RAPHAEL PIRES DA SILVA

Previsão do desempenho de ligantes asfálticos a partir da aplicação do modelo de Arrhenius

Artigo apresentado no Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Graduação em Engenharia Civil ou Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Goiás.

Aprovado em: 11/12/2019.

Banca Examinadora:

_____

Prof. Dr. João Paulo Souza Silva – Universidade Federal de Goiás (Orientador)

_____

Prof. Dr. Liosber Medina Garcia – Universidade Federal de Goiás

Robinson Andrés Giraldo Zuluaga

Prof. Dr. Robinson Andrés Giraldo Zuluaga – Universidade Federal de Goiás

Atesto que as revisões solicitadas foram feitas:

_____

Prof. Dr. João Paulo Souza Silva (orientador)

Em: 17/12/2019.

REVISTA MATÉRIA V.00 N.0

ISSN 1517-7076 artigo xxxxx, pp.xxxx-xxxx, 2013

Previsão do desempenho de ligantes asfálticos a partir da aplicação do modelo de Arrhenius

Prediction of asphalt binder performance from the application of the Arrhenius model

Raphael Pires da Silva [1], João Paulo Souza Silva [2]

[1] Escola de Engenharia Civil e Ambiental – EECA – Universidade Federal de Goiás – UFG CEP: 74605-220, Avenida Universitária, Setor Leste Universitário – Goiânia, GO, Brasil.
e-mail: raphael.piresppc@gmail.com
[2] Departamento de Engenharia de Transportes – Universidade Federal de Goiás – UFG CEP: 74968-755, Rua Mucuri, Bairro Conde dos Arcos – Aparecida de Goiânia, GO, Brasil.
e-mail: jpss@ufg.br

RESUMO

O manuseio das misturas asfálticas durante as fases de industrialização e de aplicação na pista merece atenção especial, pois já nestas etapas surgem os efeitos do envelhecimento do ligante. Este fenômeno é responsável por modificar as propriedades tanto das misturas quanto dos ligantes asfálticos, provocando a diminuição da extensão da vida útil do pavimento asfáltico. Desta maneira, com o intuito de entender os efeitos deste fenômeno, este trabalho aplicou o modelo de Arrhenius para simular o envelhecimento a curto prazo, avaliando três propriedades distintas (penetração, ponto de amolecimento e viscosidade) de quatro ligantes asfálticos: CAP 50/70, CAP 50/70 Modificado com SBS, CAP 50/70 Modificado com borracha moída de pneus e CAP 50/70 envelhecido que foi rejuvenescido a partir da adição 20 % do agente rejuvenescedor AR-5. O modelo aplicado possibilitou estimar o tempo máximo que os ligantes em estudo podem permanecer expostos a determinada temperatura, garantindo assim que as características avaliadas continuem de acordo com os valores mínimos preconizados por normas técnicas. Desta forma, um dos mecanismos idealizados para a prevenção do envelhecimento dos ligantes a curto prazo foram as curvas elaboradas para o controle de qualidade, que indicam qual ligante estudado é mais estável quanto a questão do tempo máximo e temperatura de exposição nas fases de usinagem, transporte e espalhamento do material nos serviços de pavimentação.

Palavras-chave: envelhecimento asfáltico, ligantes asfálticos, modelo de Arrhenius, agentes rejuvenescedores.

ABSTRACT

The handling of asphalt mixtures during the industrialization and track application phases deserves special attention, as already in these stages arise the effects of binder aging. This phenomenon is responsible for modifying the properties of both mixtures and asphalt binders, causing a decrease in the asphalt pavement life cycle. Thus, in order to understand the effects of this phenomenon, this work applied the Arrhenius model to simulate short-term aging, evaluating three distinct properties (penetration, softening point and viscosity) of four asphalt binders: CAP 50/70, CAP 50/70 Modified with SBS, CAP 50/70 Modified with tire crushed rubber and aged CAP 50/70 which has been rejuvenated from the 20% addition of rejuvenating agent AR-5. The applied model made it possible to estimate the maximum time that the binders under study can remain exposed to a certain temperature, thus ensuring that the evaluated characteristics continue in accordance with the minimum values recommended by technical standards. Thus, one of the idealized mechanisms for the prevention of short-term binder aging was the curves designed for quality control, which indicate which binder studied is more stable regarding the issue of maximum time and exposure temperature in the machining, transport and material scattering phases.

Keywords: asphaltic aging, asphaltic binders, Arrhenius model, rejuvenating agents.

Autor Responsável: Data de envio: Data de aceite:

1. INTRODUÇÃO

Os pavimentos brasileiros são executados com revestimento asfáltico constituído a partir de agregados pétreos e ligantes asfálticos. Sendo assim, a indústria do asfalto avança no estudo de novos materiais, tecnologias e métodos de execução com o objetivo de melhorar as condições e manutenção dos pavimentos afim de garantir uma maior vida útil ao pavimento, sendo o envelhecimento do ligante asfáltico um dos principais fatores para esta condição [1].

Os pavimentos flexíveis são compostos por múltiplas camadas em sua estrutura, sendo o revestimento a camada responsável por receber e conduzir de forma atenuada as cargas provenientes do tráfego de veículos as camadas subjacentes do pavimento. Vários fatores, aos quais são submetidas as rodovias brasileiras, podem influenciar e propiciar a degradação neste pavimento, entre os quais podemos destacar: aumento do volume de tráfego; excesso de carga transportada por eixo; pressão de enchimento dos pneus elevada; pouco planejamento e realizações de intervenções/conservações, todos estes aliados as condições ambientais fazem com que a vida útil deste pavimento seja limitada . Todavia, a busca por novos materiais para melhorar a durabilidade e o comportamento dos componentes da mistura asfáltica que compõe o revestimento asfáltico pode diminuir e/ou solucionar os efeitos causados por estes fatores [2].

Nesta perspectiva, há um crescente desenvolvimento de estudos relacionados ao ligante asfáltico, sobretudo com a adição de modificadores, o que permite avaliar o seu comportamento quando modificado comparando com os ligantes convencionais. A deformação permanente é um dos principais defeitos que podem vir a surgir nos revestimentos asfálticos, logo, as indústrias de pavimentos tem se utilizado bastante os ligantes asfálticos modificados como meio de otimizar as propriedades do ligante. Sabe-se ainda que, o tipo de polímero ou copolímero, reativo ou não, ou qualquer outro modificador escolhido para ser empregado vai depender dos requisitos de desempenho mecânico que se deseja para a camada de revestimento asfáltico [3].

O estireno-butadieno-estireno (SBS) é o copolímero mais utilizado na indústria de modificadores para aplicação na pavimentação, pois proporciona o aumento do desempenho mecânico quando incorporado ao ligante. No entanto, o mercado mundial de SBS em 2009 passou por uma escassez deste copolímero, o que afetou o fornecimento e o custo global. Neste momento, a indústria se preocupou em buscar diferentes alternativas de polímeros para substituir o SBS, evitando a perda da qualidade proporcionada por este ligante ao revestimento [4].

A inserção da borracha moída de pneu (BMP) ao ligante asfáltico tem se tornado uma opção bastante disseminada internacionalmente, pois este processo colabora com a redução dos resíduos resultantes de descartes irregulares ao meio ambiente [5]. De acordo com Neves Filho [6], a incorporação do BMP ao ligante pode melhorar o desempenho dos pavimentos por meio do aumento da flexibilidade postergando o aparecimento de trincas, aumento da rigidez a elevadas temperaturas o que reduz deformações perenes e aumento da impermeabilização proporcionada pelos revestimentos asfálticos. No entanto, está modificação possui um alto custo o que deixa sua utilização como um obstáculo para a indústria.

Entretanto, o envelhecimento de um ligante está ligado a mudança de características físicas, químicas e reológicas durante etapas de execução de uma obra como usinagem e aplicação em algum serviço, levando assim ao processo de endurecimento do mesmo. Reduzir o endurecimento do ligante asfáltico durante sua aplicação é um dos principais desafios para a execução de pavimentos a quente e uma das principais causas para este fenômeno é a oxidação que é responsável pelo aumento da consistência dos ligantes asfálticos proporcionando assim maior rigidez a mistura asfáltica [7, 8, 9].

Por outro lado, o processo de envelhecimento de ligantes asfálticos pode ser revertido a partir da utilização de aditivos químicos, conhecidos como agentes rejuvenescedores e com a finalidade de restabelecer as propriedades originais dos ligantes [10].

Atualmente pouco se conhece sobre os mecanismos para prevenção do envelhecimento dos ligantes asfálticos e o que os tornam susceptíveis à problemas de desempenho de misturas asfálticas, sendo que o fenômeno do envelhecimento tem início na fase de usinagem do produto por falta de controle, principalmente de condições como o tempo e temperatura as quais esse material é exposto, perdendo assim propriedades imprescindíveis para vida útil do ligante.

Diante deste fato, este trabalho foi idealizado e desenvolvido na tentativa de estudar o mecanismo para prevenção do envelhecimento de ligantes asfálticos convencionais e modificados a partir do modelo de Arrhenius, por meio de resultados obtidos em pesquisas de Silva, Farias e Abrahim [31], Silva e Araújo [29] e Silva e Farias [10], entre os anos de 2008 e 2015, e assim verificar se é possível prolongar a vida útil do material durante as fases de usinagem, transporte, espalhamento e compactação da massa asfáltica.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Ligantes asfálticos naturais e modificados

Osmari e Aragão [11] relatam que os ligantes asfálticos podem influenciar de forma significativa o desempenho dos pavimentos flexíveis, sendo ainda responsáveis pela preservação da estabilidade estrutural das misturas asfálticas por meio da combinação entre as partículas de agregados. Além disso, quando os ligantes asfálticos estão presentes na mistura podem resultar em um comportamento complexo devido a temperatura e velocidade do carregamento.

Desde a década de 70 em diversos lugares no mundo, principalmente, Estados Unidos e Europa, foi possível observar a adoção da utilização dos ligantes asfálticos modificados com polímeros. Esta adesão deve-se às melhorias nas propriedades dos ligantes, que por sua vez favorecerão beneficamente o revestimento asfáltico, sobretudo em relação à sua vida útil. Assim, é possível atingir melhores resultados no desempenho das rodovias quando comparados aos ligantes naturais, em especial nas rodovias de tráfego intenso [12].

2.1.1 CAP 50/70

O ligante asfáltico utilizado em projetos de pavimentação no Brasil, conhecido como Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), origina-se da destilação fracionada do petróleo. O CAP por ser um material viscoelástico, tem grande aplicabilidade na pavimentação, já que o mesmo é submetido ao aquecimento para que entre numa fase líquida, no intuito de facilitar a mistura com os agregados pétreos e garantir, portanto, um perfeito recobrimento da superfície; além disso, quando em utilização o mesmo deve portar como um semissólido para suportar às ações do tráfego sem provocar deformações intensas ou prematuras [13].

Além disso, outras vantagens que o torna interessante para a pavimentação deve-se à durabilidade e resistência às ações da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais que, provavelmente, possam atacar a superfície asfáltica durante a vida útil do pavimento, além da característica impermeabilizante que este é capaz de proporcionar.

Quando o CAP é submetido a diferentes oscilações de temperaturas, estes podem adquirir aspectos contrários. O estado semissólido é encontrado quando este é exposto a baixas temperaturas, já a formação de um fluido viscoelástico é notado a temperatura ambiente e na forma líquida quando a altas temperaturas, o que facilita o seu manuseio [1].

2.1.2 CAP 50/70 modificado com SBS

O estireno-butadieno-estireno (SBS) é um copolímero pertencente a classe elastômeros termoplásticos mais utilizado na indústria de modificadores para aplicação na pavimentação, pois proporciona o aumento do desempenho mecânico quando incorporado ao ligante [4].

A princípio, dependendo da penetração em que o asfalto se apresenta, é necessário o emprego de um óleo aromático ao ligante virgem sob agitação. Sucessivamente, também sob agitação, ocorre a agregação do polímero SBS sob a forma de "pellets", sendo este conduzido por meio de um transportador helicoidal para dentro de um reservatório contendo asfalto submetido a temperatura entre 180 a 195ºC. Esta mistura tem seu aquecimento mantido por meio de um aquecedor de óleo térmico propiciando a formação de uma fase contínua. Em seguida, a mistura passa por moinhos coloidais utilizando taxas de cisalhamento de acordo com à quantidade de polímero e variedade do asfalto [14].

De acordo com Amaral [15], a aplicação do SBS ao ligante faz com que a sensibilidade à variação da temperatura seja menor contraposto ao ligante virgem, isto é, quando em temperaturas baixas o ligante apresentará menor rigidez e quando em altas temperaturas terá maior estabilidade. O SBS mesmo quando exposto a altas temperaturas garante o comportamento viscoelástico do pavimento. Este comportamento se deve a sua composição química por ser capaz de formar uma malha sob a ligante virgem ao qual já possui características pouco viscosas. Também devido a sua composição, o SBS junto ao CAP confere maior flexibilidade mesmo que em temperaturas demasiadamente baixas. Com isso, o aparecimento de trincas no pavimento sofre redução, desta forma, o ligante modificado não exibe o mesmo comportamento hialino quando comparado ao ligante natural.

2.1.3 CAP 50/70 modificado com BMP

A Associação Nacional da Indústria e Pneumáticos (ANIP) divulgou que no ano de 2016 houve uma produção de aproximadamente 68 milhões de unidades de pneus. Uma medida adotada em vários estudos como forma de reduzir os impactos ambientais devido a utilização dos pneus é a realização de reciclagem dos materiais que

não são mais úteis ao mercado [16].

Os pneus podem ser utilizados de diversas formas, uma delas é o emprego deste material na pavimentação, visto que, possibilita relevantes melhorias nas características dos ligantes asfálticos. A utilização da borracha de pneus inservíveis em misturas asfálticas é um modo alternativo de se vincular os benefícios de um polímero em um ligante, além de reduzir problemas ambientais [1].

Os autores ainda comentam que a incorporação da borracha triturada de pneus pode ocorrer a partir de dois processos, sendo eles: úmido (*wet process*) e seco (*dry process*); contudo, habitualmente o processo úmido é o mais empregado. Segundo Visser & Verhaeghe (*apud* Dantas Neto) [17], o asfalto-borracha é obtido, primeiramente, mediante ao aquecimento do ligante a temperaturas em torno de 190°C, e em seguida, durante um intervalo de 1 a 4 horas dentro de um tanque apropriado é realizada a adição da borracha moída ao ligante convencional.

Contudo, pesquisas realizadas por Oda [18] indicam que o processo de manuseio e retalhamento da borracha é altamente planejado e monitorado para que se tenha uma produção de um material de borracha limpa. Ainda segundo a autora é realizado a moagem de pneus de borracha em partículas muito pequenas, onde o teor do material de borracha tem uma variação de 15% a 20% em relação ao peso total da mistura, diluentes e alguns aditivos especiais.

Ainda em relação a produção do asfalto-borracha, Mendes, Guedes e D'Oliveira [19], citam que a criação do asfalto borracha parte da utilização de pneus inservíveis reciclados e para isso, os pneus passam por um processo de beneficiamento que é composto pela retirada do talo dos pneus, trituração, separação do aço da estrutura dos pneus, e posterior peneiramento, para separação do resíduo em diferentes faixas granulométricas, sendo cada uma dessas apropriada para uso em tipos diferentes de asfaltos, para aplicações diversas

2.2 Especificações das propriedades dos ligantes asfálticos

A avaliação e seleção dos ligantes asfálticos para a utilização em serviços de pavimentação se dá a partir da análise de suas características físicas, químicas e reológicas, sendo que estas devem atender às especificações mínimas preconizadas pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP).

Para se verificar a conformidade dos ligantes em estudos, foram utilizadas as Resoluções N° 19 da ANP de 2005[20], avaliando fatores como consistência e viscosidade, além das características físicas do CAP natural, Resolução N° 32 da ANP em vigência desde 2010 [21] referente ao CAP modificado com SBS e Resolução N° 39 da ANP de 2008 [22], responsável por regulamentar as especificações mínimas dos CAP modificado BMP.

A classificação dos ligantes ocorre com base nas Resoluções apresentadas acima levando em consideração algumas propriedades como: penetração, viscosidade, ponto de amolecimento, ductilidade, susceptibilidade térmica, ponto de fulgor e recuperação elástica.

Todavia, para se caracterizar os ligantes asfálticos novos ou envelhecidos são utilizados dois métodos. O primeiro e mais utilizado é o convencional, baseado na viscosidade, penetração, ponto de amolecimento, ductilidade, recuperação elástica, ponto de fulgor e combustão; e o segundo é baseado no desempenho do material de acordo com a metodologia Superpave [23]

As resoluções da ANP, citadas acima, apresentam em seu escopo novas especificações, conhecidas como Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavements*), propostas pelo programa *Strategic Highway Research Program* (SHRP) e trazem consigo mudanças significativas nos procedimentos de ensaios de ligantes asfálticos. Dentre os ensaios apresentados pelas especificações do Superpave estão a viscosidade *Brookfield* e o ensaio de envelhecimento do ligando na estufa RTFOT (*Rolling Thin Oven Test*).

2.3 Envelhecimento dos ligantes asfálticos

Os ligantes asfálticos com o passar dos anos, assim como qualquer outro material utilizado na construção, sofrem alterações nas suas propriedades. Essas modificações são percebidas em decorrência das alterações de suas características físicas, químicas e reológicas, o que levam ao aumento de sua consistência [24].

No entanto, Tonial [25] e Silva [9] expõem que o CAP pode ser afetado por várias reações, dentre elas: oxidação, endurecimento exsudativo, endurecimento físico e perda de voláteis. Os ligantes asfálticos, como qualquer outra substância orgânica, passam pelo processo de oxidação lenta quando em exposição ao ar, sendo este processo influenciado por vários fatores, tais como a presença de oxigênio, exposição à radiação ultravioleta e as variações de temperatura.

É sabido que o principal responsável pelo envelhecimento dos ligantes asfálticos é a oxidação. Contudo,

Silva [26] destaca que o processo de envelhecimento do ligante asfáltico acontece em três momentos: durante a usinagem; durante a estocagem o espalhamento e a compactação da mistura; e durante a vida útil do pavimento. A Figura 1, a seguir, ilustra esses momentos:

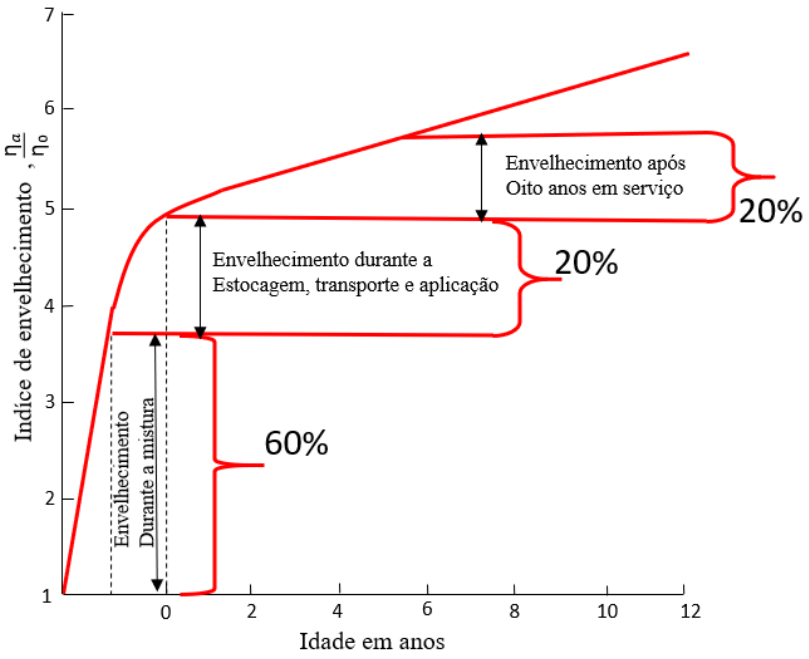

Figura 1: Etapas desencadeadoras do fenômeno de envelhecimento do ligante (modificado de Whiteoak [8]).

De acordo com Tonial [25], o primeiro de maior impacto, representando 60% do envelhecimento total que o ligante sofre, ocorre na usinagem da mistura usinagem no qual o ligante é misturado a elevadas temperaturas possibilitando que uma ampla superfície fique exposta ao ar; o segundo dá-se no processo de estocagem (não comum no Brasil), transporte, espalhamento e compactação, atingindo um total de 20% do total do envelhecimento sofrido pelo ligante; e por fim, o terceiro ocorre no decorrer da vida útil do pavimento devido as intempéries da natureza, representando por volta de 20% do envelhecimento total.

Segundo Whiteoak [8], o envelhecimento do ligante asfáltico é caracterizado pela elevação de sua consistência. De modo geral, ocorre o aumento de sua viscosidade correlacionando com a diminuição da penetração do ponto de amolecimento, o que leva a prejuízos de suas características aglutinantes. O comportamento físico e reológico do ligante é afetado pelo aumento da consistência, deixando-o mais duro, e consequentemente mais quebradiço, menos elástico e menos dúctil.

Entretanto, Silva [9], cita que atualmente a simulação do envelhecimento dos ligantes asfálticos pode ocorrer em laboratório por meio de duas formas. A primeira técnica realiza a simulação do envelhecimento do ligante asfáltico por meio do *Rolling Thin Film Oven Test* – RTFOT (ASTM D 2872) durante a etapa de usinagem ocasionado pelo contato das camadas que envolve os agregados e o ar superaquecido no local de mistura. A simulação deste evento ocorre sob elevadas temperaturas em um forno com divisões giratórias e na presença de oxigênio. O ato giratório dentro destes compartimentos evita a formação de uma camada oxidada na face da amostra.

O segundo método utilizado é o *Pressure Aging Vessel* (PAV) criado pelo colegiado do SHRP, realiza a simulação do envelhecimento do ligante asfáltico no decorrer de sua utilização como pavimento, ou seja, ao longo de sua vida útil. Este ensaio é desenvolvido sob alta pressão, períodos extensos e baixa temperatura, onde é possível ocorrer a simulação do tráfego de veículos por um longo tempo de utilização, associando ao meio ambiente e adversidades da natureza ao qual este revestimento é exposto.

Silva [9] cita em seu estudo que a sequência de ensaios RTFOT+PAV é uma simulação clássica do envelhecimento, sendo amplamente utilizada na literatura cientifica como meio de simular o envelhecimento dos ligantes asfálticos.

2.4 Métodos para determinação experimental do envelhecimento do ligante em laboratório

Segundo Levine [27], o modelo de Arrhenius é uma técnica onde é possível determinar qual o tempo e qual a temperatura máxima o material poderá ser exposto antes que se atinja uma característica limite, como por exemplo, seu envelhecimento. De acordo com Colmanetti [28], por meio da extrapolação de dados obtidos a curto prazo, o método viabiliza o estudo do processo de degradação de um certo material em longo prazo e/ou submetidos a altas temperaturas.

Ainda de acordo com a autora, o modelo de Arrhenius é baseado na superposição tempo-temperatura, onde são definidas elevadas temperaturas de incubação, acelerando assim, o processo de degradação do material a fim de extrapolar os dados obtidos para a temperatura presente em campo. Este modelo é matematicamente representado de acordo com a equação 1.

$$LnRr = -\frac{Eact}{R.T} + LnA \tag{1}$$

Onde: LnRr = Logaritmo natural da razão de reação (min^{-1}); Eact = Energia de ativação aparente (J/mol); R = Constante universal dos gases (8,314 J/mol K); T = Temperatura absoluta (K); A = Fator pré-exponencial (min^{-1}) ou fator de frequência.

As constantes "A" e "Eact", conhecidas como parâmetros de Arrhenius, são determinadas experimentalmente por meio do ensaio de RTFOT no qual ocorre a simulação do envelhecimento em curto prazo do ligante. Entretanto, este modelo faz-se necessário a submissão da amostra do ligante a três temperaturas distintas, diferente do ensaio tradicional que é apenas uma temperatura. Além disso, objetivando a aplicação do modelo de Arrhenius, as amostras são expostas ao envelhecimento em intervalos de tempo de tempo de 1, 2, 4, 8, 32 e 64 horas para cada temperatura [28, 26, 29].

Ainda de acordo com Colmanetti [28], a partir destes dados, é possível plotar um gráfico que relaciona a razão de reação, tratado aqui como o inverso do tempo, na escala logarítmica com o inverso da temperatura, sendo possível obter uma equação de reta que melhor se ajusta e, deste modo determinando os valores das constantes "A" e "Eact". A Figura 2 demonstra o gráfico proveniente deste modelo, utilizado para previsões das propriedades de certo material nas condições de campo.

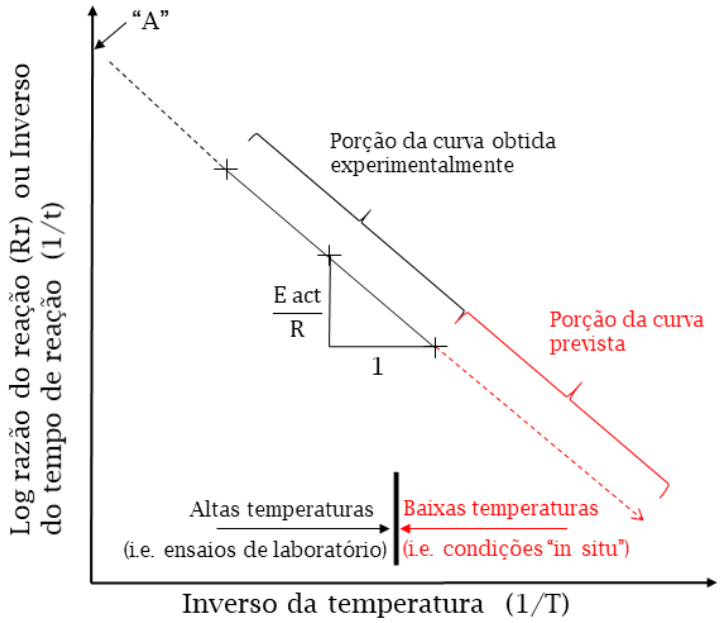

Figura 2: Gráfico elaborado por meio da aplicação do modelo de Arrhenius [28].

A obtenção das constantes "Eact" e "A" se dá a partir de um ajuste linear mediante a adição de uma linha de tendência do tipo linear, visto que a equação do modelo se assemelha com a equação de primeiro grau,

representada por uma reta. Dessa forma, os valores referentes "Eact/R" e "Ln A" são, respectivamente, representados pelos coeficientes angulares e lineares da reta como exibido na equação abaixo:

$$LnRr = -\frac{Eact}{R*T} + Ln(A) \rightarrow a * x + b \quad (2)$$

2.5 Controle de qualidade em misturas asfálticas

Com intuito de obter pavimentos mais resistentes, melhorar a qualidade e aumentar a vida útil se faz necessário conhecer todos os fatores que interferem diretamente nas etapas de usinagem, espalhamento e compactação a fim de reduzir os efeitos desfavoráveis ocasionados a eles [26, 30].

Segundo Morilha [7], é imprescindível que se tenha um controle com relação ao fator tempo, uma vez que este apresenta influência direta com a reação de oxidação. Com isso, também é importante levar em consideração o tipo de usina, uma vez que pode ocorrer variações no tempo de exposição do ligante asfáltico a altas temperaturas mesmo que em curto período.

Desta forma, como meio de reduzir os efeitos prematuros deste envelhecimento sob o ligante durante as etapas de usinagem, espalhamento e compactação desta mistura, é importante dispor de instrumentos capazes de preservar o íntegro controle dos fatores que levam ao aparecimento deste evento indesejável. Como forma de evitar esses efeitos e auxiliar neste controle, pode ser utilizada a curva de qualidade que tratam das variáveis tempo e temperatura de exposição, uma vez que ambas se relacionam intimamente às modificações das principais propriedades dos ligantes asfálticos [30, 31].

2.6 Rejuvenescedores dos ligantes asfálticos

O desenvolvimento de tecnologias com o objetivo de rejuvenescer o ligante asfáltico cresce incentivadas pelo emprego de técnicas de reciclagem de revestimentos asfálticos, promovendo assim, a recuperação de características perdidas por conta do envelhecimento. Deste modo, faz-se o uso de aditivos químicos, os chamados agentes rejuvenescedores (AR's), também conhecidos como agentes de reciclagem para recompor propriedades originais dos ligantes [10].

Diante do exposto, a aplicação deste produto formado por hidrocarbonetos aromáticos e resinas devolvem aos ligantes suas características viscoelásticas restabelecendo a estrutura química do mesmo [1]. Um dos principais e mais utilizado agente rejuvenescedor no Brasil é o de Óleo de Xisto, produzido a partir do xisto processado. De acordo com Leite *et al.* [32] este produto apresenta maior aromaticidade, produzindo um maior efeito de rejuvenescimento.

Os agentes podem ser divididos em duas categorias e cada uma delas possuindo seis tipos em função da viscosidade do ligante, sendo os quentes chamados de "Aditivos Asfálticos de Reciclagem para Misturas a Quente" (AR) e os frios de "Agentes de Reciclagem Emulsionados" (ARE) [33].

2.6.1 Agentes rejuvenescedores a quente (AR)

De acordo com Silva e Farias [10] os ARs são asfaltos de baixa qualidade, utilizados para devolver ao asfalto propriedades reológicas, como ductilidade e consistência, por conta da presença de compostos aromáticos nos mesmos. A seleção do AR a ser utilizado para o rejuvenescimento depende da condição de envelhecimento do ligante, uma vez que quanto maior o grau de envelhecimento menos consistente deve ser o agente rejuvenescedor.

Os agentes rejuvenescedores regulamentados pelo Departamento Nacional de Combustíveis (DNC) 04/97 portaria n°44 de 29/09/1997 [33] são classificados de acordo com a consistência, e são eles: AR-1, AR-5, AR-25, AR-75, AR-250, AR-500.

Os estudos realizados por Zanette, Moreno e Del Carpio [34] e Silva e Farias [10] apresentam a eficiência da aplicabilidade do AR-5 (uma das menores concentrações) em um pavimento com alto grau de deterioração, evidenciando assim que a seleção correta do agente rejuvenescedor pode trazer resultados satisfatórios.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Quatro tipos de ligantes foram utilizados nesta pesquisa, sendo eles a base de petróleo, CAP 50/70, CAP 50/70 Modificado com SBS, CAP 50/70 Modificado com BMP inservíveis e CAP 50/70 envelhecido que foi rejuvenescido a partir da adição 20 % do agente rejuvenescedor AR-5. A seleção destes ligantes foi baseado no fato

de que era necessário analisar seu comportamento físico tanto em estado natural, quanto modificado por polímeros, na ocasião em que são sujeitos ao fenômeno do envelhecimento asfáltico na estuda RTFOT simulando as fases de usinagem, espalhamento e compactação.

O CAP 50/70 foi adquirido na refinaria Gabriel Passos da Petrobrás (REGAP), localizada na cidade de Betim/MG, sendo disponibilizado pela distribuidora de asfalto Centro Oeste Asfaltos LTDA, localizada em Brasília/DF. O SBS também é proveniente da distribuidora de asfalto Centro Oeste Asfaltos LTDA, sendo distribuído já com a incorporação do polímero. A BMP também oriundo da distribuidora asfalto Centro Oeste Asfaltos LTDA; ao passo que a borracha moída inserida é provinda da empresa ECOFLEX, sendo disponibilizada pelo Laboratório de Engenharia Rodoviária (LER/UnB).

É importante ressaltar que o CAP 50/70 velho, foi obtido por meio de processo de extração de massa asfáltica fresada, oriunda da Estrada Parque Indústria e abastecimento (EPIA), na altura do viaduto Ayrton Senna em Brasília/DF, que fora então rejuvenescido com adição de 20% de AR-5, que por sua vez foi a melhor configuração de revivescimento comprovadamente testado por Silva e Farias [10], por meio de testes físicos e químicos.

Durante a execução dessa pesquisa, nenhum experimento foi executado, pois todos os dados levantados foram obtidos entre os anos de 2008 e 2015 por Silva, Farias e Abrahim [31], Silva e Araújo [29] e Silva e Farias [10], analisados minuciosamente, de modo a permitir a aplicação do modelo de Arrhenius para que se estime o comportamento dos ligantes quando submetidos à temperaturas e tempos de exposição variados, simulando assim o comportamento de campo.

O esquema apresentado na Figura 3 ilustra a metodologia que foi aplicada para obtenção dos dados a serem analisados nesta pesquisa contendo três etapas principais sendo: caracterização inicial dos ligantes, envelhecimento do ligante asfáltico e a aplicação do modelo de Arrhenius. A primeira e segunda etapas foram totalmente realizadas pelas pesquisas já comentadas, e apenas a terceira etapa foi executada durante o desenvolvimento desta pesquisa.

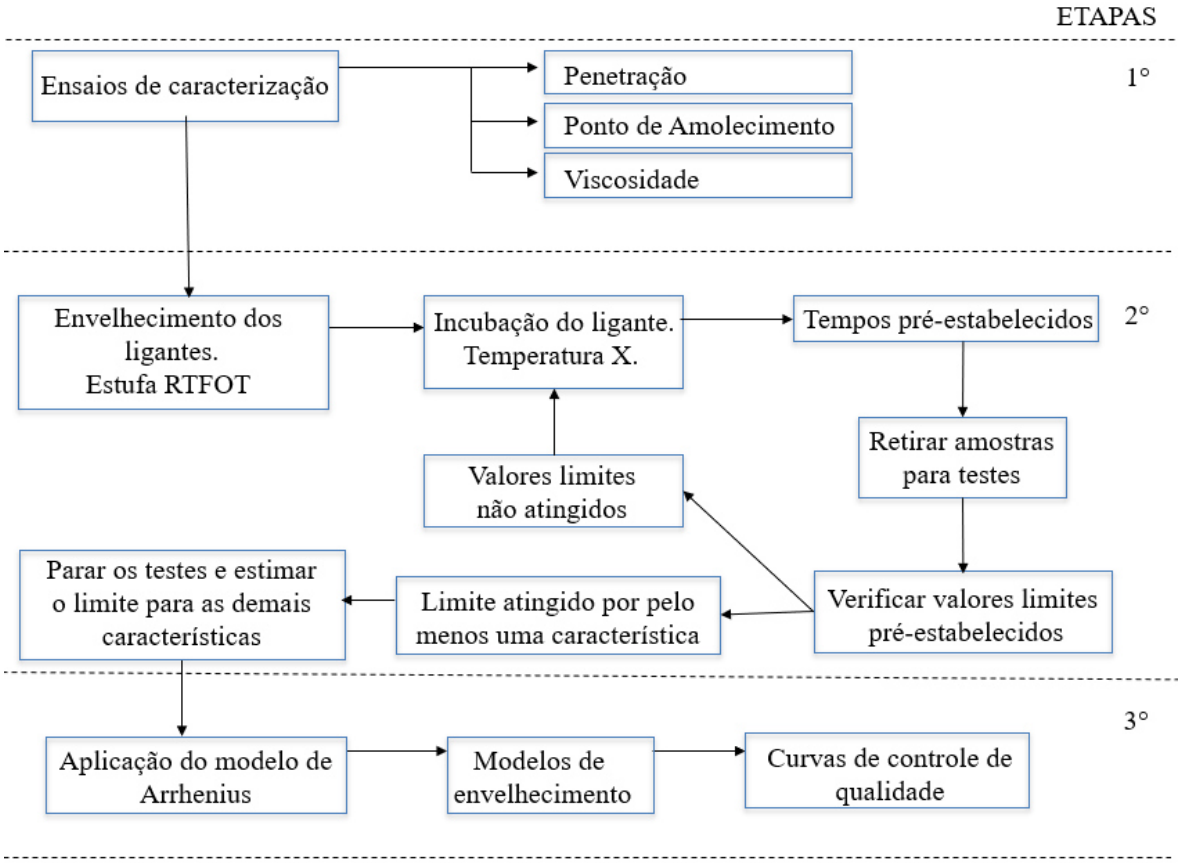

Figura 3: Esquema da metodologia de pesquisa.

A princípio, ocorreu a caracterização dos ligantes conforme preconizado pelas Resoluções, tendo como

base algumas propriedades físicas, como penetração, ponto de amolecimento, recuperação elástica e viscosidade, sendo que foram analisadas para fim desta pesquisa somente as apresentadas no esquema, em seguida, se iniciou a conferência deles no que se refere a adequação vistas às especificações mínimas apresentadas na Tabela 1. 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.

Tabela 1: Valores limites normatizados pela ANP utilizados como critério de parada.

Propriedades	**Ligantes asfálticos**			
	CAP50/70	CAP50/70 + BMP	CAP50/70 + SBS	CAP velho com adição de 20% de AR-5
Redução da Penetração (%)	55	55	60	55
Aumento do Ponto de amolecimento (°C)	8	10	6	8
Aumento da Viscosidade Brookfield(%)	50	50	50	50

Para a análise do ligante em sua categoria original, as médias aritméticas pertinentes a penetração e ao ponto de amolecimento foram calculadas, seguidamente das comparações destas médias obtidas aos valores preestabelecidos por cada resolução.

Além destas, Silva e Farias [10] avalia quais rejuvenescedores e quantidade foram capazes de apresentar compostos químicos em quantidade semelhante ao CAP50/70. A partir do ensaio de cromatografia foi possível separar os constituintes dos ligantes asfálticos, obtendo assim as quatro famílias pelo método SARA. A partir dos resultados obtidos a composição com a adição de 20% de AR-5 ao ligante envelhecido foi que melhor se enquadrou nos padrões estabelecidos, recompondo principalmente as frações de aromáticos e reduzindo resinas e asfaltenos. Importante lembrar que os valores limitantes apresentados na Tabela 1 para o CAP rejuvenescido são iguais ao do CAP50/70, devido às semelhanças apresentadas entre os ligantes, que foram comprovadas por Silva e Farias [10].

3.1 Modelo de envelhecimento dos ligantes asfálticos

Para o estudo do envelhecimento foi aplicado o modelo de Arrhenius, ao qual permite que ocorra a extrapolação dos dados a curto prazo possibilitando que haja a previsão do comportamento não apenas do ligante asfáltico em outras temperaturas, mas qualquer material submetido à processos de exposição à temperatura-tempo pré-determinada.

A razão que justifica a aplicação deste método deve-se à sua habilidade de provocar degradação veloz dos ligantes mediante a altas temperaturas de incubação, simulando a temperatura de campo, com o propósito de extrapolar os dados alcançados, ou seja, este modelo se baseia na superposição tempo-temperatura.

Todavia, para se empregar o modelo de Arrhenius, é necessário ocorrer a caracterização inicial dos ligantes, baseando-se nas Resoluções já citadas, para se obter parâmetros iniciais que serão utilizados como base de comparações futuras. Posteriormente, espera-se que os ligantes já tenham sido submetidos ao envelhecimento na estufa RTFOT sob temperaturas de 100°C, 135°C e 163°C; e ainda, que as amostras tenham sido incubadas em intervalos preestabelecidos de tempos, como: 1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64 horas. Finalmente, é fundamental que os ensaios de caracterização dos ligantes após o envelhecimento a curto prazo já tenham sido realizados.

O próprio modelo de Arrhenius exige que estes passos já estejam prontos, uma vez que este método necessita de caracterização anterior destes ligantes, por meio de ensaios, como forma de conhecer antecipadamente as suas principais propriedades iniciais, uma vez que estas serão utilizadas como parâmetros para a parada do ensaio, visto que, após a submissão à estufa RTFOT as propriedades passarão por variações.

Com base na determinação da temperatura de incubação, estas foram escolhidas segundo a temperatura de produção desta mistura, ficando em torno de 160ºC. Dessa forma, devido a estas temperaturas se aproximarem as da produção das misturas, pode-se garantir uma boa representatividade do modelo empregado. Com

relação aos intervalos de tempo, deve-se utilizar preferencialmente uma escala logarítmica, uma vez que o modelo já pré-estabelece.

Vale destacar que este modelo não exige o cumprimento de todos os períodos relativos à incubação, sendo considerável a incubação da amostra até o instante em que pelo menos uma das propriedades alcance um nível de degradação máximo preestabelecido, pausando assim o ensaio na estufa e para as demais é realizado a extrapolação dos dados por meio de equações de regressão para que se obtenha os devidos tempos críticos. Para tanto, é necessária a adoção de um método de interrupção do envelhecimento para cada propriedade estudada e, ainda, após o envelhecimento deve ter a realização de ensaios de caracterização a fim de se verificar o efeito da degradação nas propriedades.

Com a aplicação do modelo de Arrhenius foi realizada a confecção de gráficos de dispersão referentes às propriedades aplicadas como critérios para o envelhecimento e aos tempos de incubação das amostras. É relevante destacar que os gráficos plotados são referentes as principais propriedades físicas, penetração, ponto de amolecimento e viscosidade, que são afetadas pelo fenômeno; além do mais, para as três temperaturas utilizadas para representar o modelo (100°C, 135°C e 163°C).

O desenvolvimento destes gráficos tem como intuito melhorar a visualização das mudanças das propriedades em decorrência do envelhecimento, possibilitando assim checar quais das propriedades atingiriam o valor limite primeiro, sendo que, no momento que se atingia este valor, o ensaio era finalizado para as demais propriedades. Cada gráfico deve receber uma linha de tendência contendo uma equação representativa e o valor de coeficiente de determinação R^2, conhecido também como coeficiente de correlação de Pearson.

A partir desta equação que simboliza a linha de tendência é possível determinar o tempo necessário para atingir o valor limite preestabelecido de cada propriedade, sendo que este processo reduz erros passiveis de ocorrer quando comparados a uma análise meramente visual dos gráficos. Entretanto, para se obter resultados mais fidedignos, foi primordial ter uma linha de tendência que melhor se ajustasse ao gráfico de cada propriedade e, ainda, analisar o valor proposto para R^2.

Por meio destes gráficos, foi possível obter os tempos de reação para uma determinada propriedade e de suas respectivas temperaturas, sendo possível assim, plotar os gráficos que representam o modelo de Arrhenius. Os dados sustentados no eixo das ordenadas foram relativos ao logaritmo natural 1/t referente a razão de reação ou inverso do tempo de reação, expresso em minutos, enquanto no eixo das abscissas foram os valores referentes à 1/T, ou seja, o inverso da temperatura, dada em Kelvin.

Portanto, para se determinar de forma precisa os seus valores realizou apenas a multiplicação do coeficiente angular da reta pela constante universal dos gases (R = 8,314 J/mol K) e, também aplicou a função exponencial no coeficiente linear da reta, obtendo as constantes "Eact (J/mol)" e "A (1/min)".

Simultaneamente à linha de tendência, também foi adicionado o coeficiente de determinação R^2, sendo considerado um parâmetro de grande relevância capaz de classificar o desempenho do modelo de Arrhenius, uma vez que este se refere a uma medida do grau de relação entre os dados analisados.

Vale salientar que para cada ligante asfáltico estudado após o envelhecimento, CAP 50/70, CAP 50/70 + BMP, CAP 50/70 + SBS além do CAP velho com adição de 20% de AR-5; foram construídos três modelos, sendo que cada qual diz respeito a uma das principais propriedades físicas, ou seja, são quatro materiais *versus* três parâmetros perfazendo um total de 12 modelos de envelhecimento.

3.2 Utilização do modelo de Arrhenius para o controle de qualidade em misturas asfálticas

Como esta pesquisa trata de quatro tipos de ligantes distintos, faz-se necessária a criação de quatro curvas de análise tempo *versus* temperatura, aqui chamadas de curvas de controle de qualidade, estando uma para cada tipo de ligante e apresentando as três propriedades físicas estudas. As informações presentes nestas curvas servirão como suporte para que as especificações recomendadas pela ANP sejam respeitadas, assegurando assim, que as misturas asfálticas não cheguem ao campo com as suas propriedades já prejudicadas.

A princípio, para a produção das curvas foi necessário extrapolar as temperaturas de aquecimento dos ligantes asfálticos e empregá-las nas equações matemáticas obtidas em cada modelo para, assim, obter os tempos de exposição conforme as propriedades estudadas. Segundo Koerner [35] é necessário limitar a extrapolação da temperatura a 40°C abaixo da menor temperatura de incubação em laboratório, uma vez que em elevadas temperaturas as reações químicas podem não se apresentarem da mesma forma quando comparadas a temperaturas inferiores. Nos ensaios já realizados as temperaturas foram extrapoladas dentro da faixa limite de 60ºC e 200ºC, visto que dentro da estufa RTFOT a menor e a maior temperatura de incubação foi de 100ºC e 163ºC, respectivamente.

Convém mencionar que antes da inserção das temperaturas excedidas nas equações de cada modelo, foi

preciso realizar alguns ajustes, uma vez que o modelo estabelece que a variável independente se expresse na forma de 1/T, a qual é dada em Kelvin. Da mesma forma, foi necessário adequar às unidades de medida normalmente utilizadas nas usinas para se obter os tempos para cada temperatura, sendo que estes são obtidos pelo modelo no formato de logaritmo natural de 1/t expresso em minutos.

A posteriori, foram estruturadas tabelas com a finalidade de facilitar a visualização do comportamento das propriedades acerca das variações tanto das temperaturas, quanto dos tempos de exposição às mesmas e, além do que, estas servem de base para a confecção das curvas de controle de qualidade.

As curvas de controle de qualidade foram produzidas com base nos gráficos de dispersão, visto que os valores referentes as temperaturas de exposição, expressas em °C, integraram o eixo das abcissas, enquanto o eixo das ordenadas foram representados pelos tempos máximos de exposição à dada temperatura, dados em horas.

4. RESULTADOS

Os resultados encontrados nos experimentos foram realizados por meio de ensaios de caracterização e do ensaio que simula o envelhecimento a curto prazo utilizando a estufa RTFOT, previamente realizados pelo Laboratório de Infraestrutura da UnB, permitindo assim verificar se os materiais em estudo apresentavam-se condizentes as especificações previstas em Resoluções pelas ANP, sendo possível afirmar que tais ligantes encontram-se em conformidade para comporem misturas asfálticas e, por conseguinte, serem utilizados nos serviços de pavimentação.

Os modelos de envelhecimento referentes aos materiais do CAP, CAP+BMP e CAP+SBS já foram analisados e publicados em outras pesquisas citadas anteriormente. Sendo que, para a presente pesquisa foi adicionada a análise do CAP rejuvenescido com a adição de AR-5.

A partir dos dados disponibilizados por Silva e Farias [10] a respeito do CAP 50/70 rejuvenescido a partir da aplicação de 20% de AR-5 foi realizada a análise de suas características iniciais assim como as características após a incubação na estufa RTFOT para fins de estudo do envelhecimento do ligante.

4.2 Modelo de envelhecimento referente ao CAP 50/70 rejuvenescido com adição de 20% de AR-5

O estudo do envelhecimento é realizado a partir da caracterização do ligante após a incubação em diferentes temperaturas e deste modo havendo a mudança das propriedades causada pela perda de voláteis e oxidação sofrida no processo. Houve também o aumento da temperatura de amolecimento, menor ductilidade, aumento da consistência e menor recuperação elástica do que inicialmente.

Desta forma, os resultados obtidos para o material rejuvenescido demonstram o desgaste devido ao aquecimento em altas temperaturas simulando a situação de campo onde o ligante é usinado, transportado e compactado afetando assim a vida útil do material. Os tempos necessários para alcançar os valores limites de cada propriedade, que neste caso foram utilizados os mesmos limites para o CAP 50/70 preconizados pela ANP, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Tempos limites encontrados após o ensaio de envelhecimento em curto prazo do CAP + 20% AR-5.

Temperatura (°C)	Tempos necessários para alcançar o valor limite estabelecido pela ANP (h)					
	Penetração (dmm)		Ponto de Amolecimento (°C)		Viscosidade (cP)	
100	Limite: 37,5 dmm	53	Limite: 54 °C	10,4	Limite ANP: 427,5 cP	21,35
135		25		5,8		13,1
163		9,1		2,8		8,2

Após a obtenção dos tempos limites expostos na Tabela 2 e com suas respectivas temperaturas de incubação foi possível aplicar o modelo de Arrhenius para as propriedades físicas em estudo. Nesta análise do CAP rejuvenescido foram elaborados 3 modelos de envelhecimento, sendo um modelo para cada uma das três principais propriedades que sofrem influência direta ao decorrer do envelhecimento.

A obtenção das constantes do modelo de Arrhenius “A” e “Eact” se deu a partir da equação gerada pela

linha de tendência linear, onde os valores do coeficiente angular e linear correspondem, respectivamente, aos valores de "(Eact/R)" e "Ln A" da equação do modelo. A Tabela 3 apresenta os valores obtidos para as constantes, que em seguida serão utilizadas para a construção das curvas de controle e qualidade.

Tabela 3: Constantes obtidas pela aplicação do modelo de Arrhenius.

Propriedade	Constantes de Arrhenius		R^2
	"Eact" (J/mol)	"A" (l/min)	
Penetração	-37062,9806	44,84	0,9634
Ponto de amolecimento	-27622,4336	11,2111	0,9707
Viscosidade	-20341	0,53794	0,9909

Os modelos confeccionados demonstram condições satisfatórias e cabíveis de formalizar conclusões a respeito do comportamento dos ligantes durante a usinagem e a aplicação de misturas asfálticas, uma vez que todos os coeficientes de correlação de Pearson apresentaram valores superiores a 0,90.

4.3 Curva de controle de qualidade

Com o objetivo de prevenir os efeitos do envelhecimento sob os ligantes asfálticos na fase responsável por 80% do envelhecimento, ou seja, na fase de usinagem, transporte e compactação elaborou-se curvas que relacionam o tempo máximo de exposição *versus* temperatura de exposição para que essas possam auxiliar o controle de qualidade das misturas asfálticas. Para isto foram utilizados os modelos de envelhecimento das propriedades físicas obtidos anteriormente a partir do modelo de Arrhenius, sendo que estes possuem os mesmos fatores que influenciam diretamente no envelhecimento, como o tempo e a temperatura de exposição.

Para a confecção das curvas fez-se necessário extrapolar as temperaturas em 40°C acima e abaixo (ficando assim entre os valores de 60°C aos 200°C) dos valores utilizados no processo de incubação das amostras na estufa RTFOT, para que então fosse possível aplicar essas temperaturas nas equações obtidas pelo método de Arrhenius e assim obtendo os tempos máximos de exposição para uma dada temperatura.

Com o intuito de se obter resultados que simulem a situação em campo as temperaturas utilizadas para a confecção das curvas de controle de qualidade foram as mais próximas possíveis das que são aplicadas em usinas. Assim, as curvas de tempo de exposição *versus* temperatura de exposição na faixa de 100° a 180°C são apresentadas na Figura 4.

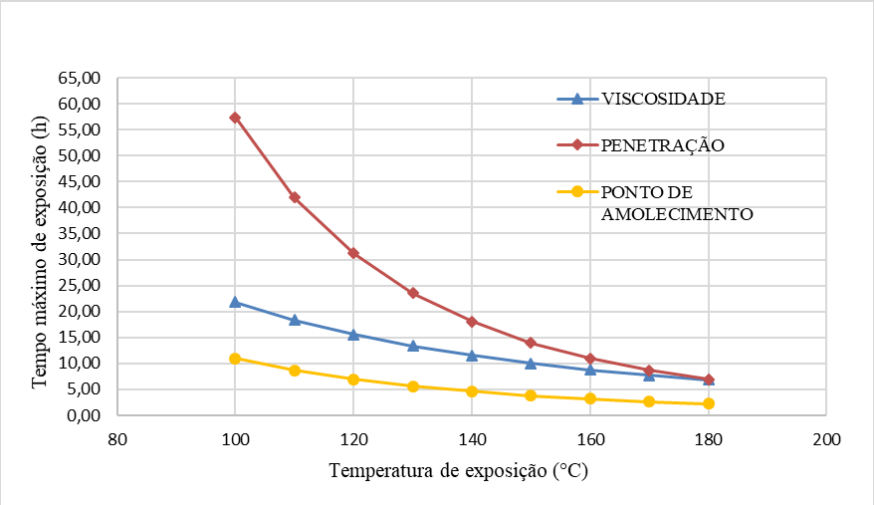

Figura 4: Curva temperatura de exposição *versus* tempo máximo de exposição para CAP rejuvenescido com 20% AR-5.

A partir do resultado das curvas de controle de qualidade é importante ressaltar que, a fim de respeitar os limites preconizados pela ANP, deve-se seguir os tempos máximos de exposição que o ligante em estudo pode ficar exposto a determinada temperatura, durante a fase de usinagem até o momento em que é aplicado

em campo. Deste modo não é comprometido a integridade do material no que se trata do envelhecimento do mesmo, assim garantindo uma vida útil conforme previsto para os revestimentos asfálticos.

5. DISCUSSÃO

Com o intuito de fazer a análise dos diferentes tipos de ligantes em estudo foi realizado a confecção dos modelos de envelhecimento a partir dos dados disponibilizados por Silva, Farias e Abrahim [31], Silva e Araújo [29] acrescentando a análise do CAP rejuvenescido nesta presente pesquisa. As curvas de tempo de exposição *versus* temperatura máxima de exposição para os materiais CAP 50/70, CAP modificado com SBS e o CAP modificado com BMP são apresentadas, respectivamente na Figura 5, Figura 6 e Figura 7.

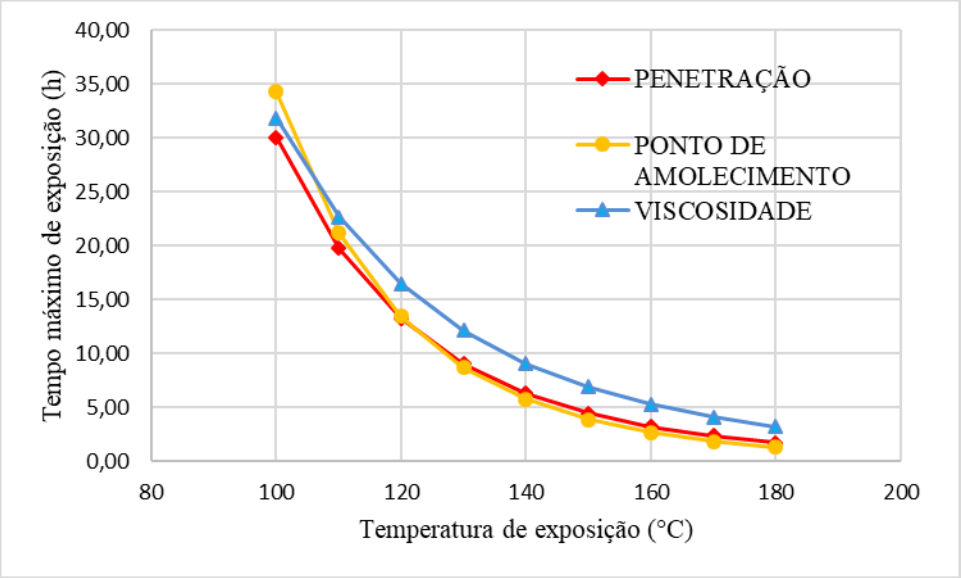

Figura 5: Curva temperatura de exposição *versus* tempo máximo de exposição para CAP 50/70.

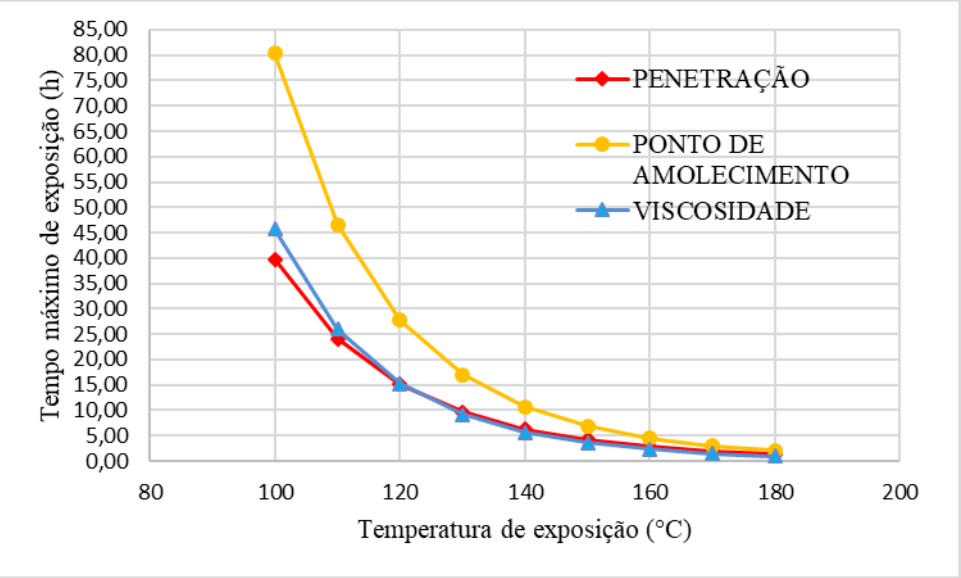

Figura 6: Curva temperatura de exposição *versus* tempo máximo de exposição para CAP modificado com SBS.

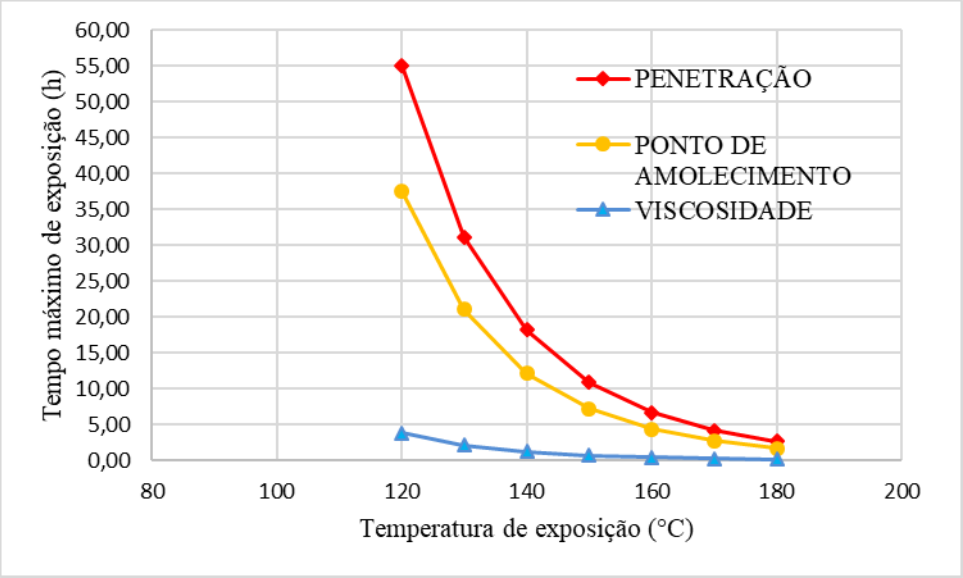

Figura 7: Curva temperatura de exposição *versus* tempo máximo de exposição para CAP modificado com BMP.

De acordo os resultados obtidos por Silva, Farias e Abrahim [31], Silva e Araújo [29] e com a fixação da temperatura de exposição na faixa daquela utilizada em campo (160°C), tornou-se possível a visualização dos tempos máximos de exposição para esta devida temperatura, deste modo, o comportamento de cada ligante asfáltico pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4: Tempo de exposição referente à temperatura de 160°C para os diferentes ligantes asfálticos.

Ligante Asfáltico	Tempos de exposição (h)		
	Penetração	Ponto de amolecimento	Viscosidade
CAP Rejuvenescido com 20% AR-5	10,96	3,19	8,79
CAP 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

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4, observa-se que o CAP rejuvenescido quando exposto à temperatura de 160°C, pode permanecer sob esta condição por, no máximo, 3,19 horas (3h e 11 min) para que se garanta os valores limites preconizados pela ANP e neste caso a propriedade preponderante foi o ponto de amolecimento que seu limite era de 54°C. Quando comparado com o resultado do CAP 50/70 nota-se uma diferença no tempo máximo de exposição sendo que a propriedade limitante ainda é o ponto de amolecimento, mas agora com tempo máximo de 2,67 horas (2h e 40min), ou seja, com a aplicação do agente rejuvenescedor AR-5 em uma porcentagem de 20% é possível estender o tempo de usinagem do ligante asfáltico.

Os demais ligantes apresentam tempos máximos de exposição menores que o CAP rejuvenescido e o CAP 50/70, sendo que de acordo com Silva e Araújo [29], o CAP modificado com BMP possui um tempo de 0,45h (27min) e, deste modo, torna-se inviável realizar todas as atividades referentes a usinagem e consequentemente a aplicação da mistura asfáltica. Contudo, apesar da alta susceptibilidade ao envelhecimento, de acordo com Oda [18] a borracha funciona como um acessório de durabilidade, diminuindo a degradação do piso asfáltico e aumentando assim sua durabilidade.

Diante dos resultados expostos na Tabela 4, observa-se que, entre os ligantes asfálticos estudados o CAP rejuvenescido se torna uma opção viável para aplicação nos serviços de pavimentação, sendo que mesmo em regiões onde a temperatura se torna um fator primordial para o manuseio destes materiais, ele apresenta menos susceptibilidade ao envelhecimento por estar exposto à temperatura de 160°C. O resultado da análise do envelhecimento corrobora com pesquisas realizadas por Silva e Farias [10] e Zanette, Moreno e Del Carpio [34], visto o CAP rejuvenescido com a aplicação de 20% de AR-5 demonstrou eficiência maior que o CAP 50/70, se tratando do envelhecimento em curto prazo.

Contudo, os resultados apresentados na presente pesquisa não excluem a utilização dos demais ligantes

no serviço de pavimentação, pois a pesquisa limitou-se a estudar apenas os ligantes e não seu desempenho dentro de uma mistura asfáltica. Entretanto, a escolha de utilização destes ligantes seja por razões econômicas ou técnicas deve se atentar às curvas de controle de qualidade dos mesmos, podendo assim, prevenir e minimizar os efeitos atenuantes do envelhecimento em curto prazo da mistura asfáltica, garantindo assim, uma vida útil prolongada para o pavimento asfáltico.

6. CONCLUSÃO

Apesar da presente pesquisa não apresentar resultados para o envelhecimento ao longo prazo (ensaio PAV), que simulam o comportamento dos ligantes ao longo de sua vida útil, os resultados aqui apresentados são capazes de determinar o ligante apropriado para o uso em regiões de temperatura elevada, pois se este material for devidamente controlado em questão de tempo de exposição a essas temperaturas serão reduzidos os efeitos do envelhecimento em curto prazo (fase de usinagem do material, correspondente a 80% do envelhecimento total). Isso demonstra a relevância dos estudos dos mecanismos de envelhecimento, já que se realizado o controle em curto prazo há um ganho de vida útil durante a utilização do material nos pavimentos.

Os ligantes asfálticos estudados (CAP 50/70, CAP modificado com SBS, CAP modificado com BMP e o CAP rejuvenescido com 20% de AR-5) apresentaram resultados satisfatórios atendendo às especificações gerais preconizadas pela ANP. Além disto, o CAP velho que foi rejuvenescido com 20% de AR-5 foi o material que demonstrou a maior eficiência em relação ao envelhecimento em curto prazo, apresentando valores não só similares, mas até de maior eficiência que CAP 50/70.

A partir do desenvolvimento do trabalho constatou-se que, por meio da extrapolação de dados provenientes do modelo de Arrhenius tornou-se possível realizar o controle de tempo máximo que os ligantes estudados podem ser expostos a determinadas temperaturas sem que estes atinjam os valores limites, normatizados pela ANP, das principais propriedades físicas (penetração, ponto de amolecimento e viscosidade). Sendo possível assim, confeccionar as curvas de tempo máximo de exposição *versus* temperatura de exposição, tendo assim modelos para que se possa controlar a qualidade dos ligantes asfálticos no que diz respeito ao envelhecimento de curto prazo, e por sua vez tendo um ganho de vida útil.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade de Brasília e aos pesquisadores João Paulo Souza Silva, Márcio Muniz de Farias, Isabela Araújo Abrahim e Raíssa Faria de Araújo pela disponibilização dos resultados experimentais e à Universidade Federal de Goiás – UFG pela oportunidade do desenvolvimento deste trabalho durante a fase de Trabalho de Conclusão de Curso no curso de Engenharia Civil.

8. BIBLIOGRAFIA

[1] BERNUCCI, L.B., MOTTA, L.M., CERATTI, J.A.P., SOARES, J.B., *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*, Rio de Janeiro, Petrobrás, ABEDA, 2006.

[2] SOBREIRO, F.P., "*Efeito a adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com polímero SBS",* Tese de D.Sc., Programa de Doutorado em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

[3] GAMA, D.A., ROSA, J.M., DE MELO, T.J.A., *et al*., "Rheological studies of asphalt modified with elastomeric polymer", *Construction and Building Material*, v. 106, pp. 290-295. 2016.

[4] XIAO, F., AMIRKHANIAN, S., WANG, H., *et al.,* "Rheological property investigations for polymer and polyphosphoric adic modified asphalt binders at high temperatures", *Construction and Building Materials*, v. 64, pp. 316-323. 2014.

[5] OLIVEIRA, N.K.A., NETA, D.S.R., BATISTA, L.S., *et al*., "Análise do ligante asfáltico modificado com borracha moída de pneu", In: *2° Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade*, Foz do Iguaçu, Paraná, 28-30 maio 2019.

[6] NEVES FILHO, C.L.D., "*Avaliação laboratorial de misturas asfálticas SMA produzidas com ligante asfalto-borracha",* Tese de M.Sc., Programa de Mestrado em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

[7] MORILHA, A.J., "*Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas",* Tese de M.Sc., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

[8] WHITEOAK, D., *SHELL Bitumen Handbook,* SHELL, Inglaterra, 1990.

[9] SILVA, L.S., "*Contribuição ao estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos. Influência da adição de polímeros e comportamento frente a radiação UV"*, Tese de D.Sc. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

[10] SILVA, J.P.S., FARIAS, M.M., "Avaliação química e ambiental de misturas asfálticas rejuvenescidas", *Revista Matéria,* v. 23, n. 3, pp. 1-15. 2018.

[11] OSMARI, P.G., ARAGÃO, F.T.S., "Avaliação do resíduo de óleo vegetal como agente rejuvenescedor de ligantes a partir de análises reológicas e de morfologia de superfície", *Revista Transportes*, v. 24, n. 3, pp. 48-54, Out. 2016.

[12] FERNANDES, M.R.S., FORTE, M.M.C., LEITE, L.F.M., "Caracterização de Asfaltos Modificados com SBS", In: *18º Reunião Anual de Pavimentação*, Manaus, 2007.

[13] COSTA, C.G., "*Incorporação do resíduo oriundo do beneficiamento de caulim em concreto asfáltico*". Tese de M.Sc., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

[14] MACIEL, E.R., *"O emprego de borracha termoplástica tipo estireno-butadieno-estireno em cimentos asfálticos de petróleo",* Tese de M.Sc. Programa de Mestrado em Ciência de Tecnologia de Materiais, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

[15] AMARAL, S.C., *"Estudos de misturas asfálticas densas com agregados do estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (Betuflex B 65/60)",* Tese de M.Sc., Departamento de Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

[16] ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDUSTRIA DE PNEUMÁTICOS, http://www.anip.com.br, acessado em março de 2019.

[17] DANTAS NETO, S.A., *"Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas Asfálticas Modificados com Borracha Granulada de Pneus Usados"*, Tese de D.Sc., Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

[18] ODA, S., "Aplicação De Asfalto-Borracha na Bahia", In: *3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gá*s, pp. 1-22, Bahia. 2005.

[19] MENDES, G.C.R., GUEDES, L.G.R., D'OLIVEIRA, J.L.P., "Economicidade da aplicação do asfalto borracha da pavimentação urbana: Estudo de caso em Goiânia", In: *7th International Workshop | Advances in Cleaner Production – Acadmic Work,* pp. 1-8, Barraquilha, Colômbia, Jun. 2018.

[20] ANP, Agência Nacional de Petróleo. Resolução ANP Nº19, de 11 de julho de 2005.

[21] ANP, Agência Nacional de Petróleo. Resolução ANP N°32, de 21 de setembro de 2010.

[22] ANP, Agência Nacional de Petróleo. Resolução ANP Nº39, de 24 de dezembro de 2008.

[23] LIMA, A.T., "*Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente*", Tese de M.Sc., Programa de Mestrado em Engenharia de em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

[24] GRECO, J.A.S., *"Análise 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",* Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

[25] TONIAL, I.A., *"Influência do envelhecimento do revestimento asfáltico na vida de fadiga de pavimentos"*, Tese de M.Sc., Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

[26] SILVA, J.P.S., "*Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas"*, Tese de D.Sc., Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

[27] LEVINE, I.N., *Physical Chemistry*, 6 ed., McGraw Hill – Higher Education, 2009.

[28] COLMANETTI, J.P., *"Estudos sobre a aplicação de geomembrana na impermeabilização da face de montante de barragens de enrocamento"*, Tese D.Sc., Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

[29] SILVA, J.P.S., ARAÚJO, R.F., "Estudos do envelhecimento dos ligantes asfálticos a partir do modelo de Arrhenius", *Revista Desafios*, v. 3, n. 1, pp. 107-120. 2016.

[30] ARAÚJO, R.F., *"Estudo do envelhecimento dos ligantes asfálticos a partir do modelo de Arrhenius"*, Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2015.

[31] SILVA, J.P.S., FARIAS, M.M., ABRAHIM, I.A., "Avaliação do efeito do calor e do ar no envelhecimento de ligantes asfálticos utilizando o Modelo de Arrhenius", In: *Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, Exposição Internacional de Produtos para Rodovias - CBR&C e BRASVIAS*, pp. 10-11, Foz do Iguaçu. 2011.

[32] LEITE, L.F.M., CAPUDI, G.G., JUNIOR, F.A., *et al*., "Emprego do Resíduo Pesado de Óleo de Xisto como Agente de Reciclagem para Asfaltos", In: *10º Encontro de Asfalto IBP*, Rio de janeiro. 1990.

[33] DNC. *Portaria DNC nº44*. Departamento Nacional de Combustíveis, 1997.

[34] ZANETTE, C.C., MORENO, K.R., DEL CARPIO, J.A.V., "Uso do agente rejuvenescedor AR-5 na produção de misturas asfálticas 100% recicladas – resistência à tração", In: *Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, pp. 1-13, João Pessoa. 2016.

[35] KOERNER, R.M., LORD, A.E.Jr., HSUAN, Y.H., "Arrhenius modeling to predict geosynthetic degradation", *Geotextiles and Geomembranes*, v. 11, n. 2, pp. 151-183. 1992.

ORCID

Raphael Pires da Silva https://orcid.org/0000-0002-2262-1399

João Paulo Souza Silva https://orcid.org/0000-0003-3297-8276