

ESTUDO DO ENVELHECIMENTO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS A PARTIR DO MODELO DE ARRHENIUS

Aging study of asphalt binders from Arrhenius model

El envejecimiento de los ligantes asfálticos por medio de modelo de Arrhenius

João Paulo Souza Silva^{*1}, Raíssa Faria de Araújo²

¹Universidade Federal de Goiás - UFG, Departamento de Engenharia de Transportes, Aparecida de Goiânia-GO, Brasil.

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG, Departamento de Engenharia Civil, Uruaçu-GO, Brasil.

*Correspondência: Rua Mucuri, snº, Setor Conde dos Arcos, Curso de Engenharia de Transportes, Aparecida de Goiânia-GO, Brasil. CEP:74.968-755. e-mail jpss@ufg.br.



Revista
Desafios

Artigo Original
Original Article
Artículo Original

Artigo recebido em 27/09/2016. Aprovado em 25/10/2016. Publicado em 04/11/2016.

RESUMO

O fenômeno do “envelhecimento” é responsável por modificar características do ligante asfáltico e da mistura asfáltica, gerando uma redução no ciclo de vida da camada. Diante disso, com a finalidade de minimizar a ação nociva a este fenômeno e garantir o ciclo de vida correta do pavimento, este trabalho traz a simulação de envelhecimento em curto prazo, analisando três características distintas, de acordo com modelo de Arrhenius. A partir dos dados obtidos, foi possível produzir curvas para o controle de qualidade, consideradas importantes ferramentas para controlar o tempo e temperatura durante os ciclos de produção, espalhamento e compactação da mistura de asfáltica. Desta forma, a partir da análise da exposição do CAP 50/70 a várias temperaturas, foi possível determinar qual o seria o tempo máximo de exposição de modo a garantir que suas características físicas e reológicas permanecessem de acordo com os padrões mínimos estabelecidos pelas normas técnicas vigentes.

Palavras-chave: ligantes asfálticos; envelhecimento; Modelo de Arrhenius.

ABSTRACT

The phenomenon of "aging" is responsible for modifying characteristics of the asphalt binder and asphalt mixture, resulting in a decrease in the layer lifecycle. Therefore, in order to minimize the harmful effects of this phenomenon and ensure the correct life cycle of the pavement, this work brings in short-term aging simulation, analyzing three distinct characteristics, according to Arrhenius model. From the data obtained, it was possible to produce curves for quality control, considered important tools to control the time and temperature during production cycles, spreading and compacting the asphalt mixture. Thus, from the analysis of the exposure of the CAP 50/70 at various temperatures, it was possible to determine which would be the maximum exposure time to ensure that their physical and rheological properties remain in accordance with the minimum standards established by technical standards current.

Keywords: Asphalt binders; Aging; Arrhenius model.

RESUMEN

El fenómeno de "envejecimiento" es responsable de la modificación de características de la mezcla de aglutinante de asfalto y el asfalto, lo que resulta en una disminución en el ciclo de vida de capa. Por lo tanto, con el fin de minimizar los efectos nocivos de este fenómeno y garantizar el ciclo de vida correcto del pavimento, este trabajo aporta en la simulación de envejecimiento de corto plazo, el análisis de tres características distintas, según el Modelo de Arrhenius. De los datos obtenidos, era posible producir curvas de control de calidad, considerada herramientas importantes para controlar el tiempo y la temperatura durante los ciclos de producción, difusión y

compactación de la mezcla de asfalto. Por lo tanto, a partir del análisis de la exposición de la PAC 50/70 a diversas temperaturas, fue posible determinar cuál sería el tiempo máximo de exposición para asegurar que sus propiedades físicas y reológicas se mantienen de acuerdo con las normas mínimas establecidas por las normas técnicas vigor.

Palabras clave: *ligantes asfálticos; envejecimiento; Modelo de Arrhenius.*

INTRODUÇÃO

Atualmente o Brasil tem como principal modo de circulação de pessoas e bens o transporte rodoviário, e de acordo com a Confederação Nacional dos Transportes, em pesquisa rodoviária realizada em 2015, esse modal é responsável por mais de 90% do transporte de passageiros e 61% do transporte de cargas. Em busca de crescimento econômico e social no país é necessário preservar e ampliar a malha rodoviária.

Neste sentido, a indústria do asfalto vem se desenvolvendo buscando novos materiais e tecnologias asfálticas a fim de manter esse sistema funcionando, assim como desenvolver novas soluções para o trato e a manutenção desses materiais.

Dessa maneira, visando a um aprofundamento do que já é conhecido sobre a resposta do material asfáltico às intempéries, foi estudado nesta pesquisa um modelo, baseado no Modelo de Arrhenius, capaz de “prever” o comportamento do CAP durante a fase de usinagem. É nessa fase que o CAP começa seu processo de envelhecimento; tal envelhecimento deve ser controlado para que depois de usinado, atenda às especificações mínimas de serviço.

Antes da elaboração do modelo de envelhecimento, foi realizada uma análise das principais características físicas do CAP, verificando se ele atendia às especificações mínimas estabelecidas pela Resolução nº19 da Agência Nacional do Petróleo. Tal caracterização foi utilizada também no estudo comparativo do CAP antes e depois de envelhecido, de onde foi possível tirar conclusões à respeito do modelo final de envelhecimento.

Especificações previstas pela ANP

É sabido que os ligantes asfálticos de quaisquer natureza utilizados em projetos de pavimentação devem atender às especificações mínimas preconizadas pela ANP, conforme Resoluções específicas. De uma forma generalista, os parâmetros a serem seguidos possuem como referências as propriedades físicas dos ligantes, determinadas por meio de ensaios denominados de ensaios de caracterização. Os resultados que deram suporte para o desenvolvimento deste trabalho foram provenientes dos seguintes ensaios, que conforme mencionado, previamente disponibilizados pelo Laboratório de Infraestruturas/UnB.

As Resoluções utilizadas para verificar a conformidade dos ligantes em estudos foram: Resolução N°19 de 11/07/2005, Resolução N°31 de 09/10/2007 e Resolução N°39 de 24/12/2008, sendo estas referentes ao CAP natural, CAP modificado com SBS e CAP modificado com BMP, respectivamente.

O marco inicial da metodologia se deu com a classificação dos ligantes conforme previsto pelas Resoluções, levando em consideração algumas propriedades físicas, tais como: penetração, ponto de amolecimento, recuperação elástica e viscosidade. Logo após, deu-se início a verificação dos mesmos no que tange a adequação frente às especificações mínimas. Para todos os ligantes foram analisadas as propriedades físicas referentes aos estados originais e aos estados após a submissão ao fenômeno do envelhecimento em curto prazo.

A análise dos ligantes em seus estados originais procedeu-se da seguinte maneira: foram calculadas as médias aritméticas dos resultados referentes à penetração e ao ponto de amolecimento e, em seguida, foram comparadas as referidas médias com os valores estabelecidos por cada Resolução. Com relação à viscosidade Brookfield, ao ponto de fulgor, à ductilidade, à recuperação elástica e ao índice de susceptibilidade térmica (IST) foram realizadas comparações diretas entre os resultados e os valores estipulados pelas normas.

Com em relação à análise dos ligantes após o envelhecimento em curto prazo foram determinadas as variações das principais propriedades após sofrerem a ação do calor e do ar na estufa RTFOT, levando em consideração a caracterização inicial e, posteriormente, foram comparadas com as variações admissíveis em normas.

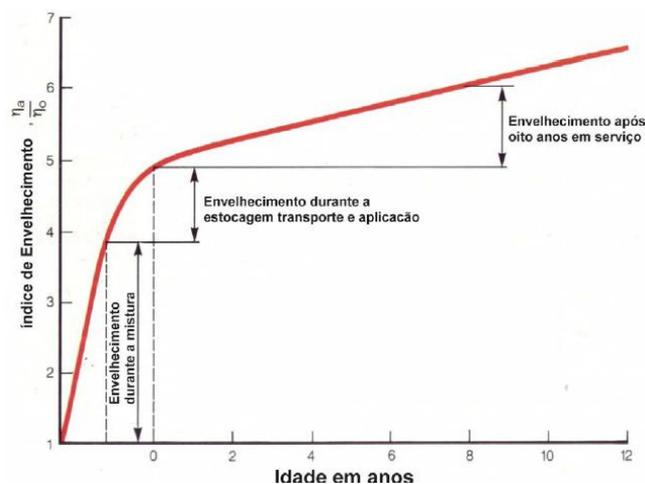
O Envelhecimento dos ligantes asfálticos

De acordo com BELL, WIEDER & FELLIN (1994), citados por MORILHA JUNIOR (2004), o primeiro estudo envolvendo esta temática foi desenvolvido, no ano de 1903, por A. W. Dow em um trabalho intitulado por Asphalt Experiments at Washington, segundo o qual observou que o aquecimento do ligante asfáltico provocava algumas alterações em suas características, tais como: redução do peso (por meio da perda de massa – frações leves) e penetração (que reduz porque o ligante torna-se mais duro). Somente por volta do ano de 1930 é que as pesquisas sobre este assunto se tornaram mais intensas e amplas.

Segundo LAMONTAGNE (2002) e SILVA (2011), o envelhecimento dos ligantes asfálticos pode ser dividido em três etapas: durante a usinagem; durante a estocagem, o espalhamento e a compactação

da mistura asfáltica; e, por fim, durante a vida útil do pavimento. A Figura 1, a seguir, ilustra tais etapas:

Figura 1. Etapas desencadeadoras do fenômeno de envelhecimento dos ligantes



Fonte: Adaptado de WHITEOAK (1990 *apud* MORILHA JUNIOR, 2004).

É possível observar que a fase de usinagem é a responsável, em grande parte, pela redução das propriedades dos ligantes asfálticos; estima-se que nesta fase os ligantes já sofrem 60% do envelhecimento total. A explicação para tal fato remete-se às condições de exposição do ligante para a mistura com o agregado, uma vez que este é submetido a temperaturas muito altas e, ainda, sob a forma de película fina.

Com relação à segunda fase, o envelhecimento é menos severo em comparação à primeira etapa, correspondendo acerca de 20% do envelhecimento total; nesta etapa, a mistura ainda se encontra submetida a temperaturas altas, para que seja aplicado material em campo e devidamente compactado. E por fim, a última etapa referente à vida útil do pavimento, o envelhecimento ainda se manifesta devido à exposição do pavimento à ação das intempéries e do tráfego; assim, esta fase é responsável pelo envelhecimento de 20% em relação ao total (SILVA, 2011).

Ainda segundo o autor, as causas que desencadeiam o envelhecimento dos ligantes são decorrentes: oxidação, endurecimento exsudativo, endurecimento físico e perda de voláteis. Dentre estes, o autor afirma também que a oxidação interfere, em maior grau, no envelhecimento dos ligantes; acontecendo, preponderantemente, na fase de usinagem, mas também em menor escala durante o espalhamento e compactação. Como na fase de usinagem é necessário expor o ligante a temperaturas altas, mantendo-o com uma grande superfície exposta ao ar, há, então, uma reação entre as moléculas do asfalto com o oxigênio.

A partir desta reação química, o ligante torna-se mais viscoso e, conseqüentemente, com propriedades físicas e reológicas já parcialmente comprometidas (GRECO, 2004).

Em termos de impacto, sabe-se que o envelhecimento do ligante asfáltico possui influência direta com relação ao desempenho da mistura asfáltica e por sua vez, no pavimento, podendo ser o responsável pela redução de sua vida útil.

Dentre as principais propriedades físicas modificadas pela ocorrência deste fenômeno, SILVA (2011) cita o aumento da consistência do ligante, associado a um aumento da viscosidade; além disso, tem-se um aumento do ponto de amolecimento e uma diminuição com relação à penetração. Ainda são perceptíveis as modificações com relação à reologia, já que o aumento da consistência torna o ligante mais duro e mais suscetível ao trincamento das misturas asfálticas, conforme observado na Figura 2, além de torná-lo menos elástico.

Figura 2. Revestimento asfáltico envelhecido.



Atualmente, como forma de aprimorar os estudos referentes ao envelhecimento do ligante asfáltico, foram desenvolvidos alguns ensaios que simulam a ocorrência de tal fenômeno desde a produção da mistura até a vida útil do pavimento, tais como: *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT) e *Pressure Aging Vessel* (PAV). A realização sequencial destes ensaios (RTFOT+PAV) é denominada de simulação clássica de envelhecimento e tem sido amplamente utilizada pela literatura, visto que esta é capaz de simular o envelhecimento dos ligantes de forma bastante verossímil (SILVA, 2005).

De acordo com BERNUCCI *et al.* (2008), o ensaio RTFOT simula o envelhecimento dos ligantes durante as fases de usinagem (60% do envelhecimento total), espalhamento e compactação da mistura (20% do envelhecimento total), uma vez que este promove o envelhecimento por meio de dois mecanismos básicos, tais como: oxidação e evaporação; sendo estes similares aos que acontecem durante as referidas fases.

Já o teste PAV é capaz de simular o envelhecimento do ligante ao longo da vida útil do pavimento (20% finais), levando em consideração a ação combinada do tráfego de veículos e os efeitos das intempéries a que o revestimento está sujeito. Para

MORILHA JUNIOR (2004), este ensaio pode simular tempos de serviço de até 15 anos.

MATERIAIS E MÉTODOS

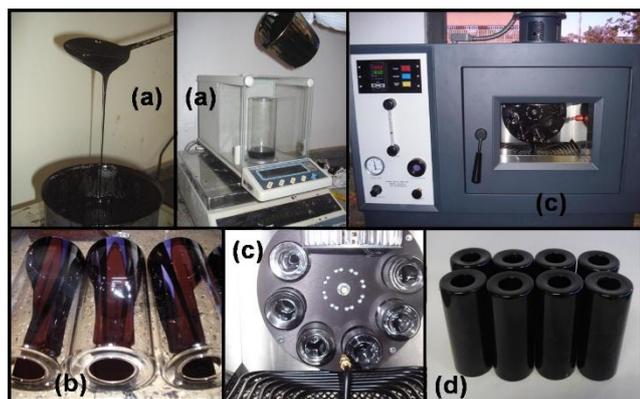
Para alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa, foram realizados procedimentos experimentais com finalidade de se caracterizar o ligante asfáltico, conhecidos como: a penetração, ductilidade, recuperação elástica, o ponto de amolecimento e medidas de viscosidades.

Todos os experimentos foram executados na Universidade de Brasília, cujos dados foram disponibilizados por SILVA (2011), analisados sistematicamente durante o Trabalho de conclusão de curso de ARAÚJO (2015) no curso de Engenharia Civil – UFT.

Para simulação do envelhecimento em curto prazo, foi realizado ensaio com uma estufa do tipo RTFOT, ilustrado na Figura 3.

O envelhecimento em longo prazo, comumente realizado na estufa PAV, foi realizado por meio de extrapolação baseado no modelo de Arrhenius, utilizando também a estufa RTFOT com finalidade de verificar qual o tempo máximo ao qual o ligante poderia ser exposto à temperatura e oxigênio antes de sua aplicação em campo.

Figura 3. Ensaio de RTFOT: (a) Preparação da amostra; (b) amostras em repouso; (c) execução do ensaio; (d) amostras após ensaio.



O estudo do envelhecimento foi embasado por um método, denominado de Modelo de Arrhenius, uma vez que este possibilita a extrapolação de dados de curto prazo para a previsão do comportamento não só dos ligantes asfálticos em outras temperaturas, mas qualquer material submetido à processos de exposição à temperatura-tempo pré-estabelecidos.

A razão que justifica a aplicação do referido método deve-se à sua capacidade de provocar a degradação acelerada dos ligantes por meio de altas temperaturas de incubação, no intuito primordial de se extrapolar os dados obtidos e, assim, simular a temperatura de campo; para isto, o modelo baseia-se na superposição tempo-temperatura.

Todavia, para o emprego do Modelo de Arrhenius, é necessário que se tenha feito, primeiramente, a caracterização inicial dos ligantes, levando em consideração as Resoluções já mencionadas anteriormente, para que possam ser obtidos parâmetros iniciais que serão utilizados como base de comparações futuras. Em seguida, espera-se que os ligantes tenham sido submetidos à estufa RTFOT para o envelhecimento em três temperaturas distintas, sendo estas: 100°C, 135°C e 163°C; e ainda, que as amostras tenham sido incubadas em intervalos de tempos predefinidos, como por exemplo: 1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64 horas. Por fim, é imprescindível que se tenha realizado alguns ensaios para a caracterização dos ligantes após o envelhecimento em curto prazo.

As razões destas exigências são frutos do próprio Modelo de Arrhenius. O método requer uma caracterização inicial dos ligantes, por meio dos ensaios, no intuito de conhecer as suas principais propriedades antes do envelhecimento, já que estas servirão de parâmetros para a parada do ensaio, uma vez que, após a submissão à estufa RTFOT tais propriedades sofrerão variações. Com relação à

escolha das temperaturas de incubação, estas foram definidas com base na temperatura de produção da mistura, que gira em torno de 160°C.

Assim, pode-se garantir que as temperaturas a serem utilizadas garantem uma boa representação para o modelo, visto que estas se aproximam daquela utilizada na produção das misturas. Já em relação à consideração dos intervalos de tempo, o modelo estabelece que estes obedeçam, preferencialmente, uma escala logarítmica.

Construção do Modelo de Envelhecimento dos ligantes asfálticos

De posse de todos os dados, foi possível aplicar o Modelo de Arrhenius no estudo do envelhecimento dos ligantes asfálticos. Para fundamentar esta pesquisa foi necessário, a priori, plotar gráficos de dispersão, sendo estes referentes às propriedades utilizadas como parâmetros para o envelhecimento e aos tempos de incubação das amostras. É importante frisar que foram plotados gráficos para as principais propriedades físicas afetadas pela ocorrência do fenômeno, sendo estas: penetração, ponto de amolecimento e viscosidade; além do mais, para as três temperaturas utilizadas para representar o modelo, com objetivo de

A construção dos gráficos supracitados teve como objetivo facilitar a visualização com relação às mudanças das propriedades sofridas em decorrência do envelhecimento, tornando-se mais fácil a identificação tanto de uma determinada propriedade quando esta atingisse seu valor-limite preestabelecido, quanto do tempo necessário para este alcance.

Todavia, para auxiliar a visualização do nível de degradação das propriedades até valores considerados como máximos, foi necessário estabelecer alguns parâmetros que, por sua vez, foram

baseados em Resoluções específicas e em valores estipulados pela literatura, conforme determina KOERNER *et al.* (1992 in SILVA, 2011). A seguir, a Tabela 1 demonstra as principais propriedades analisadas e os seus respectivos valores-limites utilizados, sendo estes últimos variáveis conforme o tipo de ligante:

Tabela 1. Valores-limites utilizados como critérios de parada

Propriedade	Valor-limite		
	CAP 50/70 puro	CAP Modificado com SBS	CAP Modificado com BMP
Redução da Penetração (%)	55	60	55
Aumento do Ponto de Amolecimento (°C)	8	6	10
Aumento da Viscosidade (%)	50	50	50

Em seguida, para cada gráfico foi adicionado uma linha de tendência contendo a equação representativa e o valor de coeficiente de determinação R², designado também por coeficiente de correlação de Pearson.

Após a execução de todos os cálculos semelhantes ao que foi exposto acima, foram confeccionadas tabelas; sendo cada uma referente a um ligante em específico, segundo a qual continha dados referentes às temperaturas e aos tempos necessários para o alcance de todos os valores-limites.

Assim, de posse dos tempos de reação para uma determinada propriedade e de suas respectivas temperaturas foram plotados os gráficos que representam o Modelo de Arrhenius. Os dados alimentados no eixo das ordenadas foram referentes ao logaritmo natural de 1/t (razão de reação ou inverso do tempo de reação, dado em minutos), enquanto que

no eixo das abscissas foram $1/T$ (inverso da temperatura, dada em Kelvin).

Para a obtenção das constantes “Eact” e “A” foi necessário fazer um ajuste linear por meio da adição de uma linha de tendência do tipo linear, uma vez que a equação do modelo se assemelha com a equação do primeiro grau, representada por uma reta; então, os valores referentes “(-Eact/R)” e “Ln A” representaram, respectivamente, os coeficientes angulares e lineares da reta como demonstrado logo abaixo:

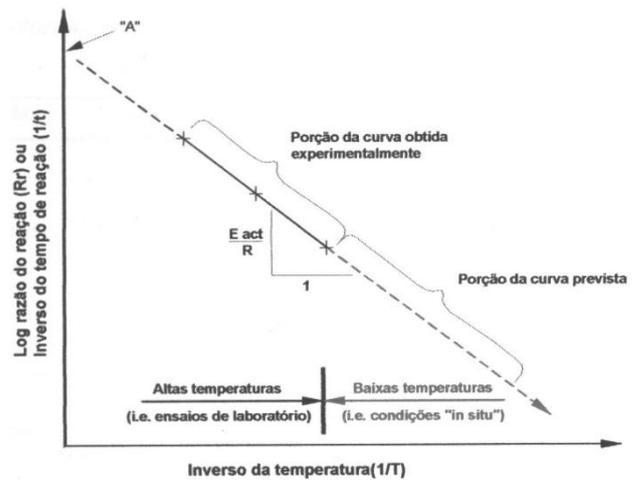
$$\ln R_r = -\frac{E_{act}}{R \cdot T} + \ln(A) \rightarrow y = a \cdot x + b \quad (1)$$

Onde: Ln = Logaritmo natural; t = tempos de reação, em min⁻¹; Eact = Energia de ativação aparente (J/mol); R = Constante universal dos gases perfeitos (8,314 J/mol K) ; T = Temperatura Absoluta (°K); A = Fator pré-exponencial (min⁻¹)

Portanto, para a determinação exata de seus valores bastou-se multiplicar o coeficiente angular da reta pela constante universal dos gases, além disso, aplicar a função exponencial no coeficiente linear da reta, obtendo, respectivamente, as constantes “Eact (J/mol)” e “A (1/min)”.

As propriedades foram testadas em intervalos de tempo com uma escala logarítmica até que o estabelecimento de um valor limite para a propriedade fosse atingido, para todas as temperaturas utilizadas. De posse dos tempos de reação (t1, t2, t3) correspondentes às temperaturas (T1, T2, T3), foram plotados gráficos como o ilustrado na Figura 4. **Fonte de referência não encontrada.**, obtendo-se as constantes do modelo.

Figura 4. Obtenção das constantes do modelo de Arrhenius (Colmanetti, 2006)



Entretanto, KOERNER *et al.* (1992) explicam que o método considera a possibilidade das reações químicas a elevadas temperaturas não serem as mesmas a baixas temperaturas, sendo necessário limitar a extrapolação a 40°C abaixo da menor temperatura de incubação em laboratório.

Assim, por meio da extrapolação dos dados, foi possível determinar a curva Temperatura versus tempo de usinagem, com finalidade de controlar a degradação das características de ponto de amolecimento, penetração e viscosidade, propriedades vistas como as mais úteis na classificação dos ligantes estudados.

É importante ressaltar que, para cada tipo de ligante em estudo, foram confeccionados três modelos, sendo estes referentes a cada propriedade (penetração, ponto de amolecimento e viscosidade). Como a presente pesquisa trabalha com três tipos de ligantes distintos, então, ao total foram gerados 9 modelos; sendo todos similares ao gráfico apresentado na Figura 4.

Concomitantemente à linha de tendência, também foi adicionado o coeficiente de determinação R², sendo considerado um parâmetro de soma

importância capaz de classificar o desempenho do Modelo de Arrhenius, já que este se refere a uma medida do grau de relação entre os dados analisados.

Como todos os modelos apresentaram valores de R² maiores que 0,80 consequentemente, estes se mostraram em condições satisfatórias, dando o suporte necessário para embasar outras conclusões relevantes acerca do comportamento dos ligantes asfálticos durante as fases de usinagem, espalhamento e compactação da mistura asfáltica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como os ensaios de caracterização dos ligantes já foram previamente realizados pelo Laboratório de Infraestruturas da UnB, a presente pesquisa tratou de verificar se os materiais em estudo se encontravam, de fato, em conformidade com as especificações previstas em Resoluções pela ANP.

Os resultados verificados foram oriundos dos ensaios tradicionais de caracterização e do ensaio que simula o envelhecimento em curto prazo, que demonstraram valores condizente com as especificações mínimas previstas pela ANP, podendo

então afirmar que os referidos ligantes se encontram aptos para comporem misturas asfálticas e, consequentemente, serem utilizados nos serviços de pavimentação.

Modelo de Envelhecimento obtido

A caracterização dos ligantes analisados após a incubação é o estudo do envelhecimento propriamente dito. Como esperado, o aquecimento em estufa RTFOT modificou as propriedades dos ligantes causado pela perda de voláteis e oxidação sofrida. Houve ainda aumento da consistência e aumento da temperatura de amolecimento, menor ductilidade e menor recuperação elástica do que inicialmente.

Dessa forma, os resultados obtidos realmente simularam o comportamento dos ligantes quando utilizados em obras em campo, que sofre desgaste devido ao aquecimento à altas temperaturas, como na usina, no transporte e na compactação, fatores que implicam em menor vida útil do material. Nas Tabelas 2, 3 e 4, são mostrados os tempos limites encontrados, algumas vezes por interpolação linear.

Tabela 2. Tempos limites verificados durante o envelhecimento do CAP natural (ARAÚJO, 2015)

Temperatura (°C)	Tempos necessários para alcançar o valor limite preestabelecido (h)		
	Penetração	Ponto de Amolecimento	Viscosidade
100	Limite adotado:	$\frac{36,905}{45,338}$	$\frac{35,519}{577,5 \text{ cP}}$
135	30,25 décimos de	$\frac{4,555}{3,548}$	$\frac{7,991}{577,5 \text{ cP}}$
163	milímetro	$\frac{3,964}{3,607}$	$\frac{5,738}{577,5 \text{ cP}}$

Tabela 3. Tempos limites verificados durante o envelhecimento do CAP Modificado com SBS (ARAÚJO, 2015)

Temperatura (°C)	Tempos necessários para alcançar o valor limite preestabelecido (h)		
	Penetração	Ponto de Amolecimento	Viscosidade
100	Limite adotado:	$\frac{42,726}{81,158}$	$\frac{46,672}{1860 \text{ cP}}$
135	29,22 décimos	$\frac{6,470}{13,111}$	$\frac{6,765}{1860 \text{ cP}}$
163	de milímetro	$\frac{2,811}{4,006}$	$\frac{2,066}{1860 \text{ cP}}$

Tabela 4. Tempos limites verificados durante o envelhecimento do CAP Modificado com BMP (ARAÚJO, 2015)

Temperatura (°C)	Tempos necessários para alcançar o valor limite preestabelecido (h)					
	Penetração		Ponto de Amolecimento		Viscosidade	
100	Limite adotado:	$\frac{152,377}{24,97}$	Limite adotado:	$\frac{129,946}{62,5}$	Limite adotado:	$\frac{16,475}{1384,5}$
135	décimos de milímetro	39,316	62,5°C	16,174	1384,5 cP	0,942
163		4,278		3,757		0,541

A partir dos tempos limites e de suas respectivas temperaturas de incubação expostos acima, tornou-se possível a aplicação do Modelo de Arrhenius para cada propriedade dos ligantes em estudo. No total, foram obtidos nove modelos, uma vez que para cada ligante foram construídos modelos para três principais propriedades físicas que sofrem influência direta frente ao envelhecimento.

Após adicionar linhas de tendência do tipo linear juntamente com as equações características

tornou-se possível a determinação das constantes pertencentes a cada modelo “A” e “Eact”, uma vez que os valores referentes “(-Eact/R)” e “Ln A” são correspondentes, respectivamente, aos coeficientes angulares e lineares das referidas equações. Na Tabela 5 são exibidos os valores das constantes que, por sua vez, subsidiaram a construção das curvas de controle de qualidade.

Tabela 5. Constantes pertencentes ao Modelo de Envelhecimento (ARAÚJO, 2015)

Propriedade	"Eact" (J/mol)			"A" (1/min)		
	CAP Natural	CAP+SBS	CAP+BMP	CAP Natural	CAP+SBS	CAP+BMP
Penetração	-49953,84	-59168,24	-74705,45	5457,25	80498,99	2556117,34
Ponto de Amolecimento	-57136,30	-64715,34	-76053,15	48436,07	237755,95	5654713,48
Viscosidade	-40238,93	-67171,3	-75581,74	224,89	923568,27	48158104,51

ARAÚJO (2015) menciona ainda que todos os modelos de envelhecimento confeccionados se mostraram em condições satisfatórias e passíveis de fundamentar outras conclusões no tange o comportamento dos ligantes durante a usinagem e a aplicação da mistura asfáltica, visto que todos os coeficientes de correlação de Pearson apresentaram valores maiores que 0,80.

Assim, é possível, segundo o próprio método, inferir o nível de degradação que cada característica do ligante irá sofrer quando submetidos à temperaturas de até 40°C acima e abaixo daquelas testadas experimentalmente, ou seja, entre 60°C e 203°C.

Aplicação das curvas de temperatura de exposição versus tempo para o controle de qualidade das misturas asfálticas

Com o intuito de atenuar os efeitos do envelhecimento sob os ligantes asfálticos durante as fases de usinagem, espalhamento e compactação da mistura, responsável por 80% do envelhecimento total do ligante asfáltico, a pesquisa em questão tratou de confeccionar curvas do tipo temperatura de exposição versus tempo para auxiliar o controle de qualidade das misturas asfálticas, ou seja, determinação de temperaturas e tempos máximos de

aquecimento do ligante sem o que mesmo atinja o limite de 80% de envelhecimento. Para isto, foram utilizados os modelos de envelhecimento, também designados por modelos de Arrhenius, visto que estes possuem como variáveis os fatores que influenciam diretamente no envelhecimento, sendo estes: a temperatura de exposição e o tempo.

A priori, foi necessário extrapolar as temperaturas em 40°C acima e abaixo dos valores utilizados durante a incubação das amostras na estufa RTFOT, para, então, aplicá-las nas equações características de cada modelo de envelhecimento e, assim, obter os tempos máximos de exposição às referidas temperaturas, já mencionadas anteriormente.

Diante das informações obtidas, foi possível construir as curvas do tipo temperatura de exposição versus tempo para cada ligante. É importante destacar que nem todas as temperaturas extrapoladas foram utilizadas para compor as referidas curvas, visto que algumas não se mostraram condizentes com aquelas comumente utilizadas pelas usinas. Assim, com o intuito de se obter resultados verossímeis, foram utilizadas temperaturas pertencentes às faixas de 100 a 180°C. Nas Figuras 5,6 e 7 estão ilustradas as curvas conforme o tipo de ligante.

Figura 5 – Curva temperatura de exposição versus tempo para o CAP Natural 50/70 (ARAÚJO, 2015)

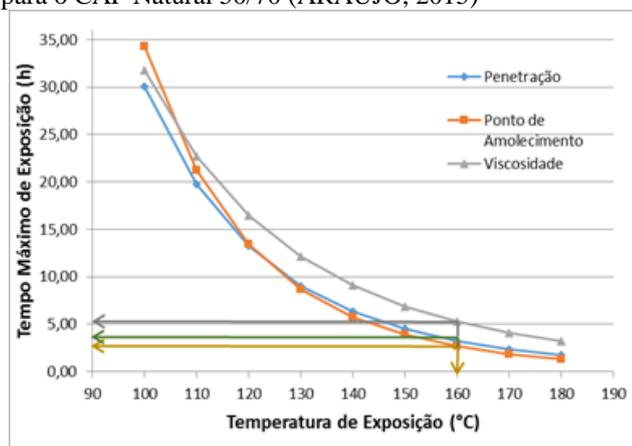


Figura 6 – Curva temperatura de exposição versus tempo para o CAP Modificado com SBS (ARAÚJO, 2015)

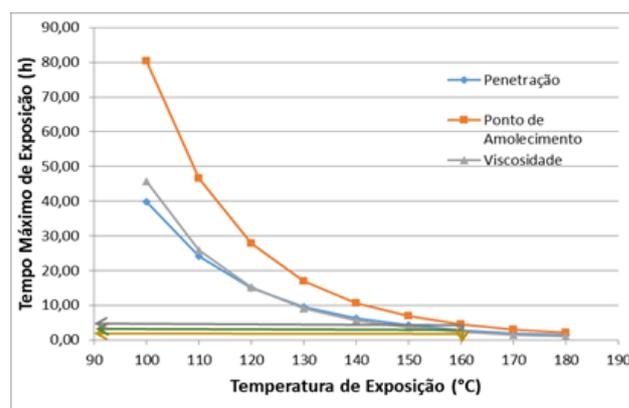
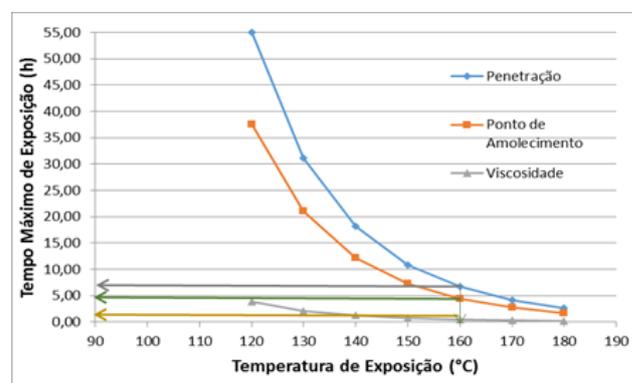


Figura 7 – Curva temperatura de exposição versus tempo para o CAP Modificado com BMP (ARAÚJO, 2015)



É importante frisar que os tempos presentes nas referidas curvas se referem aos tempos máximos de exposição que os ligantes em estudo poderão ficar exposto a determinadas temperaturas, durante a fase de usinagem até o momento de aplicação do material em campo, para que os limites preconizados pela ANP sejam respeitados e, assim, não haja um comprometimento demasiado dos materiais a serem aplicados como revestimentos asfálticos perante o fenômeno do envelhecimento. Assim sendo, tem-se o emprego de materiais com bom desempenho, capazes de garantir a vida útil conforme previsto para os revestimentos asfálticos, já que as suas características são preservadas.

Desta maneira, torna-se viável a utilização das curvas do tipo temperatura de exposição versus tempo como mecanismo de controle de qualidade das

misturas asfálticas, visto que estas minimizam os efeitos do envelhecimento dos ligantes asfálticos, garantindo, assim, um comportamento satisfatório dos revestimentos durante a vida útil. Além disso, as referidas curvas são importantes ferramentas capazes de embasar a escolha de um determinado ligante com melhores respostas frente à ocorrência do envelhecimento em curto prazo.

A seguir, na Tabela 6, a partir da fixação da temperatura em torno daquela utilizada pelas usinas (160°C), foi possível visualizar os tempos máximos de exposição à referida temperatura e, assim, observar o comportamento de cada ligante asfáltico em estudo.

Tabela 6. Tempo de exposição referente à temperatura de 160°C para cada tipo de ligante asfáltico (ARAÚJO, 2015)

Tipo de ligante	Tempos de exposição		
	Penetração	Ponto de Amolecimento	Viscosidade
CAP Natural (50/70)	3,23	2,67	5,28
CAP Modificado com SBS	2,83	4,47	2,28
CAP Modificado com BMP	6,66	4,38	0,45

De acordo com a Tabela 6, observa-se que os ligantes asfálticos, quando expostos à temperatura de 160°C, poderão permanecer assim por, no máximo, 2,67 horas (2h e 40min) no caso do CAP 50/70, 2,28 horas (2h e 16min) aquele modificado com SBS e 0,45 horas (27min) o CAP+BMP,; pois, desta forma, tem-se uma garantia de que os valores limites referentes à 54°C (ponto de amolecimento), 1860cP e 1384,5cP (viscosidade) sejam obedecidos para os respectivos ligantes.

Todavia, é perceptível que os resultados referentes ao CAP Modificado com BMP não se

mostram condizentes, uma vez que o tempo máximo de exposição em que o material poderá ficar exposto à referida temperatura se apresenta extremamente reduzido e, conseqüentemente, torna-se inviável realizar todas as atividades referentes à usinagem e à aplicação da mistura asfáltica neste intervalo de tempo. Sendo assim, dentre as possíveis causas que podem ter comprometido os resultados deste material estão relacionadas com as suas condições de produção, tais como: adoção de uma temperatura incorreta para a mistura dos materiais; velocidade de rotação insuficiente para homogeneizar a mistura; utilização de um tempo de agitação insuficiente; emprego incorreto do teor de borracha (% BMP).

Além da análise envolvendo o controle de qualidade das misturas asfálticas, as informações presentes na Tabela 6 possibilitaram outras interpretações no que tange a escolha de um tipo de ligante asfáltico para ser utilizado em uma determinada região, levando em consideração apenas a análise do envelhecimento em curto prazo.

Apesar da presente pesquisa não possuir resultados referentes ao ensaio de envelhecimento em longo prazo (ensaio PAV) que simulariam o comportamento dos ligantes ao longo de sua vida útil, os dados acima se mostraram capazes de determinar um possível ligante a ser utilizado em regiões de clima quente, pois se o referido material sofrer menos os efeitos do envelhecimento em curto prazo (correspondente à 80% do envelhecimento total), conseqüentemente, haverá um ganho de vida útil durante a sua utilização na pista, mesmo se este for utilizado em regiões de clima quente, onde as temperaturas de serviço dos revestimentos são consideradas mais agressivas e comprometedoras para o pavimento ao longo de sua vida útil.

Diante disso, observa-se que, dentre os ligantes asfálticos em estudo, o CAP Natural (50/70) seria o mais viável para ser utilizado nos serviços de pavimentação, principalmente em regiões onde a interferência do fator temperatura comprometeria ainda mais a vida útil do pavimento, como é o caso de regiões de clima quente; visto que para esta circunstância o referido ligante seria o menos susceptível ao fenômeno do envelhecimento em curto prazo, em razão de seu tempo máximo de exposição, à temperatura de 160°C, ser superior ao dos demais ligantes.

Sendo assim, antes mesmo do CAP natural atingir o seu tempo máximo de exposição admissível em norma, os outros ligantes já se encontrariam envelhecidos, uma vez que os seus tempos máximos se encontrariam extrapolados; conseqüentemente, o desempenho dos mesmos já se encontraria comprometido o que culminaria em redução do desempenho das misturas asfálticas, além do mais, em uma redução da vida útil do pavimento.

No entanto, é importante esclarecer que a análise acima não exclui a utilização dos demais ligantes para a região citada, uma vez que existem inúmeras pesquisas, no âmbito nacional e internacional, demonstrando as melhorias das propriedades físicas e reológicas proporcionadas pela inserção dos polímeros aos ligantes naturais. Assim, caso haja prioridade em se utilizar o ligante modificado com polímeros (SBS ou BMP), seja por razões técnicas e/ou econômicas, é importante atentar-se para a temperatura de exposição, bem como para o tempo máximo de exposição durante a usinagem e a aplicação da mistura asfáltica, no intuito de se atenuar os efeitos do envelhecimento em curto prazo e, assim, garantir maior resistência e durabilidade ao pavimento asfáltico.

Assim, o presente estudo tratou da análise apenas do comportamento do ligante asfáltico para situações adversas de temperatura, entretanto, o desempenho de uma mistura asfáltica depende não só de um ligante com características satisfatórias, mas também da interação desse com os demais componentes da mistura, necessitando assim de experimentos que consigam reproduzir o desempenho dessas misturas para que inferências mais precisas possam ser realizadas

CONCLUSÃO

A partir do desenvolvimento deste trabalho tornou-se claro a grande importância de cuidados técnicos durante as fases de industrialização das misturas asfálticas (desde a fase de usinagem até a aplicação das misturas em campo), visto que estas são susceptíveis à ocorrência do fenômeno do envelhecimento, responsável por comprometer as características físicas dos ligantes e, conseqüentemente, das misturas asfálticas, culminando na redução do desempenho e, até mesmo, da vida útil do revestimento asfáltico.

Com relação à análise dos resultados obtidos, observou-se que os ligantes asfálticos em estudo (CAP Natural 50/70, CAP modificado com SBS e CAP modificado com BMP) atenderam, de um modo geral, às especificações mínimas preconizadas pela ANP.

Além disso, pôde-se constatar que o Modelo de Arrhenius possibilitou retratar de forma eficiente o envelhecimento dos ligantes em estudo durante as fases de usinagem, espalhamento e compactação das misturas asfálticas, já que a correlação existente entre os dados avaliados (temperatura de exposição e o tempo) foi classificada como boa, tendo em vista que

todos os coeficientes de correlação de Pearson apresentaram valores superiores à 0,80.

Sendo assim, a partir da extrapolação de dados oriundos do modelo tornou-se possível estimar o tempo máximo que cada ligante poderá ser submetido à determinada temperatura sem que se atinjam os valores limites de cada propriedade física (penetração, ponto de amolecimento e viscosidade) admissíveis em norma.

Com isso, foi possível confeccionar curvas do tipo temperatura de exposição versus tempo máximo de exposição para cada ligante, sendo estas consideradas importantes ferramentas de controle de qualidade desde a fase de usinagem das misturas asfálticas até a aplicação em campo, já que estas garantem um controle adequado dos fatores que favorecem a ocorrência indesejável do envelhecimento.

É importante esclarecer que as curvas de controle de qualidade possibilitam a escolha de um determinado ligante asfáltico levando em consideração apenas a análise do envelhecimento em curto, porém não exclui a utilização dos demais ligantes nos serviços de pavimentação. Pelo contrário, as referidas curvas alertam para o controle apurado que se deve ter com o tempo de exposição a uma determinada temperatura durante a produção e aplicação das misturas asfálticas confeccionadas a partir dos ligantes em estudo. Assim, é válido ressaltar a necessidade de estudos mais elaborados para a correta escolha de um determinado ligante para compor as misturas asfálticas, visto que existem inúmeras pesquisas relatando a eficácia mecânica, reológica e, até mesmo, física dos ligantes asfálticos quando modificados por polímeros.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à Universidade de Brasília, pela disponibilização dos resultados experimentais, à Universidade Federal do Tocantins-UFT, pela oportunidade de desenvolvimento do trabalho durante a fase de TCC da aluna Raíssa Araújo, no curso de Engenharia Civil-UFT.

Todos os autores declararam não haver qualquer potencial conflito de interesses referente a este artigo.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, 2015. Estudo do envelhecimento dos ligantes asfálticos a partir do modelo de Arrhenius. Palmas-TO. **Trabalho de Conclusão de Curso**. Universidade Federal do Tocantins, , Brasil. 89f.

ASTM D 2872. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). **American Society for Testing and Materials**, 1997.

BELL, C.A., WIEDER, A.J. & FELLIN, M.J., Laboratory Aging of Asphalt-aggregate Mixtures: Field Validation. Strategic Highway **Research Program, National Research Council**, Whashington-DC, 1994.

COLMANETTI, Janaina Provásio. Estudos sobre a aplicação de geomembranas na impermeabilização da face de montante de barragens de enrocamento Brasília-DF, 272 f. **Tese de Doutorado em Engenharia Civil**, Universidade de Brasília, 2006.

DNIT. Cimentos Asfálticos de Petróleo Especificação de Material. EM 095/2006. **Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes**, 2006.

GRECO, Jisela Aparecida Santanna. Avaliação da influência de alguns fatores nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas, à luz da técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários assimétricos. 2004. 340 f. **Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes)** – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

KOERNER, R.M; Lord, A.E. Jr; Hsuan, Y.H . Arrhenius modeling to predict geosynthetic degradation. **Geotextiles and Geomembranes**. Vol 11, nº2 pp. 151-183, 1992.

LAMONTAGNE, J. (2002). Viellissement des bitumes modifiés polymères a usage routier par simulations et techniques spectroscopiques. Marseille, 2002. **Tese (Doutor em Ciências)** – Faculté des Sciences et Techniques de Marseille Saint-Jérôme – Université de Droit, d’Economie et des Sciences d’Aix-Marseille III.

MORILHA JUNIOR, Armando. Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas. 2004. 165 f. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)**. – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

SILVA, Letícia Socal da. Contribuição ao Estudo do Envelhecimento de Ligantes Asfálticos. Influência da Adição de Polímeros e Comportamento Frente a Radiação UV. 2005. 155 f. **Tese (Doutorado em Engenharia)**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SILVA, J.P.S; Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas. **Tese de Doutorado em Engenharia Civil**, Brasília-DF, 145f. Universidade de Brasília, , 2011.

TRB. Simple Performance Test for Superpave. **Transportation Research Board**. Mix Design. NCHRP report 465, 2002.

Whiteoak, D., (1990). **SHELL Bitumen Handbook**. SHELL, Inglaterra.