45	CAP Modificado
$Abs_{inicial}$	Basalto	0,475	0,528	0,596
	Calcário	0,825	0,692	0,881
	Granito	0,706	0,429	0,759
$Abs_{final}$	Basalto	0,729	0,811	0,854
	Calcário	1,013	1,085	1,164
	Granito	0,975	1,138	1,109
$Abs_{\Delta}$	Basalto	0,254	0,283	0,258
	Calcário	0,188	0,393	0,283
	Granito	0,269	0,709	0,350

As *Figuras 25 (a), (b) e (c)* apresentam os gráficos em barra dos elementos  $Abs_{inicial}$ ,  $Abs_{final}$  e  $Abs_{\Delta}$ , respectivamente, em função da presença de Cal.





(c)

Figura 25 - Elementos da absorção de asfalto em função dos ligantes asfálticos e da presença de cal: (a) -  $Abs_{inicial}$ ; (b) -  $Abs_{final}$ ; (c) -  $Abs_{\Delta}$

Em função da  $Abs_{inicial}$ , é possível notar que o agregado de Calcário apresenta os maiores valores médios, seguido pelo agregado de Granito, que é superado pelo agregado de Basalto somente em relação ao CAP 30/45. Já em relação aos CAPs propriamente ditos, os maiores valores estão relacionados ao CAP Modificado, seguido do CAP 50/70, diferentemente da análise sem Cal, a qual apresentou em segundo lugar o CAP 30/45.

Em relação à  $Abs_{final}$  nota-se que os menores valores foram apresentados pelo CAP 30/45, diferentemente da análise sem o material, na qual o CAP 50/70 obteve os menores valores. Em semelhança à análise sem Cal, o agregado de Basalto é o que apresenta os menores valores finais médios de absorção. Já em relação aos CAPs, o comportamento foi semelhante à análise sem Cal, onde o CAP Modificado ficou em primeiro lugar, representando os maiores valores médios de absorção final, seguido do CAP 30/45 e por fim o CAP 50/70.

A velocidade de absorção, em função da presença de Cal, foi mais significativa para o agregado de Granito, seguido pelo Calcário que foi superado pelo agregado de Basalto somente para o CAP 50/70. Já em relação aos CAPs, os maiores valores foram apresentados pelo CAP 30/45, seguido do CAP Modificado e, por fim, o CAP 50/70 com uma velocidade reduzida de estabilização.

## 5.2. ANÁLISE FATORIAL DA ABSORÇÃO EM LONGO PRAZO EM FUNÇÃO DOS AGREGADOS

O ranqueamento dos componentes analisados - tempo, tipos de asfaltos, teores e presença ou não de cal, por tipo de agregado - foi feito pelo método da Regressão Linear Múltipla (RLM), o qual permite uma análise global dos elementos frente à absorção em longo prazo.

Para que fosse possível o ranqueamento dos elementos após a análise, todos foram tratados como elementos únicos, ou seja, componentes individuais de uma equação representativa da absorção em longo prazo. Para tanto, ao invés do uso dos valores de porcentagem, como é caso dos teores de asfalto e da cal, os mesmos foram substituídos por valores não-numéricos, ou seja, *zero* e *um*, indicando, assim, a presença ou não desses elementos em cada tempo de análise das misturas. A *Figura 26* apresenta um exemplo desse modelo não-numérico aplicado em alguns componentes.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	ME ORIGINME PARA	IMPO (DIA	CAP 50-70	CAP 30-45	CAP MOD	4,50%	5%	5,50%	CAL	ABS. ASFALTO (%)	
2	B57-4,5	11101	0,1	1	0	0	1	0	0	0	0,29
3	B57-4,5	1111	1	1	0	0	1	0	0	0	0,61
4	B57-4,5	1117	7	1	0	0	1	0	0	0	0,79
5	B57-4,5	11130	30	1	0	0	1	0	0	0	0,88
6	B57-4,5	11190	90	1	0	0	1	0	0	0	0,90
7	B57-4,5	111180	180	1	0	0	1	0	0	0	0,93
8	B57-5	11201	0,1	1	0	0	0	1	0	0	0,50
9	B57-5	1121	1	1	0	0	0	1	0	0	0,54
10	B57-5	1127	7	1	0	0	0	1	0	0	0,70
11	B57-5	11230	30	1	0	0	0	1	0	0	0,84
12	B57-5	11290	90	1	0	0	0	1	0	0	0,89
13	B57-5	112180	180	1	0	0	0	1	0	0	0,93

*Figura 26* – Exemplificação da aplicação de componentes não-numéricos para ranqueamento dos elementos

### 5.2.1 Análise Fatorial por Regressão Linear Múltipla

Aplicando-se assim o método para cada banco de dados dos agregados, separadamente, é possível obter o ranqueamento dos elementos representativos da absorção em longo prazo, como apresentado pela *Tabela 14*.

Tabela 14 - Análise Fatorial por Regressão Linear Múltipla

	<i>Basalto</i>		<i>Calcário</i>		<i>Granito</i>	
<i>R-Quadrado</i>	0,645		0,416		0,524	
<i>Variáveis Representativas</i>	CAP MOD	0,156	5%	0,066	CAP MOD	0,067
	CAL	-0,127	CAP MOD	0,062	CAP 30/45	0,041
	CAP 30/45	0,091	CAL	-0,061	4,5%	-0,027
	5%	-0,034	4,5%	0,048	5%	-0,022
	4,5%	0,016	CAP 30/45	-0,003	CAL	-0,009
	TEMPO (DIAS)	0,002	TEMPO (DIAS)	0,001	TEMPO (DIAS)	0,002
<i>Variáveis Não-Representativas</i>	CAP 50/70	0	CAP 50/70	0	CAP 50/70	0
	5,5%	0	5,5%	0	5,5%	0

A partir do ranqueamento dos elementos para cada agregado proposto, é possível notar que os elementos CAP 50/70 e o teor de 5,5% foram eliminados, ou seja, dados como não-representativos da absorção em longo prazo para todos os agregados analisados, fato que pode ter relação com as dispersões de valores apresentados pelos elementos nas análises gráficas da absorção.

Outra característica semelhante para todos os agregados é a baixa representatividade do Tempo, que ficou em último lugar. Ao contrário, por exemplo, da alta representatividade do CAP Modificado, que só não ocupou a primeira colocação para o agregado de Calcário, que ficou com o teor de 5%.

Já os outros elementos apresentaram comportamentos individuais em relação à cada um dos agregados, como por exemplo a Cal, que ficou em segundo lugar no ranqueamento do Basalto, terceiro no Calcário e penúltimo no Granito, sendo que para todos eles ela apresentou valores negativos, ou seja, contribuiu com a redução da absorção.

Esse impacto positivo ou negativo na absorção também apresenta um comportamento individualizado para cada agregado, pois, os teores de 4,5% e 5% representaram uma redução da absorção para o agregado de Granito, aumento para o agregado de Calcário e aumento e redução, respectivamente, para o agregado de Basalto. Já em relação aos CAPs representativos, o único que significou uma redução da absorção em longo prazo foi o CAP 30/45 para o agregado de Calcário, para todas as outras combinações de CAPs e agregados, a presença dos asfaltos significa um aumento da absorção em longo prazo.

### 5.3. EQUAÇÃO PARAMÉTRICA POR CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO CRUZADA

A partir da análise fatorial aplicada aos componentes das misturas propostas em função da absorção em longo prazo, é possível obter uma equação, para cada tipo de agregado, que representa todo o conjunto de variáveis dependentes e independentes.

Para tanto, o método aplicado foi de calibração e validação cruzada, no qual cada banco de dados dos agregados foi dividido em três conjuntos equivalentes de amostras selecionadas aleatoriamente. Dessa maneira, cada equação é calibrada por dois grupos e validada por um terceiro e assim sucessivamente até que todos os grupos tenham sido usados duas vezes na calibração e uma na validação. Dessa maneira, a partir da Análise Fatorial proposta para cada um dos agregados analisados, as variáveis não-representativas obtidas no modelo (CAP 50/70 e teor de 5,5%) foram excluídas, obtendo-se assim os coeficientes somente para as variáveis independentes representativas.

A *Tabela 15* apresenta, a partir da equação com o menor Erro Médio (%), os coeficientes das equações que representam o comportamento de cada um dos tipos de agregado.

*Tabela 15 – Coeficientes e Erros Médios das Equações Paramétricas*

	<i>Basalto</i>	<i>Calcário</i>	<i>Granito</i>
<i>Erro Médio (%)</i>	0,124	0,191	0,115
<i>Interseção</i>	0,656	0,905	0,794
<i>Variáveis Representativas</i>	TEMPO (DIAS) 0,002	TEMPO (DIAS) 0,001	TEMPO (DIAS) 0,001
	CAP 30-45 0,127	CAP 30/45 0,006	CAP 30/45 0,077
	CAP MOD 0,168	CAP MOD 0,086	CAP MOD 0,081
	4,5% 0,018	4,50% 0,013	4,50% -0,038
	5% -0,047	5% 0,050	5% -0,023
	CAL -0,097	CAL -0,043	CAL 0,019

A partir dos coeficientes, é possível obter as *Equações 6, 7 e 8* que representam a absorção em longo prazo, considerando as variáveis representativas do modelo, para os agregados de Basalto, Calcário e Granito, respectivamente.

$$\text{Abs}_{\text{Basalto}}(\%) = \text{Tempo} \times 0,002 + \text{CAP30/45} \times 0,127 + \text{CAPMOD} \times 0,168 + 4,5\% \times 0,018 - 5\% \times 0,047 - \text{CAL} \times 0,097 \quad (6)$$

$$\text{Abs}_{\text{Calcário}}(\%) = \text{Tempo} \times 0,001 + \text{CAP30/45} \times 0,006 + \text{CAPMOD} \times 0,086 + 4,5\% \times 0,013 + 5\% \times 0,050 - \text{CAL} \times 0,043 \quad (7)$$

$$\text{Abs}_{\text{Granito}}(\%) = \text{Tempo} \times 0,001 + \text{CAP30/45} \times 0,077 + \text{CAPMOD} \times 0,081 - 4,5\% \times 0,038 - 5\% \times 0,023 + \text{CAL} \times 0,019 \quad (8)$$

Sendo:

- Tempo - dias;
- CAP 30/45 - 1 quando presente e 0 quando ausente;
- CAP MOD - 1 quando presente e 0 quando ausente;
- 4,5% - 1 quando presente e 0 quando ausente;
- 5% - 1 quando presente e 0 quando ausente;
- CAL - 1 quando presente e 0 quando ausente.

#### 5.4. ANÁLISE FATORIAL DOS ENSAIOS DE RESPOSTA MECÂNICA – MÓDULO DE RESILIÊNCIA E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A análise fatorial, por agregados, abrangendo os ensaios de resposta mecânica propostos, Módulo de Resiliência e Resistência à Tração, permite que a correspondência entre a absorção em longo prazo e os valores obtidos nos ensaios sejam ranqueados por ordem de relevância, conjuntamente com todos os componentes das amostras.

Sendo assim, a análise fatorial foi também aplicada ao conjunto dos elementos das amostras mais os dados dos ensaios mecânicos, excluindo-se em ambos, os teores de 4,5 e 5,5%, haja vista que as amostras para análise dos ensaios de resposta mecânica foram compostas somente com o teor de 5% dos asfaltos em massa.

Assim, a *Tabela 16* apresenta a análise fatorial dos elementos das amostras incorporando-se os dados de Módulo de Resiliência.

Tabela 16 – Análise Fatorial por Regressão Linear Múltipla – Módulo de Resiliência

	<i>Basalto</i>		<i>Calcário</i>		<i>Granito</i>	
<i>R-Quadrado</i>	0,797		0,693		0,619	
<i>Variáveis Representativas</i>	CAL	-0,124	CAP MOD	0,116	CAP MOD	0,047
	CAP MOD	0,097	CAP 30/45	0,067	CAL	0,013
	CAP 30/45	0,051	CAL	-0,030	CAP 30/45	0,006
	TEMPO (DIAS)	0,001	TEMPO (DIAS)	0,001	TEMPO (DIAS)	0,001
	MR	9,57E-06	MR	-1,53E-05	MR	7,59E-06
<i>Variáveis Não-Representativas</i>	CAP 50/70	0	CAP 50/70	0	CAP 50/70	0
	5,0%	0	5,0%	0	5,0%	0

Pelo método de ranqueamento dos elementos das amostras conjuntamente com os dados de Módulo de Resiliência, é possível observar que tanto o teor de 5% como o CAP 50/70 não são representativos para todos os modelos gerados em função dos agregados.

Outra característica semelhante entre os agregados é a baixa representatividade do próprio Módulo de Resiliência, que ficou em último lugar em todos os ranques gerados e do Tempo, que ficou em penúltimo. Bastante semelhante à análise sem os dados de Módulo de Resiliência está a colocação do CAP Modificado, que ficou em segundo lugar somente para o agregado de Basalto.

Já a Cal apresentou comportamentos individuais em relação aos agregados, ficando em primeiro lugar no ranqueamento do agregado de Basalto, terceiro no Basalto e em segundo no Granito, sendo o último o único agregado para o qual a presença de Cal representou um aumento da absorção em longo prazo.

A análise fatorial do conjunto dos elementos das amostras mais os dados do ensaio de Resistência à Tração estão apresentados na *Tabela 17*.

Tabela 17 – Análise Fatorial por Regressão Linear Múltipla – Resistência à Tração

	<i>Basalto</i>		<i>Calcário</i>		<i>Granito</i>	
<i>R-Quadrado</i>	0,809		0,739		0,606	
<i>Variáveis Representativas</i>	RT	0,350	RT	0,370	RT	0,105
	CAL	-0,121	CAP 30/45	-0,330	CAP 30/45	-0,046
	CAP 30/45	-0,080	CAP MOD	-0,225	CAL	0,021
	CAP MOD	-0,053	CAL	-0,028	CAP MOD	-0,016
	TEMPO (DIAS)	9,66E-04	TEMPO (DIAS)	3,39E-04	TEMPO (DIAS)	9,87E-04
<i>Variáveis Não-Representativas</i>	CAP 50/70	0	CAP 50/70	0	CAP 50/70	0
	5,0%	0	5,0%	0	5,0%	0

A partir do ranqueamento dos elementos das amostras juntamente com os dados de Resistência à Tração, é possível notar que semelhantemente à análise com os dados de Módulo de Resiliência, tanto o teor de 5,0% quanto o CAP 50/70 não apresentaram valores significativos de representação do modelo de absorção de asfalto em longo prazo.

Outra característica semelhante entre todos os agregados analisados foi a colocação da própria Resistência à Tração, que ficou em primeiro lugar em todos os ranqueamentos gerados. Já o CAP 30/45 não ocupou o segundo lugar somente para o agregado de Basalto, que foi superado pela Cal.

O CAP Modificado, que ficou em colocações bem superiores na análise com os dados de Módulos de Resiliência, não manteve sua boa correlação quando analisado conjuntamente com os dados de Resistência à Tração, uma vez que o asfalto só não ocupou o penúltimo lugar para o agregado de Calcário, que ficou à cargo da Cal.

Já a presença de Cal, propriamente dita, também apresentou um comportamento individualizado em função dos agregados, ficando em segundo lugar para o agregado de Basalto, quarto para o Calcário e terceiro para o Granito, sendo que para o último, a presença de cal significou, em semelhança à análise de MR, um aumento da absorção de asfalto em longo prazo.

#### 5.4.1 Equação Paramétrica por Calibração e Validação – Ensaio de Resposta Mecânica

Como os ensaios de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração são, na maioria das vezes, usados como parâmetros alvo para os projetos de camada asfáltica, alterações em seus valores podem significar problemas tanto em fase de projeto como ao longo da vida útil de um pavimento.

Dessa maneira, dada a correlação da absorção em longo prazo com ambos os ensaios de resposta mecânica, foram calibradas equações de previsão dos valores dos ensaios a partir dos dados e componentes das amostras analisadas em função da absorção em longo prazo, eliminando-se os elementos não-representativos, ou seja, de coeficiente zero: CAP 50/70 e todos os teores.

Assim, o método aplicado de Calibração e Validação foi feito dividindo-se, aleatoriamente, os bancos de dados dos agregados em dois grupos: 70% para Calibração e 30% para Validação. O método de Calibração e Validação Cruzada não foi aplicado devido ao número reduzido de amostras analisadas pelos ensaios de resposta mecânica.

A *Tabela 18* apresenta, portanto, os coeficientes obtidos para cada tipo de agregado em função da previsão da Resistência à Tração.

*Tabela 18 - Coeficientes e Erros Médios das Equações Paramétricas – Resistência à Tração*

	<i>Basalto</i>		<i>Calcário</i>		<i>Granito</i>	
<i>Erro Médio (%)</i>	9,315		6,075		14,662	
<i>Interseção</i>	1,638		0,119		0,680	
<i>Variáveis Representativas</i>	TEMPO (DIAS)	0,002	TEMPO (DIAS)	5,73E-05	TEMPO (DIAS)	8,54E-05
	CAP 30/45	-0,437	CAP 30/45	0,917	CAP 30/45	0,763
	CAP MOD	0,049	CAP MOD	0,808	CAP MOD	0,687
	CAL	0,007	CAL	-0,020	CAL	-0,003
	ABS. ASFALTO (%)	0,257	ABS. ASFALTO (%)	1,066	ABS. ASFALTO (%)	0,601

A partir dos coeficientes, é possível obter as *Equações 9, 10 e 11* que representam a Resistência à Tração, considerando as variáveis representativas do modelo, para os agregados de Basalto, Calcário e Granito, respectivamente.

$$RT_{\text{Basalto}}(\text{N/m}^2) = 1,638 + \text{Tempo} \cdot 2,04 \times 10^{-3} - \text{CAP30/45} \cdot 0,437 + \text{CAPMOD} \cdot 0,049 + \text{CAL} \cdot 0,007 + \text{ABSasf} \cdot 0,257 \quad (9)$$

$$RT_{\text{Calcário}}(\text{N/m}^2) = 0,119 + \text{Tempo} \cdot 5,73 \times 10^{-5} + \text{CAP30/45} \cdot 0,917 + \text{CAPMOD} \cdot 0,808 - \text{CAL} \cdot 0,020 + \text{ABSasf} \cdot 1,066 \quad (10)$$

$$RT_{\text{Granito}}(\text{N/m}^2) = 0,680 + \text{Tempo} \cdot 8,54 \times 10^{-5} + \text{CAP30/45} \cdot 0,763 + \text{CAPMOD} \cdot 0,687 - \text{CAL} \cdot 0,003 + \text{ABSasf} \cdot 0,601 \quad (11)$$

Sendo:

- Tempo - dias;
- CAP 30/45 - 1 quando presente e 0 quando ausente;
- CAP MOD - 1 quando presente e 0 quando ausente;
- CAL - 1 quando presente e 0 quando ausente;
- Abs<sub>Sasf</sub> - em porcentagem.

Já a *Tabela 19* apresenta os coeficientes obtidos para cada tipo de agregado em função da previsão do Módulo de Resiliência.

*Tabela 19* - Coeficientes e Erros Médios das Equações Paramétricas – Módulo de Resiliência

	<i>Basalto</i>	<i>Calcário</i>	<i>Granito</i>
<i>Erro Médio (%)</i>	38,924	12,892	16,222
<i>Interseção</i>	-7964,68	7064,97	3601,23
<i>Variáveis Representativas</i>	TEMPO (DIAS) -19,68	TEMPO (DIAS) 22,29	TEMPO (DIAS) 34,52
	CAP 30/45 -1937,30	CAP 30/45 5195,96	CAP 30/45 3393,04
	CAP MOD -1872,49	CAP MOD 2594,73	CAP MOD 1967,77
	CAL 2343,39	CAL 652,45	CAL -298,16
	ABS. ASFALTO (%) 22431,29	ABS. ASFALTO (%) -2250,76	ABS. ASFALTO (%) 350,98

A partir dos coeficientes, é possível obter as *Equações 12, 13 e 14* que representam o Módulo de Resiliência, considerando as variáveis representativas do modelo, para os agregados de Basalto, Calcário e Granito, respectivamente.

$$MR_{\text{Basalto}}(\text{kPa}) = -7964,68 - \text{Tempo} \cdot 19,68 - \text{CAP30/45} \cdot 1937,30 - \text{CAPMOD} \cdot 1872,49 + \text{CAL} \cdot 2343,39 + \text{ASBasf} \cdot 22431,29 \quad (12)$$

$$MR_{\text{Calcário}}(\text{kPa}) = +7064,97 + \text{Tempo} \cdot 22,29 + \text{CAP30/45} \cdot 5195,96 + \text{CAPMOD} \cdot 2594,73 + \text{CAL} \cdot 652,45 - \text{ASBasf} \cdot 2250,76 \quad (13)$$

$$MR_{\text{Granito}}(\text{kPa}) = +3601,23 + \text{Tempo} \cdot 34,52 + \text{CAP30/45} \cdot 3393,04 + \text{CAPMOD} \cdot 1967,77 - \text{CAL} \cdot 298,16 + \text{ASBasf} \cdot 350,98 \quad (14)$$

Sendo:

- Tempo - dias;
- CAP 30/45 - 1 quando presente e 0 quando ausente;
- CAP MOD - 1 quando presente e 0 quando ausente;
- CAL - 1 quando presente e 0 quando ausente;
- Abs<sub>asf</sub> - em porcentagem.

## 5.5. MATRIZ DE CORRELAÇÃO

A Matriz de Correlação permite que as correspondências entre os próprios elementos da regressão sejam observadas, à luz da variável dependente. Assim, a *Figura 27* apresenta todos os elementos analisados pelas regressões lineares, incluindo também os ensaios de resposta mecânica, em conjunto com os coeficientes de correlação que todos os elementos estabelecem entre si.

**Correlações**

		CAP 50-70	CAP 30-45	CAP MOD	BASALTO	CALCARIO	GRANITO	0 045	0 05	0 055	TEMPO (DIAS)	CAL	RT	MR
CAP 50-70	Correlação de Pearson	1	-.500**	-.500**	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	-.894**	-.436**
	Sig. (2 extremidades)		.000	.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	.000	.000
	N	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	54	90
CAP 30-45	Correlação de Pearson	-.500**	1	-.500**	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.451**	.377**
	Sig. (2 extremidades)	.000		.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	.001	.000
	N	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	54	90
CAP MOD	Correlação de Pearson	-.500**	-.500**	1	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.443**	.061
	Sig. (2 extremidades)	.000	.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	.001	.566
	N	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	54	90
BASALTO	Correlação de Pearson	.000	.000	.000	1	-.500**	-.500**	.000	.000	.000	.000	.000	-.044	.008
	Sig. (2 extremidades)	1.000	1.000	1.000		.000	.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	.754	.937
	N	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	54	90
CALCARIO	Correlação de Pearson	.000	.000	.000	-.500**	1	-.500**	.000	.000	.000	.000	.000	.085	.129
	Sig. (2 extremidades)	1.000	1.000	1.000	.000		.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	.540	.225
	N	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	54	90
GRANITO	Correlação de Pearson	.000	.000	.000	-.500**	-.500**	1	.000	.000	.000	.000	.000	-.042	-.138
	Sig. (2 extremidades)	1.000	1.000	1.000	.000	.000		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	.764	.195
	N	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	54	90
0 045	Correlação de Pearson	.000	.000	.000	.000	.000	.000	1	-.577**	-.333**	.000	-.333**	b	b
	Sig. (2 extremidades)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		.000	.000	1.000	.000	.000	.000
	N	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	54	90
0 05	Correlação de Pearson	.000	.000	.000	.000	.000	.000	-.577**	1	-.577**	.000	.577**	b	b
	Sig. (2 extremidades)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	.000		.000	1.000	.000	.000	.000
	N	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	54	90
0 055	Correlação de Pearson	.000	.000	.000	.000	.000	.000	-.333**	-.577**	1	.000	-.333**	b	b
	Sig. (2 extremidades)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	.000	.000		1.000	.000	.000	.000
	N	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	54	90
TEMPO (DIAS)	Correlação de Pearson	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	1	.000	.205	.683**
	Sig. (2 extremidades)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		1.000	.136	.000
	N	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	54	90
CAL	Correlação de Pearson	.000	.000	.000	.000	.000	.000	-.333**	.577**	-.333**	.000	1	-.068	-.074
	Sig. (2 extremidades)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	.000	.000	.000	1.000		.626	.487
	N	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	54	90
RT	Correlação de Pearson	-.894**	.451**	.443**	-.044	.085	-.042	b	b	b	.205	-.068	1	.554**
	Sig. (2 extremidades)	.000	.001	.001	.754	.540	.764	.000	.000	.000	.136	.828		.000
	N	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54
MR	Correlação de Pearson	-.436**	.377**	.061	.008	.129	-.138	b	b	b	.683**	-.074	.554**	1
	Sig. (2 extremidades)	.000	.000	.566	.937	.225	.195	.000	.000	.000	.000	.487	.000	
	N	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	54	90

\*\* A correlação é significativa no nível 0,01 (2 extremidades)

b Não é possível calcular porque pelo menos uma das variáveis é constante

**Figura 27 - Matriz de Correlação**

Nota-se, pela matriz, que os ensaios mecânicos estabelecem correlações com quase todos os componentes das amostras analisadas, e, dessa forma, a previsão desses ensaios a partir da absorção de asfalto em longo prazo fica evidentemente bem correlacionada com as outras variáveis independentes do sistema.

Já em relação à Cal é possível observar que o elemento tem relação com os teores, indicando que, mesmo que a análise com presença de Cal tenha sido composta somente com o teor de 5%, o comportamento dos teores de 4,5 e 5,5% estabelece de alguma forma uma correlação com o próprio comportamento da Cal. Já em relação aos asfaltos, os elementos não apresentaram correlações com os outros componentes.

### 6.1. CURVAS DE ABSORÇÃO EM LONGO PRAZO

- As curvas de absorção em longo prazo apresentaram comportamentos similares em relação à tendência de linearização e convergência a partir dos 30 dias, porém, nenhuma análise obteve absorções finais estáveis, o que indica que o tempo final proposto (180 dias) ainda não representa a absorção final dos agregados analisados;
- Em relação à absorção inicial e final, todas as amostras propostas apresentaram mais de 50% da absorção de asfalto total (considerando somente os 180 dias propostos) no momento da usinagem;
- Ainda em relação às curvas de absorção, os elementos: agregado de Granito, teor de 5% e CAP Modificado, apresentaram valores mais dispersos, contrariamente ao agregado de Calcário, teor de 4,5% e CAP 50/70 que apresentaram curvas mais convergentes e homogêneas;
- Apesar da presença de cal hidratada nas misturas asfálticas significar uma redução da absorção em longo prazo, na maioria dos casos, o fenômeno se mostrou menos linearizado, para os últimos tempos de análise, quando adicionada a cal hidratada.

### 6.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ELEMENTOS DA ABSORÇÃO

- Os maiores valores médios de  $Abs_{inicial}$  foram apresentados pelo agregado de Calcário, CAP Modificado e teor de 5%. Já em relação à  $Abs_{final}$ , os elementos com os maiores valores foram, novamente, o agregado de Calcário e o CAP Modificado, porém, o teor mais absorsor ao longo do tempo foi o de 5,5%;
- A presença de cal hidratada significou uma redução da  $Abs_{inicial}$ , porém, apesar de colaborar com a redução da absorção em longo prazo, o material não apresenta uma homogeneidade de comportamento para todas as misturas propostas.

### 6.3. ANÁLISES FATORIAIS

- A partir da análise fatorial de todos os elementos das amostras, incluindo a Cal, foi possível constatar que o CAP 50/70 e o teor de 5,5% não são

### 6.1. CURVAS DE ABSORÇÃO EM LONGO PRAZO

- As curvas de absorção em longo prazo apresentaram comportamentos similares em relação à tendência de linearização e convergência a partir dos 30 dias, porém, nenhuma análise obteve absorções finais estáveis, o que indica que o tempo final proposto (180 dias) ainda não representa a absorção final dos agregados analisados;
- Em relação à absorção inicial e final, todas as amostras propostas apresentaram mais de 50% da absorção de asfalto total (considerando somente os 180 dias propostos) no momento da usinagem;
- Ainda em relação às curvas de absorção, os elementos: agregado de Granito, teor de 5% e CAP Modificado, apresentaram valores mais dispersos, contrariamente ao agregado de Calcário, teor de 4,5% e CAP 50/70 que apresentaram curvas mais convergentes e homogêneas;
- Apesar da presença de cal hidratada nas misturas asfálticas significar uma redução da absorção em longo prazo, na maioria dos casos, o fenômeno se mostrou menos linearizado, para os últimos tempos de análise, quando adicionada a cal hidratada.

### 6.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ELEMENTOS DA ABSORÇÃO

- Os maiores valores médios de  $Abs_{inicial}$  foram apresentados pelo agregado de Calcário, CAP Modificado e teor de 5%. Já em relação à  $Abs_{final}$ , os elementos com os maiores valores foram, novamente, o agregado de Calcário e o CAP Modificado, porém, o teor mais absorsor ao longo do tempo foi o de 5,5%;
- A presença de cal hidratada significou uma redução da  $Abs_{inicial}$ , porém, apesar de colaborar com a redução da absorção em longo prazo, o material não apresenta uma homogeneidade de comportamento para todas as misturas propostas.

### 6.3. ANÁLISES FATORIAIS

- A partir da análise fatorial de todos os elementos das amostras, incluindo a Cal, foi possível constatar que o CAP 50/70 e o teor de 5,5% não são

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

---

- Dados os valores de  $Abs_{inicial}$ , sugere-se corrigi-los, ou seja, adicionar em fase de usinagem a porcentagem esperada, bem como aumentar o tempo de 2 horas de simulação da absorção e do transporte, para análise tanto da nova  $Abs_{inicial}$  quanto os efeitos a longo prazo da correção e retardamento da mesma;
- A partir da determinação do teor ótimo de asfalto para cada mistura proposta, sugere-se dosar o ligante asfáltico no limite máximo da faixa de porcentagens, para fins de compreensão do fenômeno à longo prazo para teores superiores;
- Analisar os efeitos de diferentes formas de estocagem das amostras: ao ar livre, em ambiente escuro, sob luz infra violeta etc.;
- Analisar a absorção em longo prazo para agregados de mesma origem mineralógica, porém de diferentes pedreiras, para uma observação mais ampla do fenômeno em função dos tipos de agregados, bem como ampliar a participação da cal na composição das amostras;
- Verificar tanto o comportamento da absorção em longo prazo para agregados compactados e submetidos à desagregação, quanto para o reuso das amostras, para uma simulação mais fidedigna da avaliação do fenômeno na prática.

- AASHTO PP2 (2001). *Standard practice for short and long term aging of hot mix asphalt*. 2000 Edition; Interim Edition 4/2001.
- Alani, H. M.; Mansour, S. L. and Hasso, H. G. (1987). *Asphalt Absorption by Aggregates, Effect on Paving Mixtures*. Al-muhandis: Journal of Iraqi Society of Engineers, Baghdad, Iraq.
- Airey, G. D. & Choi, Y. K. (2002). *State of the art report on moisture sensitivity test methods for bituminous pavement materials*. Road Materials and Pavement Design, 355–372.
- Airey, G. D.; Masad, E.; Bhasin, A.; Caro, S. and Little, D. (2007). *Asphalt Mixture Moisture Damage Assessment Combined with Surface Energy Characterization*. In Proceedings of a Conference on Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials.
- ASTM D2041/D2041M-11(2003). *Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures*. American Society for Testing and Materials. USA, 2003.
- ASTM D4402/D4402M-12 (2002). *Standard test method for viscosity determinations of unfilled asphalts using the Brookfield thermosel apparatus*. American Society for Testing and Materials.
- Castro Neto, A. M. (1996). *Determinação da densidade máxima teórica de misturas betuminosas*. 30ª Reunião Anual de Pavimentação, v. 1, p. 35 – 60, Salvador, Bahia.
- Chadbourn, B. A.; Skok, E. L.; Crow, B. L.; Spindler, S. and Newcomb, D. E. (2000). *The Effect of Voids in Mineral Aggregate (VMA) on Hot-Mix Asphalt Pavements*. Minnesota Department of Transportation, USA.

Cooley Jr, L. A. and William, L. S. K. (2009). *Evaluation of Hot Mix Asphalt (Hma) Lift Thickness*. Federal Highway Administration and Mississippi Department of Transportation.

Curtis C. W.; Ensley K. and Epps J. (1993). *Fundamental properties of asphalt-aggregate interactions including adhesion and absorption*. Washington, DC: Strategic Highway Research Program, National Research Council.

DNER – ME 043/95 (1995). *Método de Ensaio - Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. IPR, Rio de Janeiro.

DNER-ME 081/98 (1998). *Agregados: determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. IPR, Rio de Janeiro.

DNER – ME 138/09 (2009). *Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.

DNIT 031/2004 (2004). *Especificação de Serviço - Pavimentação - Concreto asfáltico*. Rio de Janeiro.

DNIT 135/2010 (2010). *Pavimentação Asfáltica - Misturas Asfálticas - Determinação do Módulo de Resiliência*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

Donaldson, J. A., Loomis, R. J., and Krichma, L. C. (1947). *The Measurement of Aggregate Absorption*. Association of Asphalt Paving Technologists., 16, 353 – 372.

- Doyle J.; Howard I. and Robinson W. (2012). *Prediction of absorbed, inert, and effective bituminous quantities in reclaimed asphalt pavement*. J Mater Civil Eng.; 24(1):102–12.
- Fadhil, T. H.; Mohammed, H. A. and Ahmed, T. Y. (2015). *An Empirical Relationship between Asphalt and Water Absorption of Coarse Aggregates in HMA*. Journal of Engineering and Development, Vol. 19, No.1.
- Ferreira, A. B. de H. (1999). *Novo dicionário da Língua Portuguesa*. 2. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira.
- Gouveia, L. T. (2006). *Contribuições ao estudo da influência de propriedades de agregados no comportamento de misturas asfálticas densas*. 2006, 309 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Gouveia, L. T.; Fernandes Jr., J. L. (2005). *Efeitos da absorção de ligante pelos agregados nas propriedades volumétricas de misturas asfálticas*. In: 36ª Reunião Anual de Pavimentação, Curitiba.
- Gouveia, L. T.; Furlan, A. P. ; Parreira, A. B. ; Fernandes Jr, J. L. ; Fabbri, G. T. P. (2004). *Considerações acerca da absorção de asfalto pelos agregados e sua influência na suscetibilidade à umidade*. In: XVIII ANPET-Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Florianópolis. v. 1. p. 138-149.
- Hicks, G. H. (1991). *Moisture damage in asphalt concrete*. NCHRP 175 – National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice Transportation Research Board.
- Huang, S. C.; Robertson, R. E. and Branthaver, J. F. (2003). *Physical-Chemical Characterization of asphalt-aggregate interactions under the influence of freeza-thaw cycle*. Annual Meeting, Transportation Research Record, pp. 2-17.

- Hveem, F. N. (1942). *Use of centrifuge kerosene equivalent as applied to determine the required oil content for dense graded bituminous mixtures*. Association of Asphalt Paving Technologists, v. 13, p. 9 – 40.
- Kandhal, P. S.; Lee, D. (1972). *Asphalt absorption as related to pore characteristics of aggregates*. Highway Research Record, n. 404.
- Khandal, S. P. and Khatri, M. A. (1991). *Evaluation of Asphalt Absorption by Mineral Aggregates*. NCAT Report 91-04, Auburn University, USA, P.P. 11-13.
- Kandhal, P. S. and Khatri, M. A. (1992). *Relating asphalt absorption to properties of asphalt cement and aggregate*. Transp Res Rec, 76–84.
- Lee, D. Y. (1969). *The relationship between physical and chemical properties of aggregates and their asphalt absorption*. Association of Asphalt Paving Technologists, v.38, p.242 – 275.
- Lee, D. Y.; Guinn, J. A.; Kandhal, P. S.; Dunning, R. L. (1990). *Absorption of asphalt into porous aggregates*. Strategic Highway Research Program (SHRP).
- Leite, L. F. M. (1999). *Estudos de Preparo e Caracterização de Asfaltos Modificados por Polímero*. Tese de Doutorado, IMA/UFRJ, Rio de Janeiro
- Lettier, J. A.; Fink, D. F.; Wilson, N. B.; Farley, F. F. (1949). *Mechanism of absorption of bituminous materials by aggregate*. Association of Asphalt Pavement Technologists, v.18, p.278 – 300.
- Liu, G.; Jin, X.; Rose, A.; Cui, Y. and Glover, C. J. (2014). *Application of density gradient column to flexible pavement materials: Aggregate characteristics and asphalt absorption*. Construction and Building Materials, vol. 72, 182 – 188.
- Lohn, R. N. (1947). *A Method to Determine Aggregate Absorption and Control of Bituminous-Aggregate Properties*. Association of Asphalt Paving Technologists.

- Luo R. and Lytton R. (2012). *Selective absorption of asphalt binder by limestone aggregates in asphalt mixtures*. J Mater Civil Eng.; 25(2):219–26.
- Nevitt, H. G., and Krchma, L. C. (1942). *Absorption of Liquid Bituminous Cement by Aggregates*. Association of Asphalt Paving Technologists, 13, 52 – 68.
- Rice, J. M. (1953). *New test method for direct measurement of maximum density of bituminous mixtures*. Crushed Stone Journal.
- SHELL. (2003). *The shell bitumen handbook*. 5. Ed. Cambridge.

## BANCO DE DADOS COMPLETO

NOME ORIGINAL	TEMPO (DIAS)	CAP 50/70	CAP 30/45	CAP MOD	4,50%	5%	5,50%	CAL	ABS. ASFALTO (%)	RT	MR
B57-4,5	0,1	1	0	0	1	0	0	0	0,29		
	1	1	0	0	1	0	0	0	0,61		
	7	1	0	0	1	0	0	0	0,79		
	30	1	0	0	1	0	0	0	0,88		
	90	1	0	0	1	0	0	0	0,90		
	180	1	0	0	1	0	0	0	0,93		
B57-5	0,1	1	0	0	0	1	0	0	0,50		
	1	1	0	0	0	1	0	0	0,54	1,36	5011,4
	7	1	0	0	0	1	0	0	0,70		5632,5
	30	1	0	0	0	1	0	0	0,84	1,42	7679,0
	90	1	0	0	0	1	0	0	0,89		9205,2
	180	1	0	0	0	1	0	0	0,93	1,46	11109,7
B57-5,5	0,1	1	0	0	0	0	1	0	0,51		
	1	1	0	0	0	0	1	0	0,62		
	7	1	0	0	0	0	1	0	0,79		
	30	1	0	0	0	0	1	0	0,91		
	90	1	0	0	0	0	1	0	0,91		
	180	1	0	0	0	0	1	0	0,93		
B34-4,5	0,1	0	1	0	1	0	0	0	0,65		
	1	0	1	0	1	0	0	0	0,73		
	7	0	1	0	1	0	0	0	0,87		
	30	0	1	0	1	0	0	0	0,98		
	90	0	1	0	1	0	0	0	1,05		
	180	0	1	0	1	0	0	0	1,06		
B34-5	0,1	0	1	0	0	1	0	0	0,57		
	1	0	1	0	0	1	0	0	0,67	1,85	4145,9
	7	0	1	0	0	1	0	0	0,86		6612,0

	30	0	1	0	0	1	0	0	0,87	1,85	6642,4
	90	0	1	0	0	1	0	0	0,99		13219,2
	180	0	1	0	0	1	0	0	1,01	1,91	18092,3
B34-5,5	0,1	0	1	0	0	0	1	0	0,53		
	1	0	1	0	0	0	1	0	0,65		
	7	0	1	0	0	0	1	0	0,80		
	30	0	1	0	0	0	1	0	0,99		
	90	0	1	0	0	0	1	0	0,99		
	180	0	1	0	0	0	1	0	1,02		
BMOD-4,5	0,1	0	0	1	1	0	0	0	0,71		
	1	0	0	1	1	0	0	0	0,84		
	7	0	0	1	1	0	0	0	0,99		
	30	0	0	1	1	0	0	0	1,03		
	90	0	0	1	1	0	0	0	1,06		
	180	0	0	1	1	0	0	0	1,12		
BMOD-5	0,1	0	0	1	0	1	0	0	0,67		
	1	0	0	1	0	1	0	0	0,74	1,82	7334,8
	7	0	0	1	0	1	0	0	0,84		7398,2
	30	0	0	1	0	1	0	0	0,93	1,96	6213,6
	90	0	0	1	0	1	0	0	1,01		13292,6
	180	0	0	1	0	1	0	0	1,03	2,02	19056,5
BMOD-5,5	0,1	0	0	1	0	0	1	0	0,72		
	1	0	0	1	0	0	1	0	0,76		
	7	0	0	1	0	0	1	0	0,93		
	30	0	0	1	0	0	1	0	0,98		
	90	0	0	1	0	0	1	0	1,04		
	180	0	0	1	0	0	1	0	1,11		
B57-C	0,1	1	0	0	0	1	0	1	0,47		
	1	1	0	0	0	1	0	1	0,52	1,31	5049,6
	7	1	0	0	0	1	0	1	0,66		5226,8

	30	1	0	0	0	1	0	1	0,67	1,42	5233,5
	90	1	0	0	0	1	0	1	0,69		4141,9
	180	1	0	0	0	1	0	1	0,73	1,44	6237,8
B34-C	0,1	0	1	0	0	1	0	1	0,53		
	1	0	1	0	0	1	0	1	0,55	1,66	5765,6
	7	0	1	0	0	1	0	1	0,71		7325,6
	30	0	1	0	0	1	0	1	0,73	1,84	7821,7
	90	0	1	0	0	1	0	1	0,78		11160,1
	180	0	1	0	0	1	0	1	0,81	1,85	14056,4
BMOD-C	0,1	0	0	1	0	1	0	1	0,60		
	1	0	0	1	0	1	0	1	0,64	1,58	6335,9
	7	0	0	1	0	1	0	1	0,78		6333,7
	30	0	0	1	0	1	0	1	0,78	2,00	6429,1
	90	0	0	1	0	1	0	1	0,81		9133,0
	180	0	0	1	0	1	0	1	0,85	2,05	11502,4
C57-4,5	0,1	1	0	0	1	0	0	0	0,93		
	1	1	0	0	1	0	0	0	1,00		
	7	1	0	0	1	0	0	0	1,06		
	30	1	0	0	1	0	0	0	1,06		
	90	1	0	0	1	0	0	0	1,06		
	180	1	0	0	1	0	0	0	1,06		
C57-5	0,1	1	0	0	0	1	0	0	0,89		
	1	1	0	0	0	1	0	0	0,94	1,06	5777,0
	7	1	0	0	0	1	0	0	1,02		5821,6
	30	1	0	0	0	1	0	0	1,08	1,25	5866,2
	90	1	0	0	0	1	0	0	1,09		6746,1
	180	1	0	0	0	1	0	0	1,10	1,26	7532,1
C57-5,5	0,1	1	0	0	0	0	1	0	0,77		
	1	1	0	0	0	0	1	0	0,84		

	7	1	0	0	0	0	1	0	0,93		
	30	1	0	0	0	0	1	0	0,96		
	90	1	0	0	0	0	1	0	1,01		
	180	1	0	0	0	0	1	0	1,00		
C34-4,5	0,1	0	1	0	1	0	0	0	0,76		
	1	0	1	0	1	0	0	0	0,92		
	7	0	1	0	1	0	0	0	0,96		
	30	0	1	0	1	0	0	0	1,01		
	90	0	1	0	1	0	0	0	1,01		
	180	0	1	0	1	0	0	0	1,01		
C34-5	0,1	0	1	0	0	1	0	0	0,92		
	1	0	1	0	0	1	0	0	0,96	2,00	9746,2
	7	0	1	0	0	1	0	0	1,01		10269,2
	30	0	1	0	0	1	0	0	1,02	2,12	10604,2
	90	0	1	0	0	1	0	0	1,03		11517,1
	180	0	1	0	0	1	0	0	1,07	2,16	12098,7
C34-5,5	0,1	0	1	0	0	0	1	0	0,87		
	1	0	1	0	0	0	1	0	1,03		
	7	0	1	0	0	0	1	0	1,04		
	30	0	1	0	0	0	1	0	1,06		
	90	0	1	0	0	0	1	0	1,05		
	180	0	1	0	0	0	1	0	1,05		
CMOD-4,5	0,1	0	0	1	1	0	0	0	0,88		
	1	0	0	1	1	0	0	0	0,99		
	7	0	0	1	1	0	0	0	1,07		
	30	0	0	1	1	0	0	0	1,14		
	90	0	0	1	1	0	0	0	1,15		
	180	0	0	1	1	0	0	0	1,14		
CMOD-5	0,1	0	0	1	0	1	0	0	1,05		
	1	0	0	1	0	1	0	0	1,05	1,96	6474,0

	7	0	0	1	0	1	0	0	1,05		6581,7
	30	0	0	1	0	1	0	0	1,08	2,14	6689,4
	90	0	0	1	0	1	0	0	1,09		10503,7
	180	0	0	1	0	1	0	0	1,09	2,21	12094,3
CMOD-5,5	0,1	0	0	1	0	0	1	0	0,60		
	1	0	0	1	0	0	1	0	0,82		
	7	0	0	1	0	0	1	0	1,03		
	30	0	0	1	0	0	1	0	1,06		
	90	0	0	1	0	0	1	0	1,06		
	180	0	0	1	0	0	1	0	1,17		
C57-C	0,1	1	0	0	0	1	0	1	0,83		
	1	1	0	0	0	1	0	1	0,86	1,12	7225,9
	7	1	0	0	0	1	0	1	0,89		7642,4
	30	1	0	0	0	1	0	1	0,98	1,25	5345,7
	90	1	0	0	0	1	0	1	1,00		6775,1
	180	1	0	0	0	1	0	1	1,01	1,29	8109,4
C34-C	0,1	0	1	0	0	1	0	1	0,69		
	1	0	1	0	0	1	0	1	0,81	1,87	11095,9
	7	0	1	0	0	1	0	1	0,88		11381,3
	30	0	1	0	0	1	0	1	1,00	2,15	11769,1
	90	0	1	0	0	1	0	1	1,06		12963,9
	180	0	1	0	0	1	0	1	1,09	2,19	14035,5
CMOD-C	0,1	0	0	1	0	1	0	1	0,88		
	1	0	0	1	0	1	0	1	1,00	1,91	7148,5
	7	0	0	1	0	1	0	1	1,09		7241,8
	30	0	0	1	0	1	0	1	1,10	1,99	7335,2
	90	0	0	1	0	1	0	1	1,11		10635,9
	180	0	0	1	0	1	0	1	1,16	2,05	12134,3
G57-4,5	0,1	1	0	0	1	0	0	0	0,73		

	1	1	0	0	1	0	0	0	0,75		
	7	1	0	0	1	0	0	0	0,82		
	30	1	0	0	1	0	0	0	0,99		
	90	1	0	0	1	0	0	0	1,00		
	180	1	0	0	1	0	0	0	1,02		
G57-5	0,1	1	0	0	0	1	0	0	0,64		
	1	1	0	0	0	1	0	0	0,76	1,31	3397,7
	7	1	0	0	0	1	0	0	0,88		4403,3
	30	1	0	0	0	1	0	0	0,95	1,14	4906,4
	90	1	0	0	0	1	0	0	1,01		7016,1
	180	1	0	0	0	1	0	0	1,05	1,17	9056,2
G57-5,5	0,1	1	0	0	0	0	1	0	0,62		
	1	1	0	0	0	0	1	0	0,75		
	7	1	0	0	0	0	1	0	0,84		
	30	1	0	0	0	0	1	0	0,91		
	90	1	0	0	0	0	1	0	0,94		
	180	1	0	0	0	0	1	0	0,99		
G34-4,5	0,1	0	1	0	1	0	0	0	0,64		
	1	0	1	0	1	0	0	0	0,77		
	7	0	1	0	1	0	0	0	0,89		
	30	0	1	0	1	0	0	0	0,92		
	90	0	1	0	1	0	0	0	1,11		
	180	0	1	0	1	0	0	0	1,10		
G34-5	0,1	0	1	0	0	1	0	0	0,79		
	1	0	1	0	0	1	0	0	0,84	1,78	4878,0
	7	0	1	0	0	1	0	0	0,88		7245,4
	30	0	1	0	0	1	0	0	0,96	1,99	7966,0
	90	0	1	0	0	1	0	0	0,99		11152,4
	180	0	1	0	0	1	0	0	1,00	2,05	13012,4
G34-5,5	0,1	0	1	0	0	0	1	0	0,63		

	1	0	1	0	0	0	1	0	0,76		
	7	0	1	0	0	0	1	0	0,88		
	30	0	1	0	0	0	1	0	1,12		
	90	0	1	0	0	0	1	0	1,13		
	180	0	1	0	0	0	1	0	1,19		
GMOD-4,5	0,1	0	0	1	1	0	0	0	0,83		
	1	0	0	1	1	0	0	0	0,86		
	7	0	0	1	1	0	0	0	0,86		
	30	0	0	1	1	0	0	0	0,91		
	90	0	0	1	1	0	0	0	0,95		
	180	0	0	1	1	0	0	0	0,94		
GMOD-5	0,1	0	0	1	0	1	0	0	0,77		
	1	0	0	1	0	1	0	0	0,87	1,72	4780,3
	7	0	0	1	0	1	0	0	0,91		7005,5
	30	0	0	1	0	1	0	0	0,93	2,21	8432,3
	90	0	0	1	0	1	0	0	0,95		11467,9
	180	0	0	1	0	1	0	0	0,98	2,27	14062,2
GMOD-5,5	0,1	0	0	1	0	0	1	0	0,79		
	1	0	0	1	0	0	1	0	0,80		
	7	0	0	1	0	0	1	0	1,00		
	30	0	0	1	0	0	1	0	1,04		
	90	0	0	1	0	0	1	0	1,08		
	180	0	0	1	0	0	1	0	1,12		
G57-C	0,1	1	0	0	0	1	0	1	0,71		
	1	1	0	0	0	1	0	1	0,74	1,20	3811,0
	7	1	0	0	0	1	0	1	0,77		3959,6
	30	1	0	0	0	1	0	1	0,94	1,21	5533,6
	90	1	0	0	0	1	0	1	0,97		7468,9
	180	1	0	0	0	1	0	1	0,98	1,25	9503,7

G34-C	0,1	0	1	0	0	1	0	1	0,43		
	1	0	1	0	0	1	0	1	0,68	1,74	6240,5
	7	0	1	0	0	1	0	1	0,81		6450,9
	30	0	1	0	0	1	0	1	1,00	2,15	7908,4
	90	0	1	0	0	1	0	1	1,05		12089,7
	180	0	1	0	0	1	0	1	1,14	2,21	16245,6
GMOD-C	0,1	0	0	1	0	1	0	1	0,76		
	1	0	0	1	0	1	0	1	0,87	1,51	4155,4
	7	0	0	1	0	1	0	1	0,93		5530,3
	30	0	0	1	0	1	0	1	1,01	1,92	7295,1
	90	0	0	1	0	1	0	1	1,10		6927,7
	180	0	0	1	0	1	0	1	1,11	1,98	10201,5

TABELA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO CRUZADA - BASALTO

NOME ORIGINAL	TEMPO (DIAS)	CAP 30/45	CAP MOD	4,50%	5%	CAL	ABS. ASFALTO (%)	GRUPO	ABS. ASFALTO CALCULADA (%)	ERRO (%)	ERRO MÉDIO (%)
BMOD-4,5	1	0	0	1	0	0	0,84	GRUPO 1	0,83	0,00	
B57-C	90	0	0	0	1	1	0,69		0,70	-0,01	
B34-4,5	30	0	0	1	0	0	0,98		0,88	0,10	SOMA DE
B57-5,5	180	0	0	0	0	0	0,93		0,99	-0,06	ERROS
B57-C	30	0	0	0	1	1	0,67		0,61	0,06	
B57-4,5	0,1	0	0	1	0	0	0,29		0,77	-0,48	
BMOD-4,5	90	0	0	1	0	0	1,06		0,97	0,10	
BMOD-5	180	0	0	0	1	0	1,03		1,04	-0,02	
BMOD-5,5	1	0	0	0	0	0	0,76		0,79	-0,03	
B34-4,5	90	0	0	1	0	0	1,05		0,97	0,08	-0,68
BMOD-5,5	180	0	0	0	0	0	1,11		1,06	0,05	
B34-4,5	0,1	0	0	1	0	0	0,65		0,83	-0,18	
B57-5	1	0	0	0	1	0	0,54		0,70	-0,16	
B57-5,5	0,1	0	0	0	0	0	0,51		0,72	-0,21	
BMOD-5,5	30	0	0	0	0	0	0,98		0,83	0,15	ERRO MÉDIO
B57-4,5	1	0	0	1	0	0	0,61		0,77	-0,16	
BMOD-5	0,1	0	0	0	1	0	0,67		0,77	-0,10	
B34-4,5	7	0	0	1	0	0	0,87		0,84	0,03	
BMOD-4,5	180	0	0	1	0	0	1,12		1,11	0,02	
B57-C	180	0	0	0	1	1	0,73		0,83	-0,10	
BMOD-C	90	0	0	0	1	1	0,81	0,77	0,04		
B34-5,5	30	0	0	0	0	0	0,99	0,83	0,16	-0,028	
B34-5	30	0	0	0	1	0	0,87	0,82	0,06		
BMOD-5	1	0	0	0	1	0	0,74	0,77	-0,03		
B34-C	30	0	0	0	1	1	0,73	0,70	0,03	SOMA DE	
BMOD-5	7	0	0	0	1	0	0,84	0,79	0,06	ERROS	

B57-4,5	7	0	0	1	0	0	0,79	0,65	0,14	
B34-5,5	7	0	0	0	0	0	0,80	0,83	-0,03	
B57-5,5	30	0	0	0	0	0	0,91	0,71	0,20	
BMOD-C	0,1	0	0	0	1	1	0,60	0,65	-0,05	
B34-5	1	0	0	0	1	0	0,67	0,78	-0,11	
B57-5,5	1	0	0	0	0	0	0,62	0,66	-0,03	
B34-5,5	180	0	0	0	0	0	1,02	1,13	-0,11	
B34-C	0,1	0	0	0	1	1	0,53	0,65	-0,12	0,35
B57-5,5	7	0	0	0	0	0	0,79	0,67	0,12	
B34-4,5	1	0	0	1	0	0	0,73	0,81	-0,07	
BMOD-5,5	0,1	0	0	0	0	0	0,72	0,82	-0,10	
BMOD-4,5	30	0	0	1	0	0	1,03	0,86	0,17	
B57-4,5	180	0	0	1	0	0	0,93	0,95	-0,02	ERRO MÉDIO
B34-5,5	0,1	0	0	0	0	0	0,53	0,82	-0,29	
B57-4,5	30	0	0	1	0	0	0,88	0,69	0,19	
BMOD-5,5	90	0	0	0	0	0	1,04	0,98	0,06	
B34-5,5	90	0	0	0	0	0	0,99	0,98	0,02	
B34-5	7	0	0	0	1	0	0,86	0,79	0,07	
B34-5	180	0	0	0	1	0	1,01	1,09	-0,08	0,015
B57-5	180	0	0	0	1	0	0,93	0,92	0,01	
BMOD-5	30	0	0	0	1	0	0,93	0,83	0,10	
B57-C	7	0	0	0	1	1	0,66	0,50	0,17	
B34-4,5	180	0	0	1	0	0	1,06	1,13	-0,07	
B34-5,5	1	0	0	0	0	0	0,65	0,80	-0,16	
BMOD-5	90	0	0	0	1	0	1,01	0,91	0,10	SOMA DE
BMOD-5,5	7	0	0	0	0	0	0,93	0,81	0,11	ERROS
B34-5	0,1	0	0	0	1	0	0,57	0,76	-0,19	
BMOD-4,5	0,1	0	0	1	0	0	0,71	0,82	-0,11	
B57-5,5	90	0	0	0	0	0	0,91	0,81	0,10	0,13

GRUPO 3

BMOD-C	180	0	0	0	1	1	0,85	0,97	-0,12	
B57-5	0,1	0	0	0	1	0	0,50	0,61	-0,11	
BMOD-C	30	0	0	0	1	1	0,78	0,71	0,07	
BMOD-4,5	7	0	0	1	0	0	0,99	0,83	0,16	
B34-5	90	0	0	0	1	0	0,99	0,91	0,07	
B57-C	0,1	0	0	0	1	1	0,47	0,51	-0,04	
B57-C	1	0	0	0	1	1	0,52	0,51	0,01	
B34-C	1	0	0	0	1	1	0,55	0,66	-0,11	ERRO MÉDIO
B34-C	90	0	0	0	1	1	0,78	0,81	-0,03	
BMOD-C	7	0	0	0	1	1	0,78	0,67	0,11	
B57-5	30	0	0	0	1	0	0,84	0,66	0,18	
B34-C	7	0	0	0	1	1	0,71	0,67	0,04	
B34-C	180	0	0	0	1	1	0,81	0,97	-0,16	
B57-5	7	0	0	0	1	0	0,70	0,62	0,08	0,006
BMOD-C	1	0	0	0	1	1	0,64	0,66	-0,02	
B57-4,5	90	0	0	1	0	0	0,90	0,83	0,07	
B57-5	90	0	0	0	1	0	0,89	0,77	0,12	

TABELA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO CRUZADA - CALCÁRIO

NOME ORIGINAL	TEMPO (DIAS)	CAP 30/45	CAP MOD	4,50%	5%	CAL	ABS. ASFALTO (%)	GRUPO	ABS. ASFALTO CALCULADA (%)	ERRO (%)	ERRO MÉDIO (%)
CMOD-4,5	1	0	1	1	0	0	0,99		1,015131	-0,02	
C57-C	90	0	0	0	1	1	1,00		0,986189	0,02	
C34-4,5	30	1	0	1	0	0	1,01	GRUPO 1	0,974335	0,04	SOMA DE
C57-5,5	180	0	0	0	0	0	1,00		1,074544	-0,07	ERROS
C57-C	30	0	0	0	1	1	0,98		0,931203	0,05	
C57-4,5	0,1	0	0	1	0	0	0,93		0,959957	-0,03	
CMOD-4,5	90	0	1	1	0	0	1,15		1,096694	0,05	-0,26

CMOD-5	180	0	1	0	1	0	1,09	1,191477	-0,10	
CMOD-5,5	1	0	1	0	0	0	0,82	0,964852	-0,15	
C34-4,5	90	1	0	1	0	0	1,01	1,029321	-0,02	
CMOD-5,5	180	0	1	0	0	0	1,17	1,128894	0,04	
C34-4,5	0,1	1	0	1	0	0	0,76	0,946933	-0,19	
C57-5	1	0	0	0	1	0	0,94	0,973085	-0,03	
C57-5,5	0,1	0	0	0	0	0	0,77	0,909677	-0,14	
CMOD-5,5	30	0	1	0	0	0	1,06	0,991428	0,06	ERRO MÉDIO
C57-4,5	1	0	0	1	0	0	1,00	0,960782	0,04	
CMOD-5	0,1	0	1	0	1	0	1,05	1,02661	0,02	
C34-4,5	7	1	0	1	0	0	0,96	0,953257	0,00	
CMOD-4,5	180	0	1	1	0	0	1,14	1,179174	-0,04	
C57-C	180	0	0	0	1	1	1,01	1,068669	-0,06	
CMOD-C	90	0	1	0	1	1	1,11	1,040539	0,07	-0,011
C34-5,5	30	1	0	0	0	0	1,06	0,924055	0,14	
C34-5	30	1	0	0	1	0	1,02	0,986638	0,03	
CMOD-5	1	0	1	0	1	0	1,05	1,027435	0,02	
C34-C	30	1	0	0	1	1	1,00	0,943774	0,06	
CMOD-5	7	0	1	0	1	0	1,05	1,046432	0,01	
C57-4,5	7	0	0	1	0	0	1,06	0,923667	0,13	SOMA DE ERROS
C34-5,5	7	1	0	0	0	0	1,04	0,917164	0,12	
C57-5,5	30	0	0	0	0	0	0,96	0,930273	0,03	
CMOD-C	0,1	0	1	0	1	1	0,88	0,997868	-0,12	
C34-5	1	1	0	0	1	0	0,96	0,961812	0,00	
C57-5,5	1	0	0	0	0	0	0,84	0,905614	-0,07	
C34-5,5	180	1	0	0	0	0	1,05	1,064268	-0,02	-0,23
C34-C	0,1	1	0	0	1	1	0,69	0,918349	-0,23	
C57-5,5	7	0	0	0	0	0	0,93	0,910716	0,02	
C34-4,5	1	1	0	1	0	0	0,92	0,925012	0,00	

GRUPO 2

CMOD-5,5	0,1	0	1	0	0	0	0,60	0,990815	-0,39	
CMOD-4,5	30	0	1	1	0	0	1,14	1,02919	0,11	
C57-4,5	180	0	0	1	0	0	1,06	1,070772	-0,01	ERRO MÉDIO
C34-5,5	0,1	1	0	0	0	0	0,87	0,911296	-0,04	
C57-4,5	30	0	0	1	0	0	1,06	0,943224	0,12	
CMOD-5,5	90	0	1	0	0	0	1,06	1,067259	-0,01	
C34-5,5	90	1	0	0	0	0	1,05	0,98774	0,06	
C34-5	7	1	0	0	1	0	1,01	0,966914	0,04	
C34-5	180	1	0	0	1	0	1,07	1,114018	-0,05	-0,009
C57-5	180	0	0	0	1	0	1,10	1,107571	-0,01	
CMOD-5	30	0	1	0	1	0	1,08	1,06599	0,02	
C57-C	7	0	0	0	1	1	0,89	0,917769	-0,02	
C34-4,5	180	1	0	1	0	0	1,01	1,12083	-0,11	
C34-5,5	1	1	0	0	0	0	1,03	0,88717	0,14	
CMOD-5	90	0	1	0	1	0	1,09	1,09486	0,00	SOMA DE ERROS
CMOD-5,5	7	0	1	0	0	0	1,03	0,940038	0,09	
C34-5	0,1	1	0	0	1	0	0,92	0,966248	-0,05	
CMOD-4,5	0,1	0	1	1	0	0	0,88	1,005868	-0,13	
C57-5,5	90	0	0	0	0	0	1,01	0,967455	0,04	
CMOD-C	180	0	1	0	1	1	1,16	1,097307	0,07	
C57-5	0,1	0	0	0	1	0	0,89	0,966183	-0,08	0,49
CMOD-C	30	0	1	0	1	1	1,10	0,961888	0,14	
CMOD-4,5	7	0	1	1	0	0	1,07	1,012097	0,06	
C34-5	90	1	0	0	1	0	1,03	1,047409	-0,02	
C57-C	0,1	0	0	0	1	1	0,83	0,88738	-0,06	
C57-C	1	0	0	0	1	1	0,86	0,888192	-0,03	
C34-C	1	1	0	0	1	1	0,81	0,888257	-0,08	ERRO MÉDIO
C34-C	90	1	0	0	1	1	1,06	0,968605	0,09	
CMOD-C	7	0	1	0	1	1	1,09	0,941124	0,15	

GRUPO 3

C57-5	30	0	0	0	1	0	1,08	0,993177	0,08	
C34-C	7	1	0	0	1	1	0,88	0,893674	-0,02	
C34-C	180	1	0	0	1	1	1,09	1,049857	0,04	
C57-5	7	0	0	0	1	0	1,02	0,972413	0,05	0,021
CMOD-C	1	0	1	0	1	1	1,00	0,935707	0,06	
C57-4,5	90	0	0	1	0	0	1,06	1,039514	0,02	
C57-5	90	0	0	0	1	0	1,09	1,047345	0,05	

TABELA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO CRUZADA - GRANITO

NOME ORIGINAL	TEMPO (DIAS)	CAP 30/45	CAP MOD	4,50%	5%	CAL	ABS. ASFALTO (%)	GRUPO	ABS. ASFALTO CALCULADA (%)	ERRO (%)	ERRO MÉDIO (%)
GMOD-4,5	1	0	1	1	0	0	0,857		0,868	-0,011	
G57-C	90	0	0	0	1	1	0,967		0,927	0,040	
G34-4,5	30	1	0	1	0	0	0,922		0,844	0,078	SOMA DE ERROS
G57-5,5	180	0	0	0	0	0	0,988		1,143	-0,155	
G57-C	30	0	0	0	1	1	0,938		0,817	0,121	
G57-4,5	0,1	0	0	1	0	0	0,728		0,789	-0,061	
GMOD-4,5	90	0	1	1	0	0	0,949		1,032	-0,083	
GMOD-5	180	0	1	0	1	0	0,982	GRUPO 1	1,200	-0,218	
GMOD-5,5	1	0	1	0	0	0	0,796		0,890	-0,094	-0,579
G34-4,5	90	1	0	1	0	0	1,113		0,955	0,158	
GMOD-5,5	180	0	1	0	0	0	1,116		1,220	-0,104	
G34-4,5	0,1	1	0	1	0	0	0,644		0,789	-0,145	
G57-5	1	0	0	0	1	0	0,757		0,793	-0,036	
G57-5,5	0,1	0	0	0	0	0	0,615		0,812	-0,196	
GMOD-5,5	30	0	1	0	0	0	1,038		0,943	0,094	ERRO MÉDIO
G57-4,5	1	0	0	1	0	0	0,750		0,791	-0,041	
GMOD-5	0,1	0	1	0	1	0	0,774		0,868	-0,095	

G34-4,5	7	1	0	1	0	0	0,888	0,802	0,086	
GMOD-4,5	180	0	1	1	0	0	0,938	1,198	-0,260	
G57-C	180	0	0	0	1	1	0,975	1,093	-0,118	
GMOD-C	90	0	1	0	1	1	1,102	1,004	0,098	
G34-5,5	30	1	0	0	0	0	1,121	0,866	0,254	-0,024
G34-5	30	1	0	0	1	0	0,957	0,846	0,111	
GMOD-5	1	0	1	0	1	0	0,867	0,870	-0,003	
G34-C	30	1	0	0	1	1	1,002	0,910	0,093	
GMOD-5	7	0	1	0	1	0	0,908	0,863	0,045	
G57-4,5	7	0	0	1	0	0	0,824	0,766	0,058	SOMA DE
G34-5,5	7	1	0	0	0	0	0,878	0,881	-0,003	ERROS
G57-5,5	30	0	0	0	0	0	0,908	0,837	0,071	
GMOD-C	0,1	0	1	0	1	1	0,759	0,871	-0,112	
G34-5	1	1	0	0	1	0	0,836	0,850	-0,014	
G57-5,5	1	0	0	0	0	0	0,750	0,796	-0,046	
GMOD-4,5	180	1	0	0	0	0	1,194	1,127	0,067	-0,258
G34-C	0,1	1	0	0	1	1	0,429	0,867	-0,438	
G57-5,5	7	0	0	0	0	0	0,841	0,804	0,037	
G34-4,5	1	1	0	1	0	0	0,766	0,835	-0,069	
GMOD-5,5	0,1	0	1	0	0	0	0,789	0,876	-0,087	
GMOD-4,5	30	0	1	1	0	0	0,905	0,880	0,025	
G57-4,5	180	0	0	1	0	0	1,022	1,013	0,009	ERRO MÉDIO
G34-5,5	0,1	1	0	0	0	0	0,633	0,871	-0,238	
G57-4,5	30	0	0	1	0	0	0,986	0,799	0,186	
GMOD-5,5	90	0	1	0	0	0	1,078	1,004	0,075	
G34-5,5	90	1	0	0	0	0	1,129	0,999	0,130	
G34-5	7	1	0	0	1	0	0,882	0,858	0,024	-0,011
G34-5	180	1	0	0	1	0	1,003	1,105	-0,102	
G57-5	180	0	0	0	1	0	1,050	1,028	0,022	

GRUPO 2

GMOD-5	30	0	1	0	1	0	0,932	0,895	0,036	
G57-C	7	0	0	0	1	1	0,774	0,800	-0,026	
G34-4,5	180	1	0	1	0	0	1,100	1,095	0,005	
G34-5,5	1	1	0	0	0	0	0,755	0,861	-0,106	
GMOD-5	90	0	1	0	1	0	0,955	0,966	-0,011	SOMA DE
GMOD-5,5	7	0	1	0	0	0	0,997	0,874	0,124	ERROS
G34-5	0,1	1	0	0	1	0	0,790	0,829	-0,039	
GMOD-4,5	0,1	0	1	1	0	0	0,834	0,831	0,003	
G57-5,5	90	0	0	0	0	0	0,940	0,940	-0,001	
GMOD-C	180	0	1	0	1	1	1,109	1,086	0,023	
G57-5	0,1	0	0	0	1	0	0,642	0,776	-0,134	0,572
GMOD-C	30	0	1	0	1	1	1,007	0,863	0,144	
GMOD-4,5	7	0	1	1	0	0	0,861	0,841	0,020	
G34-5	90	1	0	0	1	0	0,993	0,963	0,030	
G57-C	0,1	0	0	0	1	1	0,706	0,762	-0,056	
G57-C	1	0	0	0	1	1	0,742	0,763	-0,021	
G34-C	1	1	0	0	1	1	0,684	0,816	-0,133	ERRO MÉDIO
G34-C	90	1	0	0	1	1	1,053	0,948	0,104	
GMOD-C	7	0	1	0	1	1	0,932	0,829	0,103	
G57-5	30	0	0	0	1	0	0,946	0,820	0,126	
G34-C	7	1	0	0	1	1	0,814	0,825	-0,011	
G34-C	180	1	0	0	1	1	1,138	1,082	0,056	
G57-5	7	0	0	0	1	0	0,878	0,786	0,092	0,024
GMOD-C	1	0	1	0	1	1	0,874	0,820	0,054	
G57-4,5	90	0	0	1	0	0	1,002	0,908	0,094	
G57-5	90	0	0	0	1	0	1,014	0,910	0,105	

GRUPO 3

TABELA DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO - BASALTO

	NOME ORIGINAL	TEMPO (DIAS)	CAP 30-45	CAP MOD	CAL	ABS. ASFALTO (%)	RT	RT CALCULADA	ERRO	ERRO (%)	ERRO MÉDIO (%)
CALIBRAÇÃO	B57-5	1	0	0	0	0,54	1,36				
	B57-5	30	0	0	0	0,84	1,42				
	B57-5	180	0	0	0	0,93	1,46				
	B34-5	1	1	0	0	0,67	1,85				
	B34-5	30	1	0	0	0,87	1,85				
	B34-5	180	1	0	0	1,01	1,91				
	BMOD-5	1	0	1	0	0,74	1,82				
	BMOD-5	30	0	1	0	0,93	1,96				
	BMOD-5	180	0	1	0	1,03	2,02				
VALIDAÇÃO	B57-C	1	0	0	1	0,52	1,31				
	B57-C	30	0	0	1	0,67	1,42				
	B57-C	180	0	0	1	0,73	1,44				
	B34-C	1	1	0	1	0,55	1,66	1,79	-0,13	-7,75	SOMA ERRO
	B34-C	30	1	0	1	0,73	1,84	1,84	0,01	0,28	
	B34-C	180	1	0	1	0,81	1,85	1,89	-0,04	-2,26	-17,90
	BMOD-C	1	0	1	1	0,64	1,58	1,86	-0,28	-17,92	ERRO MÉDIO
	BMOD-C	30	0	1	1	0,78	2,00	1,90	0,09	4,74	
	BMOD-C	180	0	1	1	0,85	2,05	1,95	0,10	5,00	-2,98

TABELA DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO - CALCÁRIO

	NOME ORIGINAL	TEMPO (DIAS)	CAP 30-45	CAP MOD	CAL	ABS. ASFALTO (%)	RT	RT CALCULADA	ERRO	ERRO (%)	ERRO MÉDIO (%)
CALIBRAÇÃO	C57-5	1	0	0	0	0,94	1,06				
	C57-5	180	0	0	0	1,10	1,26				
	C34-5	1	1	0	0	0,96	2,00				
	C34-5	30	1	0	0	1,02	2,12				
	CMOD-5	30	0	1	0	1,08	2,14				

VALIDAÇÃO	CMOD-5	180	0	1	0	1,09	2,21					
	C57-C	30	0	0	1	0,98	1,25					
	C34-C	1	1	0	1	0,81	1,87					
	C34-C	30	1	0	1	1,00	2,15					
	C34-C	180	1	0	1	1,09	2,19					
	CMOD-C	1	0	1	1	1,00	1,91					
	CMOD-C	180	0	1	1	1,16	2,05					
	C57-5	30	0	0	0	1,08	1,25	1,27	-0,02	-1,37	SOMA ERRO	
	C34-5	180	1	0	0	1,07	2,16	2,19	-0,03	-1,16		
	CMOD-5	1	0	1	0	1,05	1,96	2,05	-0,09	-4,47	5,20	
	C57-C	1	0	0	1	0,86	1,12	1,02	0,10	9,02	ERRO MÉDIO	
	C57-C	180	0	0	1	1,01	1,29	1,19	0,10	7,71		
	CMOD-C	30	0	1	1	1,10	1,99	2,08	-0,09	-4,53	0,87	

TABELA DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO - GRANITO

	NOME ORIGINAL	TEMPO (DIAS)	CAP 30-45	CAP MOD	CAL	ABS. ASFALTO (%)	RT	RT CALCULADA	ERRO	ERRO (%)	ERRO MÉDIO (%)	
CALIBRAÇÃO	G57-5	1	0	0	0	0,76	1,31					
	G57-5	30	0	0	0	0,95	1,14					
	G34-5	1	1	0	0	0,84	1,78					
	G34-5	180	1	0	0	1,00	2,05					
	GMOD-5	1	0	1	0	0,87	1,72					
	GMOD-5	30	0	1	0	0,93	2,21					
	G57-5	30	0	0	1	0,94	1,21					
	G34-5	180	0	0	1	0,98	1,25					
	G34-5	30	1	0	1	1,00	2,15					
	G34-5	180	1	0	1	1,14	2,21					
	GMOD-5	30	0	1	1	1,01	1,92					
	GMOD-5	180	0	1	1	1,11	1,98					
	VA	G57-5	180	0	0	0	1,05	1,17	1,33	-0,15	-12,85	SOMA ERRO

G34-5	30	1	0	0	0,96	1,99	2,02	-0,03	-1,40	
GMOD-5	180	0	1	0	0,98	2,27	1,97	0,30	13,27	-26,24
G57-5	1	0	0	1	0,74	1,20	1,12	0,08	6,66	
G57-5	1	1	0	1	0,68	1,74	1,85	-0,11	-6,53	ERRO MÉDIO
GMOD-5	1	0	1	1	0,87	1,51	1,89	-0,38	-25,39	-4,37

TABELA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO - MÓDULO DE RESILIÊNCIA - BASALTO

CALIBRAÇÃO	NOME ORIGINAL	TEMPO (DIAS)	CAP 30-45	CAP MOD	CAL	ABS. ASFALTO (%)	MR	MR CALCULADO	ERRO	ERRO (%)	ERRO MÉDIO (%)
		B57-5	1	0	0	0	0,54	5011,4			
	B57-5	7	0	0	0	0,70	5632,5				
	B57-5	90	0	0	0	0,89	7679,0				
	B57-5	180	0	0	0	0,93	9205,2				
	B34-5	7	1	0	0	0,86	11109,7				
	B34-5	30	1	0	0	0,87	4145,9				
	B34-5	180	1	0	0	1,01	6612,0				
	BMOD-5	1	0	1	0	0,74	6642,4				
	BMOD-5	30	0	1	0	0,93	13219,2				
	BMOD-5	90	0	1	0	1,01	18092,3				
	B57-C	1	0	0	1	0,52	7334,8				
	B57-C	7	0	0	1	0,66	7398,2				
	B57-C	90	0	0	1	0,69	6213,6				
	B57-C	180	0	0	1	0,73	13292,6				
	B34-C	7	1	0	1	0,71	19056,5				
	B34-C	30	1	0	1	0,73	5049,6				
	B34-C	180	1	0	1	0,81	5226,8				
	BMOD-C	1	0	1	1	0,64	5233,5				
	BMOD-C	30	0	1	1	0,78	4141,9				
	BMOD-C	90	0	1	1	0,81	6237,8				

VALIDAÇÃO											
	B57-5	30	0	0	0	0,84	5765,6	10364,58	-4599,0	-79,77	
	B34-5	1	1	0	0	0,67	7325,6	5088,087	2237,5	30,54	SOMA ERRO
	B34-5	90	1	0	0	0,99	7821,7	10435,85	-2614,2	-33,42	
	BMOD-5	7	0	1	0	0,84	11160,1	8937,216	2222,9	19,92	
	BMOD-5	180	0	1	0	1,03	14056,4	9617,138	4439,3	31,58	-51,22
	B57-C	30	0	0	1	0,67	6335,9	8858,813	-2522,9	-39,82	
	B34-C	1	1	0	1	0,55	6333,7	4773,775	1559,9	24,63	ERRO MÉDIO
	B34-C	90	1	0	1	0,78	6429,1	8148,792	-1719,7	-26,75	
	BMOD-C	7	0	1	1	0,78	9133,0	9820,497	-687,5	-7,53	
BMOD-C	180	0	1	1	0,85	11502,4	8120,934	3381,5	29,40	-5,10	

TABELA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO - MÓDULO DE RESILIÊNCIA - CALCÁRIO

CALIBRAÇÃO	NOME ORIGINAL	TEMPO (DIAS)	CAP 30-45	CAP MOD	CAL	ABS. ASFALTO (%)	MR	MR CALCULADO	ERRO	ERRO (%)	ERRO MÉDIO (%)
	C57-5	7	0	0	0	1,02	5821,6				
	C57-5	30	0	0	0	1,08	5866,2				
	C57-5	180	0	0	0	1,10	7532,1				
	C34-5	1	1	0	0	0,96	9746,2				
	C34-5	30	1	0	0	1,02	10604,2				
	C34-5	90	1	0	0	1,03	11517,1				
	CMOD-5	1	0	1	0	1,05	6474,0				
	CMOD-5	7	0	1	0	1,05	6581,7				
	CMOD-5	90	0	1	0	1,09	10503,7				
	CMOD-5	180	0	1	0	1,09	12094,3				
	C57-C	7	0	0	1	0,89	7642,4				
	C57-C	30	0	0	1	0,98	5345,7				
	C57-C	180	0	0	1	1,01	8109,4				
	C34-C	1	1	0	1	0,81	11095,9				
	C34-C	30	1	0	1	1,00	11769,1				
	C34-C	90	1	0	1	1,06	12963,9				

VALIDAÇÃO	NOME ORIGINAL	TEMPO (DIAS)	CAP 30-45	CAP MOD	CAL	ABS. ASFALTO (%)	MR	MR CALCULADO	ERRO	ERRO (%)	ERRO MÉDIO (%)
	CMOD-C	1	0	1	1	1,00	7148,5				
	CMOD-C	7	0	1	1	1,09	7241,8				
	CMOD-C	90	0	1	1	1,11	10635,9				
	CMOD-C	180	0	1	1	1,16	12134,3				
	C57-5	1	0	0	0	0,94	5777,0	4971,55	805,45	13,94	
	C57-5	90	0	0	0	1,09	6746,1	6610,49	135,64	2,01	SOMA ERRO
	C34-5	7	1	0	0	1,01	10269,2	10142,66	126,54	1,23	
	C34-5	180	1	0	0	1,07	12098,7	13870,20	-1771,50	-14,64	
	CMOD-5	30	0	1	0	1,08	6689,4	7886,81	-1197,41	-17,90	-22,55
	C57-C	1	0	0	1	0,86	7225,9	5804,33	1421,60	19,67	
	C57-C	90	0	0	1	1,00	6775,1	7468,12	-693,02	-10,23	ERRO MÉDIO
	C34-C	7	1	0	1	0,88	11381,3	11099,77	281,53	2,47	
	C34-C	180	1	0	1	1,09	14035,5	14483,52	-448,02	-3,19	
	CMOD-C	30	0	1	1	1,10	7335,2	8502,98	-1167,83	-15,92	-2,26

TABELA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO - MÓDULO DE RESILIÊNCIA - CALCÁRIO

CALIBRAÇÃO	NOME ORIGINAL	TEMPO (DIAS)	CAP 30-45	CAP MOD	CAL	ABS. ASFALTO (%)	MR	MR CALCULADO	ERRO	ERRO (%)	ERRO MÉDIO (%)
	G57-5	1	0	0	0	0,76	3397,7				
	G57-5	7	0	0	0	0,88	4403,3				
	G57-5	30	0	0	0	0,95	4906,4				
	G57-5	180	0	0	0	1,05	9056,2				
	G34-5	1	1	0	0	0,84	4878,0				
	G34-5	90	1	0	0	0,99	11152,4				
	GMOD-5	1	0	1	0	0,87	4780,3				
	GMOD-5	7	0	1	0	0,91	7005,5				
	GMOD-5	30	0	1	0	0,93	8432,3				
	GMOD-5	180	0	1	0	0,98	14062,2				
	G57-C	1	0	0	1	0,74	3811,0				

VALIDAÇÃO	G57-C	30	0	0	1	0,94	5533,6					
	G57-C	90	0	0	1	0,97	7468,9					
	G57-C	180	0	0	1	0,98	9503,7					
	G34-C	30	1	0	1	1,00	7908,4					
	G34-C	90	1	0	1	1,05	12089,7					
	GMOD-C	7	0	1	1	0,93	5530,3					
	GMOD-C	30	0	1	1	1,01	7295,1					
	GMOD-C	90	0	1	1	1,10	6927,7					
	GMOD-C	180	0	1	1	1,11	10201,5					
	G57-5	90	0	0	0	1,01	7016,1	7064,35	-48,23	-0,69		
	G34-5	7	1	0	0	0,88	7245,4	7545,61	-300,24	-4,14	SOMA ERRO	
	G34-5	30	1	0	0	0,96	7966,0	8365,96	-399,99	-5,02		
	G34-5	180	1	0	0	1,00	13012,4	13560,50	-548,10	-4,21		
	GMOD-5	90	0	1	0	0,95	11467,9	9011,28	2456,65	21,42	-29,69	
	G57-C	7	0	0	1	0,77	3959,6	3816,55	143,00	3,61		
	G34-C	1	1	0	1	0,68	6240,5	6970,53	-730,07	-11,70	ERRO MÉDIO	
	G34-C	7	1	0	1	0,81	6450,9	7223,58	-772,64	-11,98		
G34-C	180	1	0	1	1,14	16245,6	13309,73	2935,87	18,07			
GMOD-C	1	0	1	1	0,87	4155,4	5612,02	-1456,67	-35,06	-2,97		

VALIDAÇÃO	G57-C	30	0	0	1	0,94	5533,6					
	G57-C	90	0	0	1	0,97	7468,9					
	G57-C	180	0	0	1	0,98	9503,7					
	G34-C	30	1	0	1	1,00	7908,4					
	G34-C	90	1	0	1	1,05	12089,7					
	GMOD-C	7	0	1	1	0,93	5530,3					
	GMOD-C	30	0	1	1	1,01	7295,1					
	GMOD-C	90	0	1	1	1,10	6927,7					
	GMOD-C	180	0	1	1	1,11	10201,5					
	G57-5	90	0	0	0	1,01	7016,1	7064,35	-48,23	-0,69		
	G34-5	7	1	0	0	0,88	7245,4	7545,61	-300,24	-4,14	SOMA ERRO	
	G34-5	30	1	0	0	0,96	7966,0	8365,96	-399,99	-5,02		
	G34-5	180	1	0	0	1,00	13012,4	13560,50	-548,10	-4,21		
	GMOD-5	90	0	1	0	0,95	11467,9	9011,28	2456,65	21,42	-29,69	
	G57-C	7	0	0	1	0,77	3959,6	3816,55	143,00	3,61		
	G34-C	1	1	0	1	0,68	6240,5	6970,53	-730,07	-11,70	ERRO MÉDIO	
G34-C	7	1	0	1	0,81	6450,9	7223,58	-772,64	-11,98			
G34-C	180	1	0	1	1,14	16245,6	13309,73	2935,87	18,07			
GMOD-C	1	0	1	1	0,87	4155,4	5612,02	-1456,67	-35,06	-2,97		