

## ANÁLISE DE PARÂMETROS REOLÓGICOS DE RIGIDEZ DE LIGANTES ASFÁLTICOS POR MEIO DO REÔMETRO DE CISALHAMENTO DINÂMICO (DSR)

**Victória N. Ramos**

Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria  
victorianunesramos@hotmail.com

**Andressa A. Oliveira**

Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria  
Andressa.ambros@hotmail.com

**Ketrily K. M. Saraiva**

Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria  
ketrilysaraiva@gmail.com

**Evelyn P. Possebon**

Doutoranda em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria  
evelyn.paniz@gmail.com

**Luciano P. Specht**

Professor do curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria  
luspecht@gmail.com

**Resumo.** *O crescimento da intensidade de tráfego nas rodovias brasileiras tornou patologias como trincas e ondulações cada vez mais comuns. Assim, faz-se necessária a avaliação dos materiais que compõem as misturas asfálticas, destacando-se o ligante asfáltico por sua característica adesiva, permitindo flexibilidade e resistência às misturas. Este trabalho tem como objetivo discutir acerca da reologia dos CAPs e do método de ensaio do Reômetro de Cisalhamento Dinâmico, através de ligantes virgens ou envelhecidos em RTFOT e RTFOT+PAV. A descrição do procedimento de ensaio incluso na metodologia Superpave foi concluída com a obtenção de parâmetros de rigidez, sendo eles módulo de cisalhamento dinâmico,  $|G^*|$ , e ângulo de fase,  $\delta$ . As pesquisas utilizam a geometria de placas paralelas e variáveis de ensaio que forneçam medidas dentro do domínio viscoelástico linear. Por fim, é viável a análise de propriedades reológicas e rigidezes a partir da obtenção de curvas mestras pelo princípio de superposição tempo-temperatura.*

**Palavras-chave:** *Cimentos asfálticos de Petróleo (CAP). Reologia. Reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR).*

### 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de transporte como base sólida para o desenvolvimento econômico e social de um país são elementos cujo estudo detalhado é indispensável, visto que promove o deslocamento de carga e passageiros e a integração de diferentes regiões. No Brasil, o modal rodoviário e a infraestrutura de rodovias é expressivamente dominante, razão pela qual se justifica o esforço no desenvolvimento de materiais e métodos que atendam as demandas do tráfego atual.

O crescimento gradual de manifestações patológicas nas rodovias brasileiras está intimamente ligado às alterações desse sistema de transporte, uma vez que a metodologia de projeto utilizada já não atende às necessidades do principal modal viário do país. A falta de fiscalização, manutenção e novos investimentos traz à tona defeitos como

trincas, fissuras e ondulações, visto que a maior parte da extensão rodoviária foi concebida em uma época cuja intensidade de tráfego era consideravelmente menor. Aliado a esses fatores, cabe ressaltar que o projeto dessas rodovias, elaborado principalmente na década de 1960, já se mostra ultrapassado, dado que não inclui condições como o impacto das variações climáticas, e prevê uma vida útil de no máximo 12 anos.

Por esses motivos, torna-se imprescindível a avaliação dos materiais que compõem e determinam as propriedades das misturas asfálticas utilizadas no revestimento de pavimentos flexíveis. Em especial, destaca-se a investigação do ligante asfáltico, empregado em larga escala no país devido à sua característica adesiva, proporcionando a união dos agregados, flexibilidade controlada, impermeabilidade e resistência à ação da maioria dos ácidos, álcalis e sais.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão da literatura presente neste trabalho abrange aspectos da reologia de ligantes asfálticos, bem como o método de caracterização da rigidez por meio do Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR) inserido na especificação Superpave. Ainda, aborda métodos de envelhecimento de CAPs para a realização do ensaio mencionado.

### 2.1 Reologia de ligantes asfálticos

A reologia é a ciência da mecânica dos materiais que estuda o fluxo e as deformações de um material através da análise de suas respostas à aplicação de tensões ou deformações. Tais deformações são avaliadas considerando a temperatura e o tempo de carregamento, podendo ser classificadas em elásticas (reversíveis), ou irreversíveis, conhecidas como fluxo ou escoamento. Além disso, a suscetibilidade térmica é uma variável

importante na determinação das propriedades físicas de ligantes asfálticos, visto que a temperaturas baixas apresentam-se como sólidos frágeis, com um comportamento elástico e baixas taxas de deformação; ao contrário, em temperaturas elevadas comportam-se como um fluido viscoso, conforme as etapas de usinagem e compactação.

As propriedades reológicas dos CAPs estão divididas em empíricas, como medidas de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade, e propriedades reológicas fundamentais. Essas são fornecidas por ensaios que medem a viscosidade aparente (viscosímetro rotacional), viscosidade cinemática (viscosímetro capilar), módulo complexo, ângulo de fase, módulo de armazenamento, módulo de dissipação e viscosidade complexa (reômetro de cisalhamento dinâmico - DSR), além de rigidez e taxa de relaxação sob baixas temperaturas (reômetro de flexão em viga - BBR).

Os ensaios atuais utilizados na caracterização da rigidez dos ligantes asfálticos têm sido realizados em reômetros de cisalhamento dinâmico, que são capazes de aplicar cargas oscilantes controladas por tensão e deformação em amostras pequenas (Hospodka, M., Hofko, B. e Blab, R.; 2018), de forma que mantenham o comportamento viscoelástico linear dos CAPs. Essa é uma região em que as propriedades reológicas variam pouco com os níveis de tensão e deformação, tornando-se viável a aplicação do princípio de superposição tempo-temperatura. Tal princípio baseia-se na observação de que o comportamento de um ligante asfáltico submetido a altas temperaturas por um curto período de tempo é semelhante à aplicação de temperaturas baixas por um período mais extenso (ou pela redução da frequência de carregamento).

A caracterização reológica dos ligantes asfálticos é realizada por meio de ensaios

dinâmicos de rigidez com regime oscilatório que permitem a obtenção de parâmetros como o módulo de cisalhamento complexo ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ). O  $G^*$  representa a rigidez ou resistência do material à deformação quando submetido a um carregamento, e o  $\delta$  informa a defasagem entre o componente elástico (recuperável), relacionado à energia armazenada a cada ciclo de carregamento, e o componente viscoso (não recuperável), relacionado a energia dissipada, ratificando o comportamento viscoelástico dos CAPs. Em suma, ambos definem o comportamento do ligante na região viscoelástica linear, e são utilizados para calcular critérios relacionados ao desempenho a partir da especificação AASHTO M320 Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder 2017.

## 2.2 Ensaios Superpave

A atual metodologia Superpave (*Superior Performance Pavements*), elaborada a partir do Programa SHRP, fundamenta-se em propriedades reológicas, condições climáticas e de tráfego para o estudo de ligantes asfálticos baseado no Grau de Desempenho (PG – *Performance Grade*) em amplas faixas de temperatura e condições de serviço. Assim, a especificação oferece ensaios que simulam os diferentes estágios da vida do ligante: viscosidade aparente utilizando o equipamento Brookfield (transporte, armazenagem e manuseio); envelhecimento em ensaio de rotação de filme fino em estufa, RTFOT - AASHTO T 240-13 (produção e aplicação da mistura na pista); e envelhecimento em vaso de pressão, PAV - ASTM D6521-13 (após liberação ao tráfego).

A metodologia conta ainda com ensaios de dano (MSCR - *Multiple Stress Creep and Recovery*, ASTM 7405-15, e LAS - *Linear Amplitude Sweep*, AASHTO TP-101-12), e ensaios de rigidez: BBR - *Bending Beam Rheometer*, (AASHTO T313-12 e ASTM

D6648-08), DTT – *Direct Tension Tester* (AASHTO T 314), ambos para baixas temperaturas, e DSR – *Dynamic Shear Rheometer*, para tensões de cisalhamento oscilatórias (AASHTO T315-12 e ASTM D7175-15). Este trabalho tem como objeto de estudo específico o reômetro de cisalhamento dinâmico, e seu funcionamento será descrito nos tópicos subsequentes.

### 2.2.1 Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR)

O Reômetro de Cisalhamento Dinâmico é, atualmente, o principal equipamento utilizado na caracterização de ligantes asfálticos, através do estudo dos comportamentos elástico e viscoso dentro do domínio viscoelástico linear. Também, pode ser empregado para medir as propriedades reológicas do asfalto em temperaturas altas e médias para avaliar a estabilidade térmica do mesmo (LV,S.; WANG, S.; GUO, T.; XIA, C.; LI, J.; HOU, G.; 2018). A análise consiste na obtenção do módulo de cisalhamento complexo ( $G^*$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ ), ambos parâmetros de rigidez, a partir de ligantes virgens, envelhecidos em RTFOT e RTFOT+PAV, submetendo as amostras a condições máximas de temperatura de serviço e taxas de carregamento compatíveis com o tráfego. No entanto, não é um procedimento que abrange a totalidade da caracterização de ligantes asfálticos.

Esse método de teste aplica tensões de cisalhamento oscilatórias em amostras de CAP utilizando a geometria de placas paralelas, podendo ser operado à tensão controlada, empregando um torque constante para obter deformações cisalhantes variáveis, ou à deformação controlada, a partir de torques variáveis que fornecem deformações cisalhantes fixas. Além disso, destina-se a estudar ligantes com módulo de cisalhamento dinâmico entre 100Pa e 10MPa, de 4 a 88°C e

faixa de frequências entre 1 e 160rad/s, limitando-se a CAPs com tamanho máximo de partículas inferior a 250 $\mu$ m.

Outrossim, a execução desse ensaio ainda permite a obtenção da curva mestra que evidencia a variação do comportamento reológico do material com a frequência ou tempo de carregamento em toda a faixa de temperaturas ensaiadas. A execução das curvas mestras é viável a partir da utilização de *shift factors* (fatores de deslocamento) manuais, que transladam os dados de todas as temperaturas até a curva da temperatura de referência escolhida.

### 2.3 Envelhecimento de ligantes asfálticos

As principais manifestações patológicas dos pavimentos são as deformações permanentes, observadas nas trilhas de roda durante os anos iniciais, antes do enrijecimento provocado pelo envelhecimento do ligante, e o trincamento por fadiga, associado às idades mais avançadas do pavimento já submetido às cargas cíclicas do tráfego, ou mesmo ligado a projetos e seleção de materiais inadequados. Com isso, o entendimento dos processos de envelhecimento do CAP é primordial, visto que está diretamente ligado à deterioração do pavimento.

Um ligante asfáltico sofre o envelhecimento durante a fase construtiva e durante a sua vida útil de serviço. Esse envelhecimento é caracterizado pelo endurecimento físico e exsudativo, processos de oxidação e perda de voláteis (HUNTER, SELF e READ, 2015). As alterações físicas, químicas e reológicas do ligante asfáltico causadas pelo envelhecimento em campo podem ser estudadas através de dois ensaios inseridos na metodologia Superpave: a Estufa de Filme Fino Rotativo (RTFOT – *Rolling Thin Film Oven Test*), que simula o efeito do calor e do ar no envelhecimento a curto prazo ocorrido durante a usinagem e transporte do

material, e Vaso de Envelhecimento por Pressão (PAV – *Pressurized Aging Vessel*), que reproduz o envelhecimento a longo prazo durante a vida útil de serviço. O PAV utiliza ligantes envelhecidos em RTFOT nas temperaturas de 90°C, 100°C e 110°C, representando as temperaturas baixas, intermediárias e altas de serviço, respectivamente.

### 3. METODOLOGIA

O reômetro de cisalhamento dinâmico (Fig. 1) é composto por duas placas paralelas cilíndricas fabricadas em aço (Fig. 2), com diâmetros iguais à 8 e 25mm, adequadas a ligantes com rigidezes de 100kPa a 10MPa e 100Pa a 100kPa, respectivamente. Os ensaios são realizados através da oscilação de uma das placas com frequências que variam de forma senoidal entre 0,1 e 30Hz. Segundo Fengler (2018), a análise posterior é feita a partir da frequência de 10rad/s (1,59Hz) simulando uma velocidade de tráfego de aproximadamente 90 km/h. Diferentes amplitudes de deformação rotacional (amplitudes de torque) cisalham a amostra de forma que as medidas não ultrapassem o domínio viscoelástico linear. As placas são afastadas por um *gap* de ensaio predeterminado, medido a partir do ponto em que a distância entre as mesmas é nula (chamado zero *gap*, obtido por meio de calibração).



Figura 1: Reômetro em funcionamento

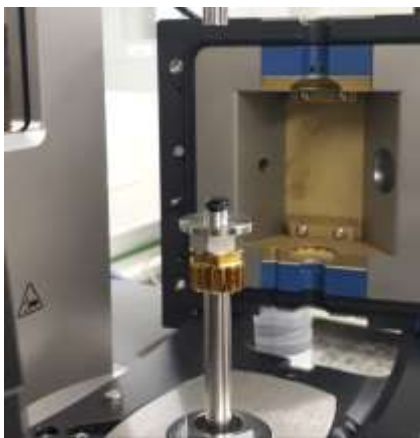


Figura 2: Amostra posicionada entre as placas

As amostras são obtidas após o reaquecimento em estufa do ligante asfáltico a temperaturas inferiores a 163°C, afim de torná-lo fluido e homogêneo, removendo as bolhas de ar e rompendo associações moleculares reversíveis (endurecimento estérico) que se formam em temperatura ambiente. Os moldes utilizados são confeccionados em silicone e não aderem ao ligante (Fig. 3), com dimensões adequadas por norma. As amostras virgens e envelhecidas no RTFOT são ensaiadas em temperaturas entre 5 e 35°C, com geometria de 8mm de diâmetro e *gap* de 2mm de altura, visto que a amostra está mais rígida e a menor área permite a aplicação de tensões mais elevadas. Já a geometria de 25mm é utilizada para ensaios em temperaturas entre 35 e 65°C, com *gap* de 1mm.



Figura 3: Amostras durante a moldagem

Após a moldagem e a acomodação entre as placas, o excesso de ligante deve ser retirado com o auxílio de uma ferramenta própria (Fig. 4), com o objetivo de ajustar a amostra à dimensão das placas. Além disso, é recomendado um período de 10 minutos para o condicionamento na temperatura desejada.



Figura 4: Retirada do excesso de ligante antes do ensaio

A temperatura no interior do reômetro é controlada através da circulação de ar e de uma resistência interna (Detector de Temperatura Interno do DSR), de forma a manter os testes numa faixa de temperaturas entre 5°C e 65°C, variando de  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . O controle da temperatura é essencial para a precisão dos resultados devido à termossensibilidade do CAP. A calibração para a correta aferição da temperatura é feita por um dispositivo posicionado entre as placas a cada três meses.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao final da pesquisa, constata-se que os ensaios no DSR são de fácil realização, além de serem concluídos em apenas um dia. A finalização do estudo das propriedades reológicas dos ligantes asfálticos apresenta-se por meio das curvas mestras de módulo de cisalhamento dinâmico e ângulo de fase, possibilitando a previsão desses parâmetros em ampla faixa de frequências e temperaturas. As figuras 5 e 6 exemplificam os dados obtidos de

$|G^*|$  e  $\delta$  para um CAP genérico na condição envelhecida em RTFOT.

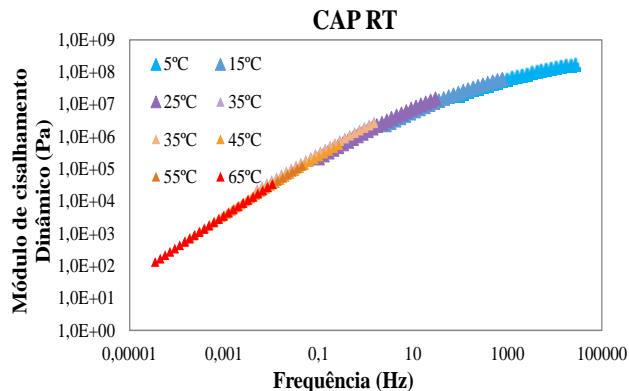


Figura 5: Curva mestra de módulo dinâmico

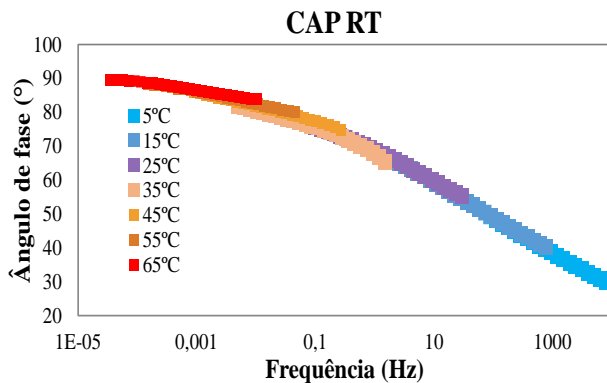


Figura 6: Curva mestra de ângulo de fase

Além disso, é possível confrontar dados adquiridos a partir de ligantes diferentes, tanto virgens quanto envelhecidos. A figura 7 mostra o comparativo das curvas mestras de  $|G^*|$  para um CAP virgem e envelhecido em RTFOT. Nota-se um enrijecimento do ligante quando envelhecido através de valores mais elevados de módulo, principalmente nas baixas frequências (e altas temperaturas, pelo princípio de superposição tempo-temperatura).

### COMPARAÇÃO VG E RT

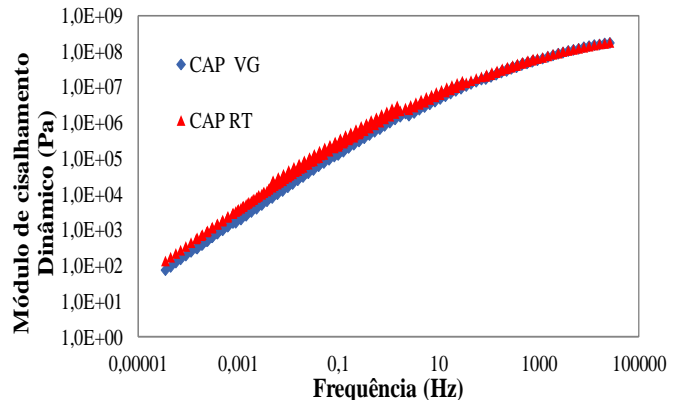


Figura 7: Comparação entre os módulos do ligante virgem e envelhecido em RTFOT

Por fim, são viáveis as comparações entre diferentes ligantes na mesma condição, como mostrado na figura 8. É possível verificar que, quando envelhecidos em RTFOT, o CAP 1 é menos rígido que o CAP 2, visto que possui menores valores de módulo de cisalhamento dinâmico.

### COMPARAÇÃO - CAPs diferentes

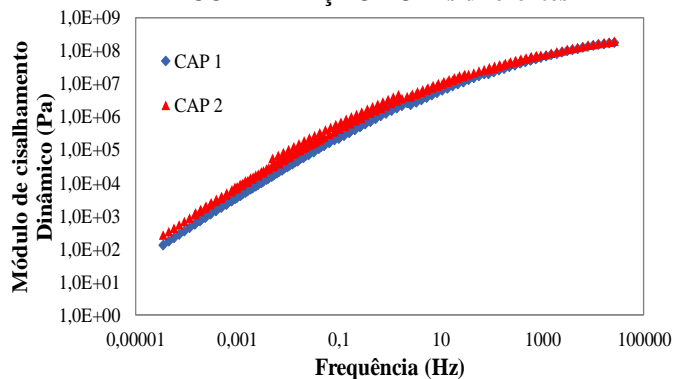


Figura 8: Comparação entre CAPs diferentes

## 5. CONCLUSÃO

O estudo da influência do ligante asfáltico nas misturas utilizadas para revestimento de pavimentos flexíveis tornou-se recorrente no Brasil e no mundo. Assim sendo, fica evidente a importância da utilização do reômetro de cisalhamento dinâmico para a análise reológica de um dos principais constituintes das misturas

asfálticas, uma vez que ensaios posteriores permitirão o conhecimento ainda mais completo de parâmetros de rigidez dos diversos CAPs existentes no país. Esse entendimento, portanto, possibilita a evolução de futuros projetos de rodovias brasileiras, visto que o ligante asfáltico funciona como relevante aliado na resistência e durabilidade dos pavimentos.

### *Agradecimentos*

Ao LMCC (Laboratório de Materiais de Construção Civil - UFSM), em especial ao GEPPASV (Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária), pela viabilização de espaço e equipamentos para a realização dos ensaios. A FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul), CAPES, CNPq e Petrobras/ANP.

## 6. REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO PP 42: **Determination of Low-Temperature Performance Grade (PG) of Asphalt Binders**. Washington, D. C., 2000.

\_\_\_\_\_. AASHTO T 313-12 (R2016). **Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2016.

\_\_\_\_\_. AASHTO T 315. **Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2006.

\_\_\_\_\_. AASHTO TP 101-12 (R2016). **Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2016.

\_\_\_\_\_. AASHTO T 240-13. **Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test)**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 6521-2013. **Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)**. American Society for Testing and Materials.

\_\_\_\_\_. ASTM D 6648-08. **Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)**. American Society for Testing and Materials. ASTM.

\_\_\_\_\_. ASTM D 7175-08. **Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer**. American Society for Testing and Materials. ASTM.

\_\_\_\_\_. ASTM D 7405-10. **Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer**. American Society for Testing and Materials. ASTM.

FAXINA, A. L. **Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo do óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha**. 2006. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil – Departamento de

Transportes): Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos SP, 2006.

FENGLER, R. Z. **Caracterização de ligantes e misturas asfálticas modificados com a adição de trinidad lake asphalt.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – COPPE): Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro RJ, 2018.

HOSPODKA, M., HOFKO, B. E BLAB, R. **Introducing a new specimen shape to assess the fatigue performance of asphalt mastic by dynamic shear rheometer testing.** Mater Struct, 2018.

HUNTER, R. N.; SELF, A.; READ, J. **The Shell Bitumen Handbook.** UK: ICE Publishing, 2015. 119 – 145 p.

LV,S.; WANG, S.; GUO, T.; XIA, C.; LI, J.; HOU, G. **Laboratory Evaluation on Performance of Compound-Modified Asphalt for Rock Asphalt/Styrene-Butadiene Rubber (SBR) and Rock Asphalt/Nano-CaCO<sub>3</sub>.** Applied Sciences, 2018.

MOTHÉ, M. G. **Estudo do comportamento de ligantes asfálticos por reologia de análise térmica.** 2009. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos): Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro RJ, 2009.

POSSEBON, E. P. **Estudo laboratorial das propriedades mecânicas de misturas com diferentes cimentos asfálticos de petróleo produzidos no Brasil.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental): Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria RS, 2018.