

CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE LIGANTES ASFÁLTICOS RECUPERADOS

Bruno Faglioni Rossi
Adalberto Leandro Faxina

Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

RESUMO

Pesquisas apontam divergências entre os níveis de envelhecimento da mistura asfáltica na usinagem e aquele simulado na estufa de filme fino rotativo (RTFO). O objetivo deste trabalho é verificar a eficiência do RTFO em simular o envelhecimento do asfalto durante a usinagem, por meio da comparação de propriedades de ligantes recuperados de misturas asfálticas e dos mesmos ligantes envelhecidos no RTFO. Foi necessário calibrar um método de eliminação do solvente presente nas amostras recuperadas e os resíduos obtidos foram submetidos aos ensaios de viscosidade, MSCR e de monitoramento do módulo complexo e do ângulo de fase para construção de curvas-mestre. Os resultados mostraram que o procedimento padrão do RTFO subestimou o grau de envelhecimento real dos materiais estudados, apontando a necessidade de estudos adicionais para ajustar o procedimento de simulação do envelhecimento a curto prazo, de modo a representar corretamente o nível de envelhecimento ocorrido na usinagem da mistura asfáltica.

ABSTRACT

Researches pointed out some divergences between the aging level of the HMA mix during the mixing process and the one simulated in the rolling thin film oven (RTFO). The objective of this work is to check the efficiency of the RTFO in simulating the short-term aging of the binder by comparing the properties of recovered asphalt binders and the same binders aged in the RTFO. It was necessary to calibrate a method to eliminate the solvent present in the recovered samples, and those residues were submitted to viscosity and MSCR tests as well as frequency sweeps to monitor the complex modulus and the phase angle to build master-curves. The results showed that the standard RTFOT underestimated the real aging degree of the materials, pointing out the need of adjustments on the procedure of simulation of the short-term aging, in order to correctly represent the aging level suffered by the binder during the mixing process.

1. INTRODUÇÃO

O ensaio em estufa de filme fino rotativo (RTFO – *rolling thin film oven*) é um procedimento adotado mundialmente para a simulação do envelhecimento a curto prazo de ligantes asfálticos. Para que o nível de severidade deste condicionamento continue representando fielmente a realidade, o processo de usinagem não poderia se distinguir demasiadamente daqueles praticados à época do desenvolvimento do método. Alternativamente, seria necessário revisar o procedimento, para que ele consiga reproduzir com precisão o nível de envelhecimento que ocorre atualmente nas usinas.

Avanços tecnológicos recentes possibilitaram a criação de equipamentos capazes de separar todos os componentes de uma mistura asfáltica envelhecida durante o processo da usinagem. Tais máquinas extratoras realizam a recuperação do ligante asfáltico por meio de ciclos de lavagens e secagens da massa asfáltica envolvendo solventes, como, p. ex., o percloroetileno. Em vista disso, torna-se necessário calibrar um procedimento de evaporação de solvente em amostras recuperadas para que estas possam, por fim, ser submetidas a ensaios reológicos e ter suas propriedades comparadas as do mesmo ligante envelhecido em laboratório na estufa RTFO.

Este estudo é parte da dissertação de mestrado do primeiro autor, na qual foram comparados os envelhecimentos real após a usinagem e simulado pelo RTFOT para ligantes asfálticos convencionais (não-modificados). Os materiais em estado virgem foram envelhecidos via RTFO e as massas asfálticas usinadas foram submetidas à extração de asfalto por meio da máquina extratora Asphaltanalysator. Neste artigo, serão apresentadas as comparações dos

resultados de ensaios reológicos dos materiais analisados, sendo o objetivo principal desta pesquisa verificar se há equivalência entre o envelhecimento simulado no RTFO e o envelhecimento real após a usinagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O Envelhecimento a Curto Prazo de Ligantes Asfálticos

O envelhecimento de ligantes asfálticos é um fenômeno crucial na determinação da vida de serviço de um pavimento, sendo um dos principais fatores que podem causar sua redução prematura, em virtude dos seus efeitos sobre o comportamento reológico e na composição química do material. Como todo material orgânico, o ligante asfáltico é susceptível à alterações em suas características mecânicas, químicas e microestruturais na presença de oxigênio, água, calor, luz do sol e intempéries. A estas mudanças é dado o nome de *envelhecimento*, caracterizado, em geral, por um endurecimento do material, resultado do aumento da sua viscosidade e da redução da sua flexibilidade. Em consequência, a camada asfáltica se torna mais quebradiça e propensa a trincamentos, sejam estes de origem térmica ou por fadiga, além de problemas como desgaste, desagregação e formação de panelas. Em contrapartida, o envelhecimento reduz a plasticidade do ligante asfáltico, diminuindo a susceptibilidade da mistura asfáltica ao acúmulo de deformações plásticas (LU et al., 2008; LEE et al., 2008; HOU et al., 2018; ZHANG et al., 2018; DURRIEU et al., 2007; NASCIMENTO, 2015; HOFKO et al., 2017; BELL et al., 1994).

De acordo com a especificação Superpave, o envelhecimento é compreendido em duas etapas. A primeira ocorre desde a usinagem até imediatamente antes do início da vida de serviço do pavimento e é chamada de *envelhecimento a curto prazo*. Na usinagem, uma fina camada de ligante asfáltico cobre os agregados minerais em altas temperaturas (acima de 150°C), formando uma área específica considerável e sujeita a oxidação e a volatilização de componentes leves. A segunda etapa ocorre imediatamente a partir do início da vida útil do pavimento, de forma lenta, em que se destaca a oxidação contínua como o seu principal mecanismo, também conhecido como *envelhecimento a longo prazo*, que acompanha toda a vida de serviço da estrutura (LESUEUR, 2009). Ambos os estágios descritos anteriormente são partes do chamado *envelhecimento termo-oxidativo*. A literatura também aponta os efeitos da radiação ultravioleta como mecanismos do envelhecimento *foto-oxidativo* que, apesar de se tratar de um processo já conhecido e estudado, ainda não é levado em conta nos principais processos de simulação laboratorial do envelhecimento a curto e a longo prazos, o que demandaria ajustes nos procedimentos de laboratório para que seus efeitos sejam também representados (NASCIMENTO, 2015; HOFKO et al., 2017; ZHANG et al., 2018; LU et al., 2008).

2.2. O Envelhecimento Termo-oxidativo do Ponto de Vista Químico e Reológico

De um modo geral, o envelhecimento resulta de uma série de eventos complexos envolvendo oxidação a nível molecular e reestruturação a nível intermolecular. Grupos polares contendo oxigênio são formados e estes tendem a se associar com micelas de peso micelar superior, aumentando a viscosidade do ligante asfáltico. Estas mudanças resultam em moléculas mais largas e mais complexas, endurecendo o ligante e comprometendo sua flexibilidade (BELL et al., 1994, READ & WHITEOAK, 2003; FERNÁNDEZ-GÓMEZ, 2011). Em termos de fracionamento SARA, o envelhecimento provoca aumento do teor de asfaltenos e diminuição no teor de aromáticos, que se transformam em resinas e depois em asfaltenos. O resultado destas alterações químicas é a diminuição da penetração e da ductilidade do ligante, ao passo que o ponto de amolecimento e a viscosidade aumentam (BELL et al., 1994; CHEN et al., 2018).

Com o passar dos anos, também foram empregadas novas e sofisticadas técnicas como ferramentas adicionais capazes de fornecer informações importantes a respeito do processo do envelhecimento. Lau et al. (1992) realizou ensaios de espectroscopia de infravermelho por Transformadas de Fourier (FTIR) para verificar a variação na concentração de carbonilas em ligantes asfálticos submetidos ao envelhecimento a longo prazo em câmaras de oxigênio pressurizado (*pressure oxygen vessel* – POV). Chen et al. (2018) utilizou a microscopia de força atômica (*atomic force microscopy* – AFM), capaz de promover um mapeamento topográfico dos componentes do material, identificando propriedades químicas, físicas e mecânicas, para fins de comparação entre ligantes virgens e envelhecidos. Ensaios de cromatografia também poder ser usados para verificar os efeitos do envelhecimento nas frações SARA.

No que se refere à reologia, a especificação Superpave adotou parâmetros viscoelásticos para quantificar os efeitos do envelhecimento, como o aumento no módulo complexo de cisalhamento (G^*) e a diminuição do ângulo de fase (δ) de um ligante que passou pelo processo de envelhecimento. Com base em varreduras de frequência, é possível gerar curvas-mestre que caracterizem as mudanças provocadas pelo envelhecimento de forma mais adequada que ensaios de consistência tradicionais, tais como penetração, ponto de amolecimento e ductilidade (ANDERSON et al., 1994).

2.3. O Ensaio em Estufa de Filme Fino Rotativo

A simulação do envelhecimento a curto prazo de ligantes asfálticos pelo ensaio na estufa de filme fino rotativo é um dos procedimentos laboratoriais mais utilizados no estudo do envelhecimento. Seu procedimento foi adotado pela ASTM em 1970 na norma D2872 (*Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt – rolling thin-film oven test*), e consiste em um condicionamento feito dentro de uma estufa com oito frascos contendo trinta e cinco gramas de ligante asfáltico cada encaixados em uma prateleira vertical rotativa que gira durante 85 minutos à temperatura de 163°C, com injeção de ar quente. O que se almeja é simular os efeitos do calor e da reação do ligante com o oxigênio da atmosfera, promovendo a oxidação e volatilização de componentes leves tal como ocorre desde a usinagem até a compactação da mistura asfáltica *in loco* (SHALABY, 2002). O resíduo resultante do RTFOT pode ser utilizado para ensaios reológicos de propriedades fundamentais e empíricas, a fim de observação e comparação das características do material antes e depois de sofrer os efeitos do envelhecimento.

2.4. Divergências na Literatura entre Envelhecimento Real e a Simulação no RTFO

Apesar de seu procedimento ser amplamente difundido, há estudos que demonstram que o RTFOT pode não representar adequadamente o envelhecimento a curto prazo de um ligante asfáltico. Tais problemas são notados desde as hipóteses teóricas do ensaio até os parâmetros definidos pelo procedimento ASTM D2872. Bell et al. (1994) destacam que ensaios de simulação do envelhecimento desconsideram o efeito aparentemente mitigador dos agregados minerais na mistura asfáltica, fazendo com que as características da amostra envelhecida em laboratório sejam diferentes das reais. Hofko et al. (2017) observam que a temperatura de 163°C do RTFOT não está de acordo com a temperatura padrão de usinagem que é função do teor de ligante da mistura asfáltica. Smesnik et al. (2017) destacam que o RTFOT não leva em conta os diferentes impactos relativos ao tempo de manipulação do material, não sendo recomendado para a simulação de envelhecimento a curto prazo de misturas sujeitas a longos períodos de transporte.

Abdullah et al. (2018) constatou que o procedimento da ASTM D2872 não foi suficiente para simular o envelhecimento real a curto prazo de um ligante asfáltico nas condições climáticas da

Malásia, sendo necessário redefinir a temperatura de ensaio para 170°C e o tempo de ensaio para 135 minutos, de modo a gerar resultados mais realistas na simulação do fenômeno. Jacques et al. (2016) compararam ligantes envelhecidos no RTFOT e ligantes recuperados com tempos variados de estocagem, constatando um grau de envelhecimento inferior no RTFOT em comparação com o envelhecimento real, concluindo que o envelhecimento em campo equivaleria a uma amostra envelhecida no RTFO por 300 min – quase três vezes e meia maior que o tempo normativo. Lu et. al (2008) também constataram em seus estudos que o RTFOT subestimou o envelhecimento real a curto prazo, com o ligante recuperado apresentando nível de envelhecimento maior que o observado para o ligante envelhecido em laboratório.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais e equipamentos

Os ligantes asfálticos utilizados foram dois CAP 50-70 oriundos de trechos experimentais construídos na cidade de Santa Maria, RS, denominados Roraima e Helvio Basso. Foram coletados o ligante virgem e as misturas asfálticas usinadas e no estado solto. Dentre os equipamentos empregados estão o extrator de asfalto modelo Asphaltanalysator 2008 da Infratest, o sistema de destilação modelo 558 da Solotest, a bomba de vácuo modelo 131 da Primatec, a estufa a vácuo modelo MA 030/12 da Marconi, as estufas de filme fino rotativo da Matest e da Infratest, o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) AR 2000ex da TA Instruments, o viscosímetro rotacional DV3T da Brookfield e o espectrofotômetro FTIR Vertex 70 da Brooker.

3.2. Método

3.2.1. O extrator de asfaltos e o delineamento do processo de extração

O extrator de asfaltos modelo Asphaltanalysator faz a lavagem da mistura asfáltica com solvente e fornece separadamente os agregados minerais, o fíler mineral e ligante asfáltico. O processo de separação tem início na câmara de lavagem, que é composta por um cilindro revestido com uma peneira de abertura de 0,075 mm onde a massa asfáltica é revolvida. Esta câmara é submersa em solvente – neste caso, percloroetileno – e o ligante juntamente com o fíler mineral são desprendidos da massa, passando pelo cilindro e sendo levados a uma segunda câmara. Trata-se de uma câmara de centrifuga que contém um cilindro de parede maciça revestido por um papel filtro e que receberá o fíler mineral. Por fim, o ligante asfáltico é liberado para uma canaleta de escoamento, onde pode ser extraído como uma solução de ligante e percloroetileno a ser posteriormente tratada. Este processo pode se dar por vários ciclos, tendo-se em vista que o equipamento dá a opção de número de ciclos de lavagem e secagem. Ao final, todo o solvente utilizado é reciclado dentro do equipamento e as câmaras são limpas e secas a vácuo, bem como o agregado e o fíler mineral podem também ser extraídos, respectivamente, nos recipientes das câmaras de lavagem e de centrifuga.

Inicialmente, foram realizados apenas testes preliminares na máquina extratora, definindo o procedimento padrão de extração de ligante asfáltico de acordo com os seguintes passos: (i) inserção de até 2,5 kg de massa asfáltica no tambor de lavagem e introdução do tambor na câmara de lavagem, bem como do cilindro de centrifuga vazio, revestido com papel filtro, na câmara de centrifuga; (ii) definição de oito ciclos de lavagem e cinco ciclos de secagem no painel de controle do equipamento; (iii) ativação da função “*wash cycle closed*” e fechamento da válvula de controle entre as câmaras de lavagem e de secagem, a fim de concentrar o ligante extraído com o mínimo possível de solvente residual e forçar a mínima retirada possível de solvente limpo da máquina extratora; e (iv) início do procedimento, abertura da válvula de

controle após o primeiro ciclo de lavagem e extração do ligante recuperado através da canaleta de recuperação no máximo até o terceiro ciclo de lavagem; ao final do processo, são disponibilizados também os agregados e o filler mineral para outros estudos.

Este processo levou cerca de uma hora, recuperando 2 litros de uma solução de ligante asfáltico recuperado com percloroetileno residual. No entanto, mesmo seguindo as recomendações, a consistência do material recuperado ainda apontava grande quantidade de percloroetileno na amostra. O primeiro grande desafio passou a ser então o de eliminar completamente os traços de solvente do ligante recuperado no extrator, bem como obter uma forma de comprovar ou evidenciar cientificamente tal processo de eliminação.

3.2.2. ETAPA 1 – Envelhecimento das Amostras para Posterior Adição de Percloroetileno e Calibração do Procedimento de Evaporação de Solvente

Apenas o teste tátil e a observação a olho nu não são suficientes para constatar a eliminação integral do solvente residual incorporado ao asfalto durante o processo de extração. É necessário buscar ferramentas que certifiquem a eliminação total de resíduos por meios quantitativos. A saída encontrada foi adicionar à parte das amostras de ligante asfáltico envelhecidas a curto prazo no RTFO um percentual de 10% em massa de percloroetileno. As amostras com adição de percloroetileno foram submetidas ao seguinte procedimento de evaporação: (i) uma hora no evaporador rotativo a 78 rpm e 150°C com vácuo de 650 mmHg; (ii) duas horas em uma estufa a vácuo a 650 mmHg; e (iii) uma segunda rodada de uma hora no evaporador rotativo a 78 rpm e 150°C com vácuo de 650 mmHg.

Com o procedimento de evaporação concluído, foram realizados ensaios MSCR com réplicas nas temperaturas de 64°C e 70°C para as amostras envelhecidas com e sem adição de percloroetileno, de acordo com a norma ASTM D 7405-15. Os resultados de J_{nr} das amostras envelhecidas com e sem adição de percloroetileno foram comparados para cada asfalto, a fim de verificar se o procedimento de evaporação foi bem sucedido. Caso a variabilidade entre os resultados das amostras envelhecidas com e sem adição de percloroetileno esteja dentro dos limites de repetibilidade estabelecidos pela ASTM 7405-15, considera-se o procedimento de eliminação de solventes calibrado para o ligante estudado. Caso contrário, submete-se a amostra que teve a adição de solvente a horas adicionais na estufa a vácuo e posteriormente a novos ensaios MSCR, até que a variabilidade entre as amostras com e sem adição de percloroetileno não ultrapasse os limites da ASTM.

Além da comparação entre os resultados de MSCR, as amostras com e sem adição de solvente foram também submetidas a ensaios de FTIR no Instituto de Química da UNESP de Araraquara-SP, para verificar a presença de ligações entre as moléculas de carbono e cloro, característica que indica a persistência de vestígios de percloroetileno no ligante asfáltico. A ligação C-Cl pode ser notada por uma distorção ampla do espectro em uma faixa entre 800 e 600 cm^{-1} do número de onda, unidade utilizada em espectrometria que indica o número de ondas em um centímetro. A Figura 1 ilustra a diferença entre os espectros de ligantes com e sem percloroetileno, bem como o espectro do solvente, na faixa de 800 a 600 cm^{-1} .

3.2.3. ETAPA 2 – Recuperação do asfalto e simulações no RTFO em diferentes tempos

Com a confirmação da integral remoção de solvente por meio do método descrito na Etapa 1, foi possível garantir a eliminação integral do percloroetileno residual do ligante recuperado da mistura asfáltica. Tomou-se o cuidado de reproduzir fielmente o processo de evaporação

definido na Etapa 1 para cada material, respeitando os tempos respectivos de exposição no evaporador com bomba de vácuo e na estufa a vácuo.

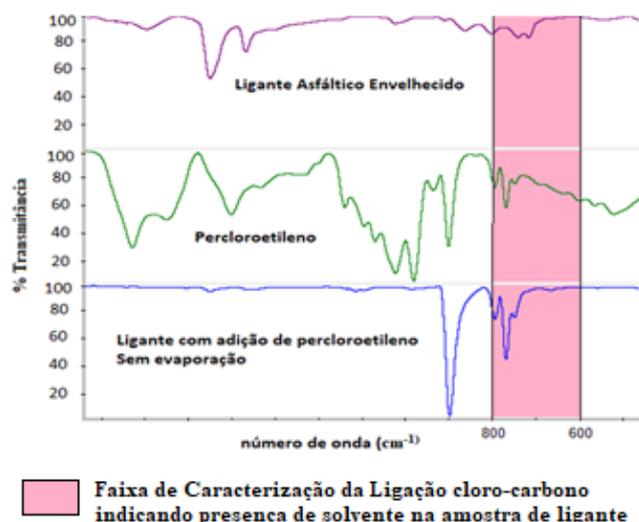


Figura 1: Espectros das amostras com e sem presença de ligação C-Cl

Dos 2,5 kg de massa asfáltica inseridos no extrator, após passar pelo processo de extração e posterior evaporação, recupera-se, em média, 35 gramas de ligante asfáltico isento de solvente. Foram feitas três rodadas para cada massa asfáltica, de modo a obter aproximadamente 100 gramas de ligante ao final do processo de evaporação, garantindo material suficiente para ser usado nos ensaios reológicos. Na sequência, os ligantes asfálticos recuperados na máquina extratora e submetidos ao processo de evaporação foram submetidos aos ensaios de FTIR para garantir a eliminação total dos vestígios de solvente das amostras recuperadas. Foram também envelhecidas amostras no RTFO a 85 (tempo normativo), 105 e 125 minutos, de modo a comparar as amostras envelhecidas com a recuperada e assim estimar o tempo no RTFOT que provocasse um nível de envelhecimento equivalente ao real.

De posse dos materiais envelhecidos em tempos diferentes no RTFOT e do asfalto recuperado no extrator, foram realizadas varreduras de frequência no DSR para construção das curvas-mestre de G^* e δ e realizados os ensaios de viscosidade rotacional e MSCR. Os ensaios de viscosidade seguiram a norma ASTM D4402m-15 e foram realizados nas temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C. O MSCR foi realizado conforme a norma ASTM D7405-15 nas temperaturas de 64°C e 70°C. As temperaturas de 64 e 70°C foram empregadas no MSCR por serem as máximas previstas para pavimentos brasileiros segundo CUNHA et al. (2007). Quanto menor o valor de J_{nr} , mais rígido é o material e, portanto, entre duas amostras de um mesmo ligante asfáltico, o menor valor de J_{nr} indicará o grau de envelhecimento maior entre elas. As varreduras de frequência foram feitas no DSR em conformidade com a norma ASTM D7175-15.

As varreduras de frequência que empregam a geometria de placas paralelas de 25mm de diâmetro e distância entre placas de 1 mm foram realizadas nas temperaturas de 52, 64, 76 e 82°C. Já as varreduras realizadas com a geometria de placas paralelas de 8mm de diâmetro e distância entre placas de 2 mm foram feitas nas temperaturas de 40, 28, 16 e 4°C. A faixa de frequências varrida é de 0,1 a 100 rad/s e as tensões empregadas nos ensaios se enquadram nas faixas de viscoelasticidade linear dos materiais nas temperaturas empregadas. As curvas-mestre de G^* e de delta são apresentadas na temperatura de referência de 25°C e são geradas pelo software TRIOS.

4. RESULTADOS

4.1. ETAPA 1: Calibração do Processo de Evaporação

Foram envelhecidas amostras de CAP 50-70 Roraima e de CAP 50-70 Helvio Basso no RTFO por 85 minutos e, posteriormente, tais amostras foram divididas em duas porções. A primeira, com adição de 10% em massa de percloroetileno, chamada de *amostra 1*, e a segunda, sem adição de solvente, chamada de *amostra 2*. A amostra 1 do CAP 50-70 Roraima permaneceu 1 hora no evaporador rotativo, seguida de 2 horas na estufa a vácuo e mais 1 hora no evaporador rotativo (esquema 1-2-1), totalizando 4 horas. Já a amostra 1 do CAP 50-70 Helvio Basso passou por apenas 1 hora no evaporador rotativo (esquema 1-0-0). O ensaio MSCR foi realizado a 64 e 70°C com as amostras 1 e 2 dos dois asfaltos e seus valores de recuperação percentual resultaram nulos ou muito baixos.

Os valores médios de compliância não-recuperável (J_{nr}) para as amostras Roraima e Helvio Basso são apresentados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente, bem como a variabilidade entre eles e a aceitação ou não do processo de evaporação. Os valores médios de J_{nr} entre as amostras 1 e 2 dos CAPs 50-70 Roraima e Helvio Basso estão dentro dos limites de variabilidade da ASTM, indicando efetividade do processo de evaporação do percloroetileno adicionado à amostra 1. As mesmas amostras foram submetidas ao FTIR e não houve sinais de ligação cloro-carbono entre as faixas de 800 e 600 cm^{-1} . Em virtude de tais resultados, os processos de evaporação para os ligantes 50-70 Roraima e Helvio Basso foram considerados calibrados.

Tabela 1: Comparação entre os valores médios de J_{nr} do CAP 50-70 Roraima – etapa 1

condição	amostra 1	amostra 2	variabilidade (%)	variabilidade admissível*	solvente evaporou?
100 Pa, 64°C	3,35	3,17	5,48	12,80	sim
3.200 Pa a 64°C	3,73	3,48	7,12	16,00	sim
100 Pa e 70°C	7,79	7,46	4,42	12,80	sim
3.200 Pa e 70°C	8,70	8,22	5,71	16,00	sim

*segundo a norma ASTM D 7405-15

Tabela 2: Comparação entre os valores médios de J_{nr} do CAP 50-70 Helvio Basso – etapa 1

condição	amostra 1	amostra 2	variabilidade (%)	variabilidade admissível*	solvente evaporou?
100 Pa, 64°C	1,78	1,66	6,67	12,80	sim
3.200 Pa a 64°C	2,05	1,92	6,73	16,00	sim
100 Pa e 70°C	4,35	4,08	6,37	12,80	sim
3.200 Pa e 70°C	5,02	4,69	6,89	16,00	sim

*segundo a norma ASTM D 7405-15

4.2. ETAPA 2: Propriedades reológicas das amostras recuperadas e das amostras envelhecidas no RTFO em diferentes tempos

As curvas-mestre de G^* e δ dos ligantes envelhecidos em tempos diferentes no RTFO e da amostra recuperada dos CAPs Roraima e Helvio Basso são apresentadas nas Figuras 2 e 3, respectivamente. De modo geral, observa-se que o aumento dos tempos de exposição no RTFOT promove aumento dos valores de G^* e redução dos valores do ângulo de fase, indicando que o aumento do tempo no RTFOT implica em aumento significativo no nível de envelhecimento. No caso do asfalto Roraima, a amostra recuperada apresentou maiores valores de G^* e menores valores de ângulo de fase que as amostras submetidas ao RTFO em tempos

diferentes, indicando que a amostra recuperada sofreu um envelhecimento mais acentuado que o simulado no procedimento padrão do RTFOT (85 minutos). Já no caso do asfalto Helvio Basso, a amostra recuperada apresentou nível de envelhecimento intermediário aos níveis de envelhecimento obtidos nos tempos de 105 e 125 minutos.

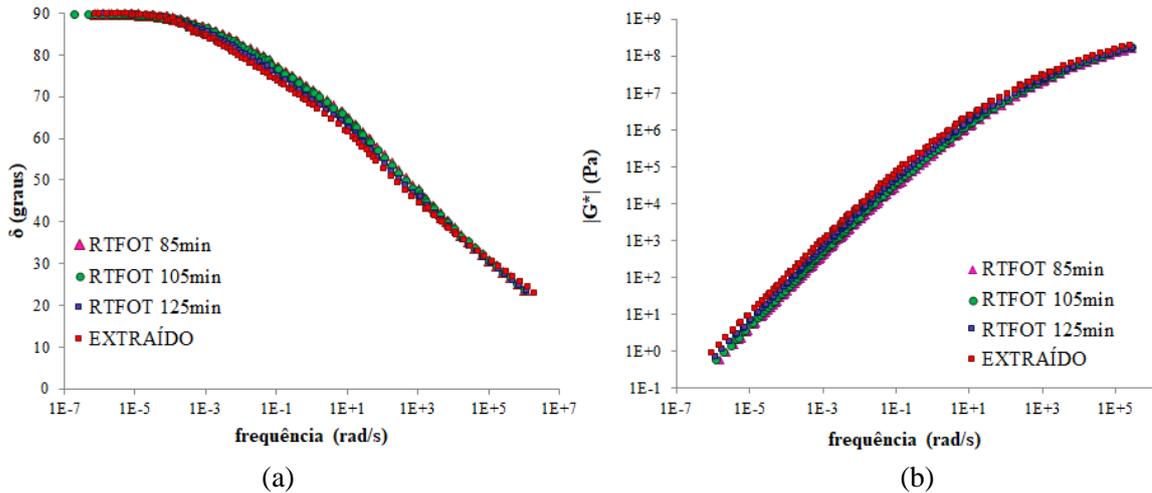


Figura 2: Curvas-mestre: (a) ângulo de fase δ e (b) módulo complexo $|G^*|$ – CAP 50-70 Roraima

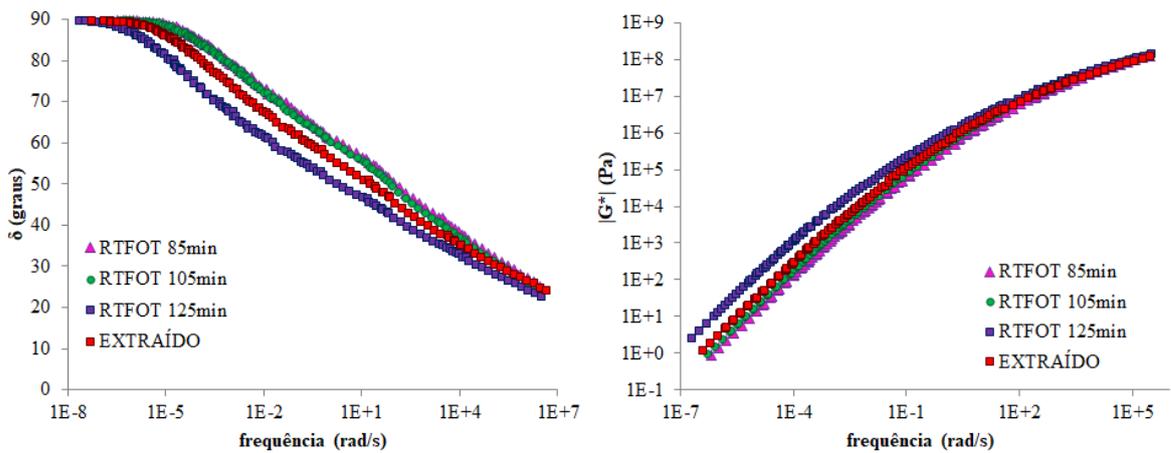


Figura 3: Curvas-mestre: (a) ângulo de fase δ e (b) módulo complexo $|G^*|$ – CAP 50-70 H. Basso

Os valores médios de J_{nr} obtidos para as amostras submetidas ao RTFOT em tempos diferentes e para a amostra recuperada são apresentados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente. Para o ligante Roraima, a amostra recuperada apresentou os menores valores de J_{nr} , indicando que seu envelhecimento é mais acentuado que o das amostras submetidas ao RTFOT. Já a amostra recuperada do ligante Helvio Basso apresentou valores de J_{nr} intermediário aos obtidos para as amostras envelhecidas a 105 a 125 minutos no RTFO. Com base nos valores de J_{nr} , é possível estimar qual seria o tempo equivalente de envelhecimento no RTFO capaz de gerar um nível de envelhecimento semelhante ao sofrido pela amostra usinada. A Tabela 5 mostra os tempos estimados para cada condição do ensaio MSCR, bem como a média aritmética destes tempos. Os graus de envelhecimento das amostras recuperadas dos ligantes Roraima e Helvio Basso são equivalentes, respectivamente, ao efeito de aproximadamente 132 e 112 minutos de simulação no RTFO. Em ambos os casos, o que se verifica é que o procedimento padrão do RTFOT subestimou o nível real de envelhecimento sofrido pelos materiais durante a usinagem.

Tabela 3: Valores médios de J_{nr} do CAP 50-70 Roraima – etapa 2

condição	85 minutos	105 minutos	125 minutos	amostra recuperada
100 Pa, 64°C	2,83	2,64	2,05	2,04
3.200 Pa a 64°C	3,06	2,87	2,22	2,16
100 Pa e 70°C	6,70	6,28	4,98	5,47
3.200 Pa e 70°C	7,34	6,85	5,47	5,17

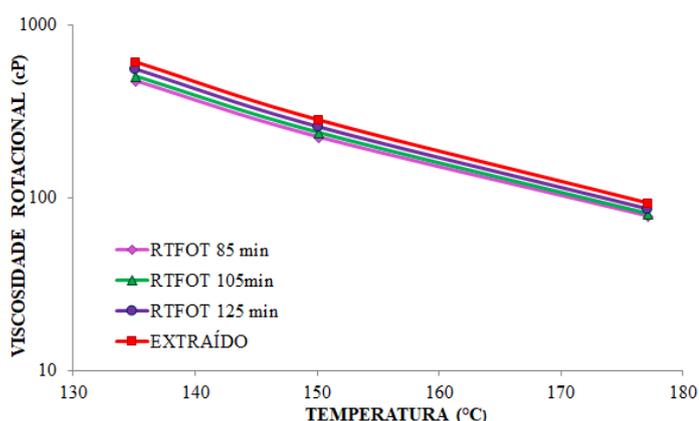
Tabela 4: Valores médios de J_{nr} do CAP 50-70 Helvio Basso – etapa 2

condição	85 minutos	105 minutos	125 minutos	amostra recuperada
100 Pa, 64°C	1,66	1,50	0,53	1,04
3.200 Pa a 64°C	1,92	1,70	0,58	1,15
100 Pa e 70°C	4,08	3,73	1,38	2,62
3.200 Pa e 70°C	4,69	4,25	1,64	2,97

Tabela 5: Tempos de exposição no RTFO necessários para simular o nível de envelhecimento sofrido pelos materiais durante a usinagem com base nos valores de J_{nr}

condição	tempo equivalente no RTFO (minutos)	
	50-70 Roraima	50-70 Helvio Basso
100 Pa, 64°C	128,98	111,17
3.200 Pa a 64°C	131,69	112,45
100 Pa e 70°C	132,90	111,56
3.200 Pa e 70°C	134,58	111,98
tempo médio	132	112

As curvas de viscosidades da amostra recuperada e das amostras envelhecidas por 85, 105 e 125 minutos no RTFO dos ligantes Roraima e Helvio Basso estão apresentadas, respectivamente, nas Figuras 4 e 5. A amostra recuperada do ligante Roraima apresentou valores de viscosidade maiores que os da amostra envelhecida a 125 minutos no RTFO, indicando um envelhecimento equivalente mais severo do que o dos três tempos simulados. Já a amostra recuperada do ligante Helvio Basso apresenta valores de viscosidade entre os das amostras envelhecidas a 105 e 125 minutos, indicando, assim como já visto nos outros ensaios reológicos, um envelhecimento intermediário aos tempos de 105 e 125 minutos.

**Figura 4:** Viscosidade rotacional – CAP 50-70 Roraima

A Tabela 7 apresenta as estimativas de qual seria o tempo de envelhecimento no RTFO capaz de gerar um nível de envelhecimento semelhante ao sofrido pela amostra usinada do ponto de vista dos valores de viscosidade. Os graus de envelhecimento das amostras recuperadas dos

ligantes Roraima e Helvio Basso são equivalentes, respectivamente, ao efeito de aproximadamente 160 e 109 minutos de simulação no RTFO. Em ambos os casos, nota-se que o procedimento padrão do RTFOT subestima o efeito real do envelhecimento sofrido pelos materiais durante a usinagem.

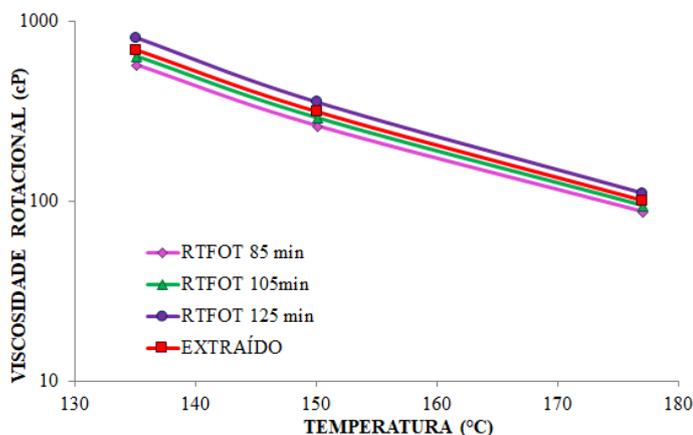


Figura 5: Viscosidade rotacional – CAP 50-70 Helvio Basso

Tabela 7: Tempos de exposição no RTFO necessários para simular o nível de envelhecimento sofrido pelos materiais durante a usinagem – CAP 50-70 Roraima

temperatura	tempos equivalentes no RTFO	
	Roraima	Helvio Basso
135°C	153,90	107,83
150°C	157,44	109,68
177°C	169,25	110,29
tempo médio	160	109

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo quantificar o nível de envelhecimento sofrido pelo ligante asfáltico durante a usinagem da mistura asfáltica, usando para isto o asfalto recuperado, e compará-lo ao envelhecimento simulado em laboratório na estufa de filme rotativo (RTFO). O ligante asfáltico de duas misturas asfálticas foi recuperado e em paralelo os ligantes asfálticos virgens usados na produção destas misturas foram envelhecidos em diferentes tempos na estufa de filme rotativo, de modo a obter um tempo de envelhecimento simulado em laboratório que fosse representativo do envelhecimento real sofrido pelo materiais durante a usinagem.

O envelhecimento sofrido pelos asfaltos recuperados se mostrou mais acentuado que o equivalente a 85 minutos no RTFOT, indicando a necessidade de estudos mais aprofundados para promover possíveis ajustes nos parâmetros de ensaio de simulação do envelhecimento a curto prazo. Tais ajustes serviriam para simular com maior efetividade o envelhecimento real dos asfaltos durante a usinagem. Os tempos de exposição no RTFO das duas amostras analisadas são de 132 e 112 minutos, quando se toma por base os valores de J_{nr} , e de 160 e 109 minutos, quando se toma por base os resultados dos ensaios de viscosidade. Tais resultados também evidenciam como materiais de mesma classe sofrem o efeito do envelhecimento de maneira distinta. É de se supor que outros elementos contribuam para os diferentes níveis de envelhecimento obtidos, tais como o tipo de usina, o tipo de agregado mineral, a composição granulométrica, dentro outros, sendo necessário o desenvolvimento de um estudo mais detalhado também neste tema.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de mestrado ao primeiro autor e à Petróleo Brasileiro S.A. pela concessão do Auxílio à Pesquisa na categoria P&D (processo n. 2012/00181-2).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdullah, N.H.; Hamzah, M.O.; Golchin, B.; Hasan, M.R.M. (2018). An alternative protocol to artificially simulate short-term ageing of binders for selected regional condition. *Construction and Building Materials*. 161, 654-664.
- Anderson, D.A.; Christensen, D.W.; Bahia, H.U.; Dongre, R.; Shara, .G.; Antle, C.E. (1994). Binder characterization and evaluation: physical characterization. *SHRP-A-369, Strategic Highway Research Program, National Research Council*. Washington, D.C. 491 p.
- Bell, C.A.; Sosnovske, D. (1994). Aging: Binder Validation. *SHRP-A-384, Strategic Highway Research Program, National Research Council*. Washington, D.C. 66 p.
- Bell, C.A.; Wieder, A.J.; Fellin, M.J. (1994). Laboratory Aging of Asphalt-Aggregate Mixtures: Field Validation. *SHRP-A-390, Strategic Highway Research Program, National Research Council*. Washington, DC, 142 p.
- Chen, A.; Liu, G.; Zhao, Y.; Li, J.; Pan, Y.; Zhou, J. (2018). Research on the aging and rejuvenation mechanisms of asphalt using atomic force microscopy. *Construction and Building Materials*. 167, 177-184.
- Cunha, M. B.; Zegarra, J. E.; Fernandes Jr, J. L. (2007) Revisão da Seleção do Grau de Desempenho (PG) de Ligantes Asfálticos por Estado no Brasil. *Anais do 21º Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Rio de Janeiro.
- Durrieu, F.; Farcas, F.; Mouillet, V. (2007). The Influence of UV aging of a Styrene/Butadiene/Styrene modified bitumen: Comparison between laboratory and on site aging. *Fuel*. 86, 1446-1451.
- Hofko, B.; Falchetto, A.C.; Grenfell, J.; Huber, L.; Lu, X.; Porot, L.; Poulikakos, L.D.; You, Z. (2017). Effect of short-term ageing temperature on bitumen properties. *Road Materials and Pavement Design*. 18, 108-117.
- Hou, X.; Xiao, F.; Wang, J.; Amirkhani, S. (2018). Identification of asphalt aging characterization by spectrophotometry technique. *Fuel*. 226, 230-239
- Faxina A. L. (2006). *Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha*. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.
- Fernández-Gómez, W.D.; Quintana, H.R.; Lizcano, F.R. (2013). A review of asphalt and asphalt mixture aging. *Ingeniería e Investigación*. Vol. 33, no. 1, p. 5-12.
- Jacques, C.; Daniel, J.S.; Bennert, T.; Reinke, G.; Norouzi, A.H.; Ericson, C.; Mogawer, W. Kim, Y.R. (2016). Effect of silo storage time on the characteristics of virgin and RAP asphalt mixtures. *Transportation Research Record*. 2573, 76-85
- Lee, S.; Amirkhani, S.N.; Shatanawi, K.; Kim, K.W. (2008). Short-term aging characterization of asphalt binders using gel permeation chromatography and selected Superpave binder tests. *Construction and Building Materials*. 22, 2220-2223.
- Lu, X.; Talon, Y.; Redelius, P. (2008). Aging of bituminous binders – Laboratory tests and field data. *The 4th Eurasphalt and Eurobitume Congress*. Copenhagen, 12 p.
- Nascimento, T.C.B. (2015). *Efeito dos envelhecimentos termo-oxidativo e foto-oxidativo sobre propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados*. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 216 p.
- Read, J.; Whiteoak, D. (2003). The Shell Bitumen Handbook. *Shell Bitumen*. Inglaterra, 5a edição.
- Shalaby, A. (2002). Modeling short-term aging of asphalt binders using the rolling thin film oven test. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 29, 135-144.
- Smesnik, M.; Tschernutter, P.; Hofko, B. (2017). Laboratory method to simulate short-term aging of hot mix asphalt in hydraulic engineering. *Construction and Building Materials*. 150, 435-441.
- Zhang, H.; Chen, Z.; Xu, G.; Shi, C. (2018). Evaluation of aging behaviours of asphalt binders through different rheological indices. *Fuel*. 221, 78-88.

Endereço dos autores:

Bruno Faglioni Rossi (bruno.rossi@usp.br)

Adalberto Leandro Faxina (adalberto@usp.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Avenida Trabalhador São-Carlense, 400, Parque Arnold Schmidt, São Carlos, SP, Brasil, 13566-590

Tel.: +55(16)33739613.