

Estudo da incorporação de argilas montmorilonitas em cimentos asfálticos de petróleo

Study of incorporation of clay montmorillonites in petroleum asphalt cement

Karine Pereira dos Santos¹, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena¹,
Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena¹, José de Arimatéia Almeida e Silva¹,
Stephanny Conceição Farias do Egito Costa¹

¹ Laboratório de Pavimentação - LEP – UFCG CEP: 58429 – 900, Campina Grande, PB
e-mail: karinepsantos@gmail.com; lucenaafb@uol.com.br; ledach@uol.com.br; arimateia.allmeida@gmail.com; stephanny_egito@hotmail.com

RESUMO

A utilização de nanotecnologia em pavimentos asfálticos é uma revolução, pois esta permite construir pavimentos mais resistentes à deformação, à trinca por fadiga, à trinca por temperatura e à ação da água. Nesse contexto uma alternativa é o uso da nanoargila. Sua incorporação ao cimento asfáltico de petróleo (CAP) proporciona melhoria nas propriedades físicas e reológicas e nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Para o desenvolvimento deste trabalho utilizou-se o método da dosagem SUPERPAVE para a análise do comportamento das misturas asfálticas utilizando o CAP 50/70 modificado com as seguintes adições: Argila Montmorilonita organofílica (OMMT) e a Argila Montmorilonita pura (MMT). Foram analisados os efeitos dos modificadores por meio de ensaios mecânicos de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência, sendo todas as amostras submetidas ao processo de compactação por amassamento. Os resultados indicaram que as adições das argilas OMMT e MMT as misturas asfálticas promoveram aumento no valor do Módulo de Resiliência e da Resistência à Tração quando comparados ao ligante asfáltico sem modificador.

Palavras-chave: nanotecnologia, pavimentos asfálticos, propriedades mecânicas, resistência à tração, módulo de resiliência.

ABSTRACT

The use of nanotechnology in asphalt pavements is a revolution. Its use provides the raising of durability and resistance to cracks developing on the pavement. In this context as an alternative is the use of nanoclay. The incorporation of nanoclay in petroleum asphalt cement (PAC) provides improvement in the physical, rheological and mechanical properties of asphalt mixtures. In this study, it was used the SUPERPAVE method for analyzing the behavior of asphalt mixtures which takes the PAC 50/70 modified with the following additions: organophilic modified Montmorillonite(OMMT) and the pure Montmorillonite clay (MMT). In the tests of Tensile Strength and Resilient Modulus, the results indicated that the additions of OMMT and MMT clays caused an increase in the values, when it is compared to unmodified asphalt binder

Keywords: nanotechnology, asphalt pavements, mechanical properties, tensile strength, modulus of resilience.

1. INTRODUÇÃO

Nos pavimentos asfálticos, os principais defeitos causados pelo tráfego, tanto pelo aumento no número de veículos quanto pelo aumento da carga dos mesmos, são a fadiga e a deformação permanente. Pesquisas científicas, cada vez mais, buscam estudar a ocorrência desses defeitos, e uma das opções é a introdução no mer-

cado de vários tipos de aditivos para ligantes asfálticos e para as misturas asfálticas, com o intuito de melhorar a qualidade do ligante asfáltico e conseqüentemente, aprimorar o desempenho do pavimento.

Um dos materiais que influenciam na escala nano, que têm sido estudados para a aplicação em pavimentos asfálticos, são as nanoargilas, que são a nova geração de argilas processadas de interesse em uma ampla gama de materiais compósitos de alto desempenho. Em outras palavras, nanoargila é definida como uma argila que pode ser modificada para tornar a sua estrutura compatível com monômeros e polímeros orgânicos.

As principais vantagens do uso de nanotecnologia em pavimentação estão em construir pavimentos mais resistentes à deformação, à trinca por fadiga, à trinca por temperatura e à ação da água. Além disso, a modificação de asfalto com nanomateriais normalmente não requer o uso de instrumentos sofisticados. Fazer uso de um moinho coloidal ou de um misturador mecânico para melhorar a dispersão é normalmente suficiente para realizar a modificação com nanomateriais, sendo esse o equipamento que se emprega tradicionalmente para modificar asfalto com polímero.

Os materiais que foram objeto de estudo neste trabalho são a Argila Montmorilonita pura (MMT: *Montmorillonite*) e a Argila Montmorilonita organofílica (OMMT: *Organomodified Montmorillonite*). Essa última argila é um material que tem sido bastante estudado do ponto de vista da nanotecnologia e tem como função melhorar as propriedades reológicas dos materiais aos quais são incorporados. As Misturas Asfálticas realizadas nesta pesquisa são do tipo CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente), onde a curva granulométrica apresenta um esqueleto mineral com poucos vazios, ou seja, uma mistura com partículas. Utilizando-se do método da dosagem SUPERPAVE (*Superior PERFORMANCE PAVEMENTS*), o comportamento das misturas asfálticas utilizando o CAP 50/70 (Cimento Asfáltico de Petróleo) foi comparado com o comportamento mecânico (resistência à tração indireta por compressão diametral e módulo de resiliência) de misturas asfálticas onde foi utilizado o CAP 50/70 modificado com as argilas MMT e OMMT.

Ressalta-se a importância dos estudos voltados para a modificação do ligante asfáltico com as argilas montmorilonita, ramo ainda pouco estudado. A análise das propriedades mecânicas, de misturas asfálticas produzidas com ligantes modificados em laboratório foi investigada, a fim de verificar os benefícios da adição dos modificadores ao ligante asfáltico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Misturas asfálticas

O CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) é uma mistura de hidrocarbonetos, que possui de 90 a 95% hidrocarbonetos e de 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e os metais vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio), derivados de petróleo (provém da destilação do petróleo), de consistência variável (semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a 170 altas temperaturas), com cor pardo-escura, com poder aglutinante (adesivo termoviscoelástico), impermeável à água e pouco reativo. O comportamento mecânico do CAP é função das características termoviscoelásticas e depende da temperatura de serviço, velocidade, tempo e intensidade do carregamento (BERNUCCI *et al.*) [3].

De acordo com MOTTA *et al.*, [10] o concreto asfáltico (também chamado de CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente ou CAUQ - Concreto Asfáltico Usinado a Quente) é um material de pavimentação constituído de CAP e agregado mineral. O CAP atua como elemento de ligação, colando as partículas minerais e formando uma massa coesa. Como o CAP é insolúvel em água, também atua como um agente impermeabilizante da mistura.

O esqueleto mineral, quando misturado ao CAP, forma um sistema resistente ao impacto. Como o CBUQ contém tanto agregado mineral quanto ligante asfáltico, o comportamento da mistura é afetado tanto pelas propriedades de seus componentes individuais, quanto pela relação entre eles.

Podem-se enumerar os principais fatores que influenciam no comportamento das misturas asfálticas durante a fase de dosagem:

- Granulometria da mistura dos agregados;
- Temperatura e viscosidade do asfalto;
- Quantidade de asfalto usado; e
- Grau de Compactação.

Os revestimentos asfálticos brasileiros, em geral, são projetados para uma vida de serviço de 10 anos. No entanto, alguns defeitos na superfície do pavimento como deformação permanente e trincas, surgem precocemente e podem ter causa nos seguintes fatores: erros de projeto, erros ou inadequação na seleção, dosagem ou na produção de materiais, erros e inadequações construtivas, erros ou inadequações nas alternativas de conservação e manutenção (BERNUCCI *et al.*) [3].

Os defeitos dos pavimentos asfálticos são frequentes em vias urbanas, visto que as solicitações são severas devido à baixa velocidade do tráfego e a mudança frequente de estado (frenagens e acelerações), entre outros aspectos. Os tipos de defeitos chamados de primários que podem ocorrer nos pavimentos são a deformação permanente e a trinca por fadiga.

A deformação permanente é um defeito caracterizado por uma seção transversal que não está em sua posição original. Ela é dita “permanente” pois representa uma acumulação de pequenas parcelas de deformação que ocorrem a cada carregamento. Esta deformação não pode ser recuperada e ocorre nos primeiros anos de vida do pavimento. O afundamento de trilha de roda é a forma mais comum de deformação permanente. (MOTTA *et al.*) [10].

Ainda de acordo com MOTTA *et al.* [10] a trinca por fadiga é um problema que ocorre pela repetição de aplicação de cargas pesadas, sendo um primeiro sinal de fadiga o aparecimento de trincas interrompidas longitudinais ao sentido do tráfego. A trinca por fadiga é um problema progressivo, onde no estágio inicial as trincas iniciais se unem e, pela reação em cadeia, formam mais trincas. No estágio intermediário ocorre o fenômeno chamado de “couro de jacaré” e em alguns casos ocorre o estágio final, onde há a formação de “painéis” e consequentemente a deterioração do pavimento.

2.2 Modificador do ligante

A argila montmorilonita pode ser definida como um argilomineral do grupo das esmectitas, hidrofílica, de granulometria muitíssimo fina (dimensões inferiores a 2 microns) e muito ativo eletroquimicamente. A estrutura cristalina da bentonita (termo comercial para as argilas montmorilonitas) é apresentada na Figura 01.

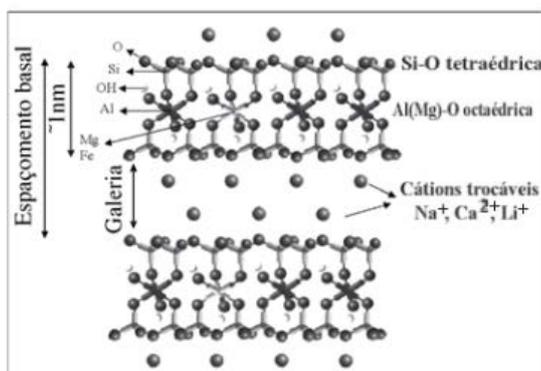


Figura 01: Estrutura cristalina da montmorilonita
Fonte: Paiva *et al.*, [12]

Pertence ao grupo dos filossilicatos 2:1, cujas placas são caracterizadas por estruturas constituídas por duas folhas tetraédricas de sílica com uma folha central octaédrica de alumina, que são unidas entre si por átomos de oxigênio comuns a ambas as folhas (Figura 01). As lamelas da montmorilonita apresentam perfil irregular, são muito finas, tem tendência a se agregarem no processo de secagem e boa capacidade de delaminação quando colocadas em contato com a água. O diâmetro é de aproximadamente 100 nm, a espessura pode chegar até 1nm e as dimensões laterais podem variar de 30 nm a várias micras, podendo atingir aproximadamente 1000. O empilhamento dessas placas é regido por forças polares relativamente fracas e por forças de Van der Waals e entre essas placas existem lacunas denominadas galerias ou camadas intermediárias nas quais residem cátions trocáveis como Na⁺, Ca²⁺, Li⁺, fixos eletrostaticamente e com a função de compensar cargas negativas geradas por substituições isomórficas que ocorrem no reticulado, como por exemplo, Al³⁺ por Mg²⁺ ou Fe²⁺, ou Mg²⁺ por Li⁺. Cerca de 80% dos cátions trocáveis na montmorilonita estão presentes nas galerias e 20% se encontram nas superfícies laterais. (PAIVA, *et al.*) [12].

As argilas do grupo esmectitas, principalmente a montmorilonita, são muito utilizadas na preparação das argilas organofílicas devido às pequenas dimensões dos cristais, a elevada capacidade de troca de cátions, e a capacidade de inchamento em água que fazem com que a intercalação de compostos orgânicos, utilizados na síntese, seja rápida e eficiente (SILVA & FERREIRA) [13].

SILVA & FERREIRA [13] definem as argilas organofílicas como sendo basicamente constituídas por esmectitas que são modificadas com a inserção de substâncias orgânicas entre as camadas estruturais da argila, que apresentam afinidade química com a estrutura cristalina, fazendo com que ocorram expansões entre os planos da argila e, consequentemente, ocorra a perda da característica hidrofílica, tornando-a hidrofóbica.

Os sais quaternários de amônio são, desde os anos 20 do século passado, os principais compostos utilizados para transformação das argilas esmectíticas sódicas em organofílicas. Ao adicionar esses sais às

dispersões aquosas de argilas esmectíticas, esses cátions orgânicos substituem os cátions sódio que são facilmente trocáveis; assim, os cátions quaternários de amônio, com longas cadeias de hidrocarbonetos livres se acomodam entre as camadas 2:1 do argilomineral, tornando-as organofílicas (DIAZ¹, 1994 apud CAVALCANTI) [4].

De acordo com CAVALCANTI [4] quando a montmorilonita torna-se organofílica, esse fenômeno induz à expansão entre os planos da argila e, conseqüentemente, à perda da característica hidrofílica, tornando-as mais estável e diminui sua degradação em conjunto com o aumento da resistência mecânica quando incorporada a outros materiais orgânicos.

A utilização da argila montmorilonita como modificador para o CAP, na busca de melhorar suas propriedades reológicas faz parte dos estudos usando a técnica da nanotecnologia, que na construção civil pode ser entendida como a melhor compreensão dos materiais orgânicos ou inorgânicos, analisando-os em escala nanométrica, desenvolvendo ferramentas micro e nano.

Em um estudo desenvolvido por Yu *et al.*, [14], o CAP foi modificado por meio de um agitador mecânico de alto cisalhamento por um período de duas horas a 3000 rpm. A temperatura do CAP para a modificação foi de 150°C e a argila montmorilonita foi tratada com íons de octadecil amônio para sua modificação. A fim de verificar a estrutura do CAP modificado estes autores realizaram o ensaio de Difração de Raio-X (DRX) que é utilizado para analisar a mineralogia de materiais; na Figura 02.

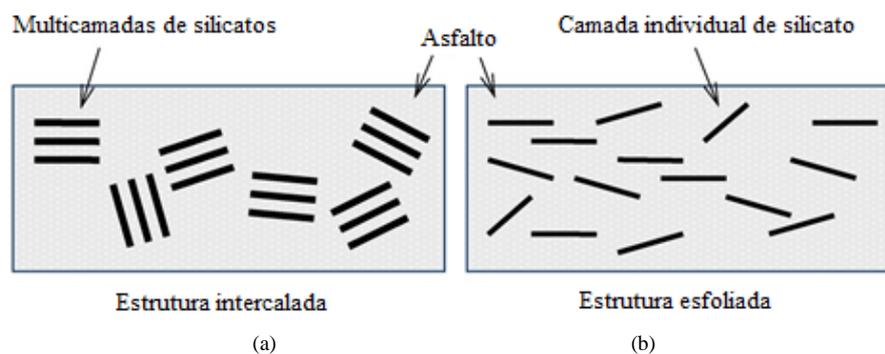


Figura 02: Esquema das estruturas de camadas de silicatos do CAP modificado.

Fonte: Yu *et al.*, [14].

Yu *et al.*, [14] concluíram que o asfalto incorporado à argila pura (MMT) fica intercalado na galeria, formando uma estrutura intercalada (Figura 02-a). Já a argila organofílica (OMMT) no ensaio DSR (*DynamicShearRheometer*), foi observado que o asfalto incorporado pode formar uma estrutura esfoliada. Isso se deve ao fato da MMT ter camadas hidrofílicas com espaços pequenos entre elas, tornando a intercalação e descamiação das camadas mais difícil, enquanto que a OMMT, por ter sido modificada, as camadas já foram ampliadas pelas moléculas orgânicas, onde as camadas podem ser separadas durante o processo de mistura e formar a estrutura esfoliada. Este tipo de estrutura da OMMT fornece melhores benefícios para a inserção de moléculas de asfalto.

Estudos foram realizados por JAHROMI e KHODAII [9] sobre os efeitos da nanoargila nas propriedades reológicas do CAP, utilizando argila *cloisite* (nome comercial da argila montmorilonita importada). Verificou-se a viabilidade de utilização dessa argila para retardar o envelhecimento do asfalto, através do ensaio DSR, fazendo o comparativo do ligante modificado e não modificado. Os resultados dos testes mostraram que houve no asfalto modificado o aumento da rigidez e a diminuição do ângulo de fase e melhora na resistência ao envelhecimento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 CAP

Na pesquisa, foi utilizado o CAP 50-70 por ser o tipo de Cimento Asfáltico de Petróleo mais utilizado na região Nordeste do Brasil. O mesmo foi fornecido pelo laboratório DP-RLAM da cidade de São Francisco do Conde - BA, cujas especificações estão de acordo com a Agência Nacional do Petróleo (ANP).

3.1.2 Agregados naturais

Os agregados graúdos e miúdos utilizados nesse estudo para a composição das misturas asfálticas foram: brita (dimensão máxima de 25,4 mm), brita (dimensão máxima de 19,1 mm), brita (dimensão máxima de 12,7 mm), pó de pedra e areia. Todos os agregados graúdos juntamente com o pó de pedra são materiais britados de origem granítica. Na Figura 03 ilustram-se a aparência dos materiais granulares superpostos de acordo com o tamanho dos grãos.



Figura 03: Materiais granulares

3.1.3 Argila organofílica

A argila purutilizada foi uma argila nacional comercial BRASGEL PA (sódica ativada), da Indústria Bentonit União Nordeste (BUN), localizada na cidade de Campina Grande – PB. A capacidade de troca de cátions (CTC) desta argila é de 90 meq/100g de argila (determinada pelo método de adsorção de azul de metileno (ASTM C 837/2009) [1]. A Figura 04–a apresenta a argila pura utilizada na pesquisa.

A argila organofílica utilizada foi à argila do tipo montmorilonita importada comercial *CloisiteNa+*, naturalmente sódica, beneficiada pela empresa americana *Southern Clay Products, Inc.* A capacidade de troca de cátions é de 92,6 meq/100g de argila (determinada pelo método de adsorção de azul de metileno ASTM C 837/2009) [1]. Argila montmorilonita modificada semelhante à do estudo realizado foi utilizada nos estudos feitos por JAHROMI *et al.* [8], que utilizou como ligante o 60-70, com as seguintes características dessa argila, a saber: Cloisite-15A, com capacidade de troca de cátions (CTC) de 90meq/100g de argila. Na Figura 04–b mostra-se a argila organofílica utilizada na pesquisa.

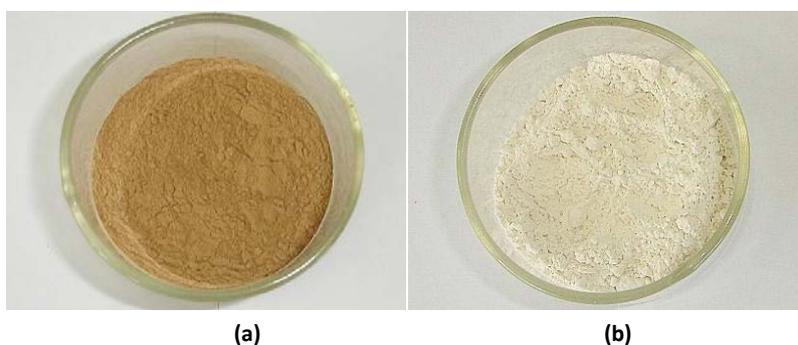


Figura 04: Argilas montmorilonitas: (a) Argila pura (b) Argila organofílica

3.2 Modificação do CAP

Todos os ligantes foram modificados utilizando um agitador mecânico de baixo cisalhamento, que aplica movimentos giratórios por meio de uma hélice de 10 cm de diâmetro. A amostra de CAP foi colocada em um Becker de vidro com capacidade para três litros que fica envolvido por uma manta térmica para manter a temperatura desejada de agitação. O equipamento apresenta a velocidade de rotação e também possui um dispositivo regulador de temperatura, como ilustrado na Figura 05.



Figura 05: Agitador mecânico

Através de testes utilizando o agitador com amostras de CAP, foi possível obter valores com relação à rotação indicada e ao tempo de mistura. A rotação foi estabelecida por ser a máxima alcançada sem que houvesse perda do material durante a mistura. Essa rotação, para todas as modificações, ficou em torno de 400 RPM. O tempo foi determinado como sendo aquele em que visivelmente a mistura CAP + argila apresentasse homogeneidade e ausência de grumos, fixando esse tempo em 30 minutos para uma quantidade de 500 ml de CAP. Os teores de argila montmorilonita pura e organofílica acrescidos ao CAP, para as amostras de 500 ml, foram de 2%, 3% e 4%.

3.3 Misturas asfálticas

3.3.1 Dosagem das misturas asfálticas

O método de dosagem utilizado na pesquisa foi o SUPERPAVE, que utiliza o compactador giratório SUPERPAVE (CGS) para moldagem dos corpos-de-prova. O procedimento SUPERPAVE consistiu na escolha de três composições granulométricas, combinando a granulometria individual dos materiais disponíveis (brita 25,4, brita 19,1, brita 12,7, pó de pedra e areia).

Como se trabalhou com três misturas diferentes, as mesmas foram denominadas: inferior, intermediária e superior. A intermediária (Figura 6) é aquela em que a combinação dos agregados produz uma distribuição granulométrica que não fique próxima dos limites impostos pelos pontos de controle nem da zona de restrição. A inferior passa por baixo da zona de restrição, enquanto que a superior é enquadrada para passar por cima da zona de restrição. De posse das três misturas com seus materiais e respectivas proporções foram plotadas as curvas das misturas enquadrando-as nos pontos de controle e fora da zona de restrição da curva de Fuller.

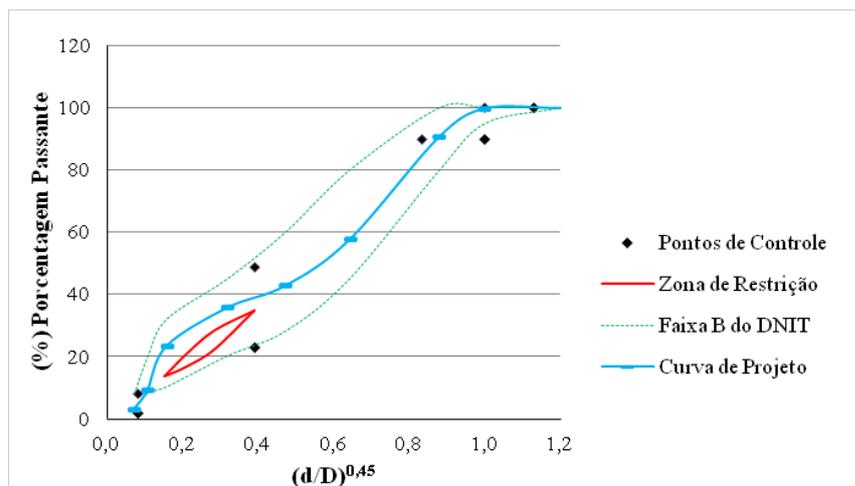


Figura 06: Curva de Fuller da Mistura intermediária para a Faixa B do DNIT

Os corpos-de-prova foram moldados com diferentes esforços de compactação N (número de giros durante a compactação no CGS), sendo eles denominados de inicial, projeto e máximo. Esses parâmetros correspondem ao número de giros especificados na dosagem SUPERPAVE em que o corpo-de-prova será compactado no CGS e são determinados de acordo com o tráfego escolhido para o projeto. Nesse estudo, os valores de N (inicial, projeto e máximo) foram escolhidos para um tráfego médio a alto, e os seus valores são 8, 100 e 160, respectivamente.

Definida a mistura, prosseguiu-se a dosagem para obter o teor de ótimo de CAP, moldando-se oito corpos-de-prova, sendo dois para o teor de CAP estimado da mistura escolhida, e dois para cada variação do teor em $\pm 0,5\%$ e $+ 1,0\%$. Os parâmetros volumétricos foram avaliados como na etapa da seleção da mistura tentativa e foi escolhido o teor de ligante em que o volume de vazios corresponde a 4% no $N_{projeto}$.

3.4 Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas

Os ensaios para a determinação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas com o CAP puro e com os modificados foram obtidos a partir dos resultados obtidos com o auxílio dos procedimentos da dosagem SUPERPAVE, para obtenção da Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral (RT) e do Módulo de Resiliência (MR).

3.4.1 Ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral

O ensaio de Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral Indireta foi realizado segundo a Norma do DNIT ME 138 [7]. Os corpos-de-prova foram preparados para a mistura escolhida (inferior) com o teor ótimo de CAP e com os parâmetros volumétricos obtidos na dosagem SUPERPAVE. Nesta etapa foram moldados corpos-de-prova com misturas asfálticas utilizando o CAP 50-70 de referência e com o CAP modificado com as argilas em estudo (CAP 50-70 + OMMT e CAP 50-70 + MMT) todas compactadas no CGS. Na Figura 07 estão inseridos a sequência de atividades e os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios de Resistência à tração (RT).



Figura 07: Sequência do procedimento para realização do ensaio de Resistência à tração.

O valor da Resistência à Tração (RT) obtido deste procedimento é utilizado para determinar a tensão de tração indireta e a carga compressiva (F) correspondente a ser aplicada na amostra de teste durante as determinações do ensaio de Módulo de Resiliência.

3.4.2 Ensaio de Módulo de Resiliência

O ensaio de Módulo de Resiliência foi realizado de acordo com a Norma da ASTM D 4123/2003 [2]. A força utilizada para o ensaio de Módulo de Resiliência foi correspondente a 10% da Resistência à Tração para cada mistura asfáltica estudada. Os procedimentos realizados para o ensaio estão esquematizados na Figura 08.

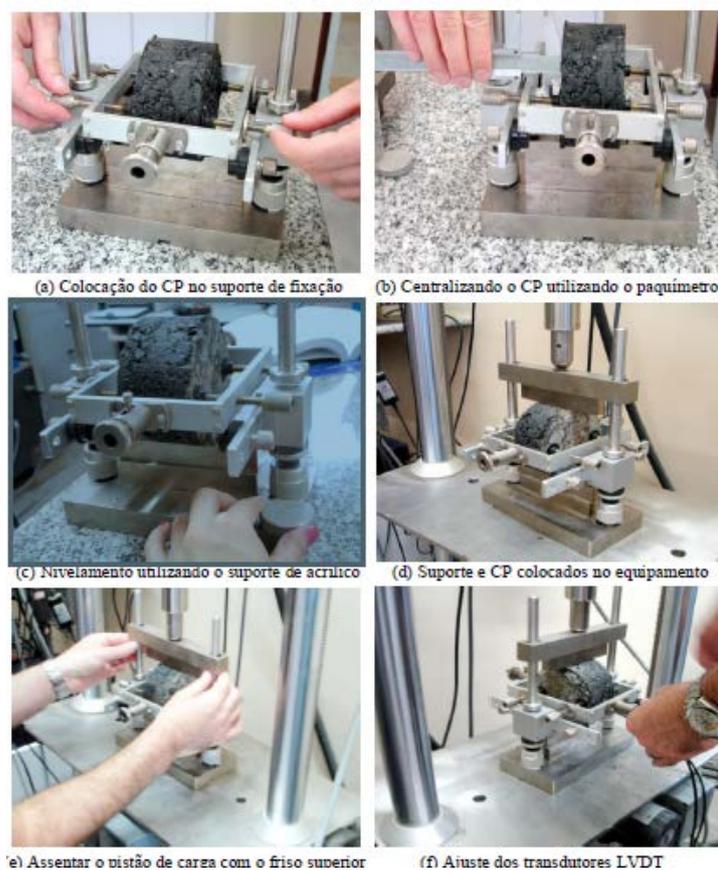


Figura 08: Sequência do procedimento para realização do ensaio de Módulo de Resiliência

O ensaio consiste da aplicação de pulsos de cargas repetidas de duração de 0,1s e repouso de 0,9s, no plano diametral vertical de um corpo-de-prova cilíndrico, sendo a deformação monitorada ao longo do ensaio. Essa carga gera uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação da carga e medidores LVDT (*Linear Variable Differential Transformers*) medem o deslocamento diametral recuperável na direção correspondente à tensão gerada (deslocamento horizontal). Esta aplicação de carga simula o efeito do tráfego, que aplica cargas transientes provenientes do movimento dos veículos. Os ensaios de Resistência à Tração e Módulo de resiliência foram realizados com os corpos-de-prova à temperatura de 25°C.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de Resistência à Tração por compressão diametral e de Módulo de Resiliência para as misturas asfálticas estudadas.

4.1 Resistência à tração

Na Tabela 01 estão apresentados os resultados dos ensaios de Resistência à Tração por compressão diametral para as misturas asfálticas em estudo. Também estão inseridos os resultados do ensaio de Resistência à Tração realizada com os corpos-de-prova após o ensaio do Módulo de Resiliência.

Tabela 01: Resultados do ensaio de Resistência à Tração para as Misturas Asfálticas.

TIPO	Resistência a Tração (MPa)	Resistência à Tração após MR(MPa)	Valor de referência DNIT ES-031/2006
CAP 50-70	1,27	0,68	RT > 0,65 MPa
CAP 50-70 + 2% OMMT	0,98	0,78	
CAP 50-70 + 3% OMMT	1,28	1,06	
CAP 50-70 + 4% OMMT	1,68	0,99	
CAP 50-70 + 2% MMT	1,28	0,76	
CAP 50-70 + 3% MMT	1,72	0,92	
CAP 50-70 + 4% MMT	1,61	1,10	

Como se pode observar, todos os valores de Resistência à Tração obtidos para todas as misturas asfálticas ficaram acima do mínimo preconizado na especificação de serviço ES-031/2006 do DNIT [6], que é de 0,65 MPa. Após realizar o ensaio de Módulo de Resiliência, os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de Resistência à Tração, e como mostrado na Tabela 01, mesmo após este ensaio no qual os corpos-de-prova passaram pelo condicionamento (50 ciclos de carregamento/descarregamento), os valores da resistência à tração por compressão diametral ainda ficaram acima do valor de referência.

Observando o comportamento das misturas asfálticas com os dois modificadores incorporados em relação à Resistência à Tração (Figura 09), foi verificado que os resultados para o CAP modificado com MMT foram maiores do que os obtidos com o OMMT para os teores estudados, com exceção da mistura com o teor de 4%. Os incrementos foram de 30,6% e 34,4% para os teores de 2% e 3%, respectivamente. Pode-se concluir que com a adição dos dois modificadores ao CAP, houve um aumento significativo da RT em relação ao CAP 50-70 de referência, exceção feita apenas a mistura com 2% OMMT.

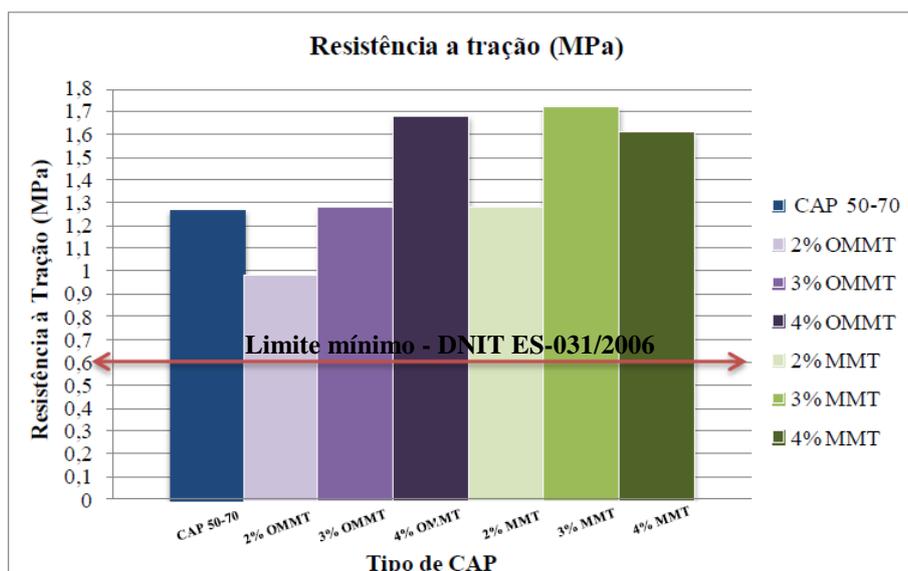


Figura 09: Resultados do ensaio de Resistência à Tração

4.2 Módulo de resiliência

Na Tabela 02 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de Módulo de Resiliência para as misturas asfálticas ensaiadas a 25° C, sendo os resultados obtidos a média de duas leituras para cada corpo-de-prova.

Tabela 02: Resultados do Módulo de Resiliência.

TIPO	Módulo de Resiliência (MPa)	Desvio Padrão	Deformação horizontal recuperável (µm)
CAP 50-70	2329	120,19	5,01
CAP 50-70 + 2% OMMT	3715	81,79	4,39
CAP 50-70 + 3% OMMT	6205	312,24	2,20
CAP 50-70 + 4% OMMT	4560	67,48	4,05
CAP 50-70 + 2% MMT	5381	326,54	2,24
CAP 50-70 + 3% MMT	3939	120,42	4,67
CAP 50-70 + 4% MMT	6621	630,70	5,70

Não há na literatura valores de Módulos de Resiliência para misturas asfálticas com esse tipo de modificador. Porém, de acordo com BERNUCCI *et al.* [4] valores típicos de módulos de resiliência onde as misturas asfálticas são ensaiadas a 25°C estão situados na faixa de 2.000 a 8.000 MPa. Todos os valores de MR encontrados para as misturas asfálticas com e sem modificador estão dentro deste intervalo citado (Tabela 02).

Todos os resultados obtidos de Módulo de Resiliência para as misturas asfálticas com o CAP modificado foram maiores do que o CAP de referência (Figura 10), onde os valores do MR para as misturas com o CAP com a adição da OMMT aumentaram a partir de 59,5% até 166,4% em relação à mistura com o CAP de referência e ainda foram maiores para as misturas contendo o CAP modificado com MMT, onde os resultados obtidos variaram de 69,1% a 188,3%.

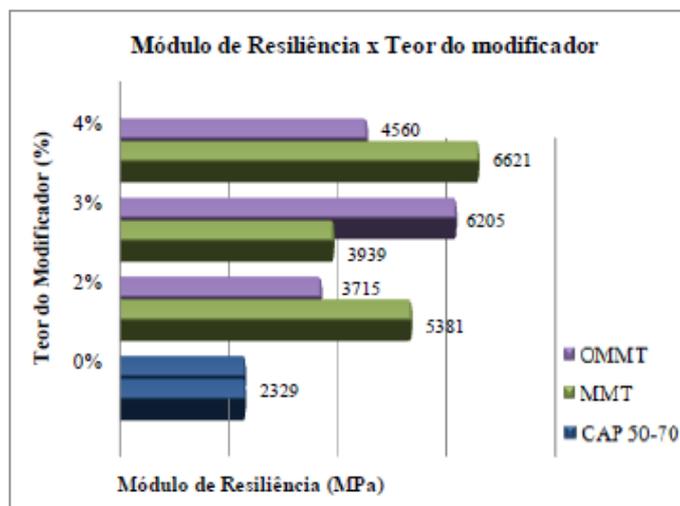


Figura 10: Resultados dos ensaios de módulo de resiliência × tipo de mistura

Segundo DAVID[5], a análise do Módulo de Resiliência não pode ser feita de forma direta, uma vez que ele está relacionado à rigidez da mistura. Valores maiores ou menores de MR podem ser aceitos dependendo da estrutura do pavimento, devendo ser considerada a compatibilidade de deformação entre as camadas que o constituem, principalmente a camada de base.

Para os resultados obtidos nos estudos feitos por JAHROMI *et al.* [8] que utilizou a *cloisite* 15-Anas proporções de 2%, 4% e 7% no CAP, todas as misturas modificadas apresentaram valores de MR maiores do que a mistura com CAP 50-70 de referência, onde esses incrementos variaram de 8% a 40%. Estes autores apresentaram apenas os incrementos do MR, não os valores obtidos. Comparando-se com a faixa de valores encontrados nesta pesquisa (59,5% a 166,4% para a OMMT e 69,1% a 188,3% para a MMT) nota-se um efeito mais significativo das argilas OMMT e MMT no aumento da capacidade resiliente da mistura asfáltica.

A análise da influência da viscosidade no MR apresentada por MARQUES [10] mostra que com o aumento da consistência (viscosidade) do CAP, o módulo tende a aumentar. Mas assim como observado para a RT, os valores não indicam linearidade do MR com a viscosidade. O aumento no estado de rigidez das misturas asfálticas no campo está associado ao aumento adicional de viscosidade provocado pelos efeitos de endurecimento/envelhecimento do material em serviço.

4.3 Relação MR/RT

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência, foi montada a Tabela 03 que apresenta a relação entre esses dois parâmetros, chamada de Relação MR/RT. Essa relação permite avaliar o comportamento das misturas asfálticas com relação ao trincamento. Quanto menor o valor de MR/RT há uma tendência de melhora no comportamento mecânico da mistura, pois une flexibilidade a uma boa resistência a tração. Uma diminuição na relação MR/RT pode ocasionar até a utilização de espessuras menores da camada de revestimento para a mesma vida de fadiga. Como pode-se observar na Tabela 03, esses valores foram melhores para o teor de 4% da OMMT e na de 3% para a MMT.

Tabela 03: Resultados do Módulo de Resiliência e da Resistência à tração.

TIPO	Módulo de Resiliência (MPa)	Resistência à Tração (MPa)	Relação MR/RT
CAP 50-70	2329,00	1,27	1833,86
CAP 50-70 + 2% OMMT	3715,00	0,98	3790,82
CAP 50-70 + 3% OMMT	6205,00	1,28	4847,66

CAP 50-70 + 4% OMMT	4560,00	1,68	2714,29
CAP 50-70 + 2% MMT	5381,00	1,28	4203,91
CAP 50-70 + 3% MMT	3939,00	1,72	2290,12
CAP 50-70 + 4% MMT	6621,00	1,61	4112,42

A razão entre esses dois parâmetros vem sendo usada como um indicador da vida de fadiga das misturas asfálticas, sendo mais desejável um valor pequeno da razão, dado que, com frequência, busca-se uma baixa rigidez para evitar a elevada absorção de tensões que levam ao trincamento prematuro do revestimento e uma alta resistência à tração, uma vez que a mistura vai resistir mais aos esforços de tração.

Na Tabela 04 apresenta-se um comparativo entre os resultados obtidos para a Relação MR/RT com modelos do DNIT PRO 269/94 e de MOTTA & PINTO [11], usando como parâmetro para estimativa indireta do MR os resultados da Resistência à Tração por Compressão Diametral da compactação SUPERPAVE.

Tabela 04: Comparação entre a relação MR/RT com Modelos de previsão.

TIPO	Relação MR/RT da pesquisa	Modelo do DNIT (1994)	Módulo de Resiliência da pesquisa (MPa)	Modelo Motta & Pinto (1994)
		MR = 5000 RT		MR = 4174 RT - 1336
CAP 50-70	1833,8	6400,0	2329	4006,7
CAP 50-70 + 2% OMMT	3790,8	4900,0	3715	2754,5
CAP 50-70 + 3% OMMT	4847,7	6400,0	6205	4006,7
CAP 50-70 + 4% OMMT	2714,3	8400,0	4560	5676,3
CAP 50-70 + 2% MMT	4203,9	6400,0	5381	4006,7
CAP 50-70 + 3% MMT	2290,1	8600,0	3939	5843,3
CAP 50-70 + 4% MMT	4112,4	8050,0	6621	5384,1

Observa-se que a Relação MR/RT do presente estudo apresentou a maioria dos valores situados entre os dois modelos de previsão apresentados, sendo que alguns resultados ficaram inferiores ao modelo de MOTTA & PINTO [11].

5. CONCLUSÕES

Os resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral Indireta para a todas as misturas foram bastante satisfatórios, pois em sua maioria, os CAP modificados com OMMT e MMT ficaram acima do mínimo preconizado pela especificação de serviço ES-031/2006 do DNIT [6], mostrando que a adição desses modificadores melhora a resistência à tração das misturas asfálticas.

Para os resultados obtidos no ensaio de Módulo de Resiliência das misturas estudadas, houve um aumento no valor para todas as misturas com os dois modificadores, em relação à mistura asfáltica com o CAP 50-70 de referência.

Os resultados indicaram que as argilas MMT e OMMT podem melhorar propriedades como Módulo de Resiliência e de Resistência à Tração das misturas asfálticas, proporcionando desta maneira pavimentos mais resistentes à deformação permanente e ao trincamento por fadiga.

O estudo da utilização de nanoargilas como modificadores em misturas asfálticas ainda é incipiente no contexto nacional, entretanto os resultados obtidos são bastante promissores e devem servir como encorajamento a realização de pesquisas nesse setor.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] ASTM: American Society for Testing and Materials – C 837, Standard Test Method for Methylene Blue Index of Clay, USA, 2009.
- [2] ASTM: American Society for Testing and Materials. D 4123 – Standard Method of Indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures. USA, 2003.
- [3] BERNUCCI, L.B., MOTTA, L.M.G., CERATTI, J.A.P., et al. *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*, Rio de Janeiro, ABDEA, 2008.
- [4] CAVALCANTI, L. S. *Efeito de Alguns Modificadores de Ligantes na Vida de Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas*, Dissertação M.Sc., UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 2010.
- [5] DAVID, D. *Misturas asfálticas recicladas a frio: estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsinado*, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2006.
- [6] DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes, ES 031 - Pavimentos Flexíveis, Concreto asfáltico, Especificação de Serviço, Rio de Janeiro, 2006.
- [7] DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes, ME 138 - Pavimentos flexíveis - Misturas betuminosas, Determinação da resistência à tração por compressão diametral, Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2009.
- [8] JAHROMI, S. G., ANDALIBIZADE, B., VOSSOUGH, S. “Engineering properties of nanoclay modified asphalt concrete mixtures”, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 35, n. 1B, 2010.
- [9] JAHROMI, S. G., KHODAI, A. “Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder”, *Construction and Building Materials*, v.23, n.8, 2009.
- [10] MOTTA, L. M. G., TONIAL, I., LEITE, L. M., et al., *Princípios do projeto e análise SUPERPAVE de Misturas Asfálticas*, Rio de Janeiro, PETROBRÁS/CENPES, 1996.
- [11] MOTTA, L. M. G., PINTO, S. O. “Uso de Ensaio Estático na Definição de Parâmetros de Comportamento das Misturas asfálticas”, In: *12º Encontro de Asfalto, Instituto Brasileiro do Petróleo*, Rio de Janeiro-RJ, 1994.
- [12] PAIVA, L. B., MORALES, A. R., DIAZ, F. R. V. “Argilas organofílicas: características, metodologias de preparação, compostos de intercalação e técnicas de caracterização”, *Cerâmica*, v.54, n.330, São Paulo, 2008.
- [13] SILVA, A. R. V., FERREIRA, H. C. “Esmeclitas organofílicas: conceitos, estruturas, propriedades, síntese, usos industriais e produtores/fornecedores nacionais e internacionais”, *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v.3, n.3, 2008.
- [14] YU, J., ZENG, X., WU, S., et al. “Preparation and properties of montmorillonite modified asphalts, Elsevier”, *Materials Science and Engineering A*, v447, n. 1-2, pp. 233-238, 2006.