



AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM ADIÇÃO DE DIÓXIDO DE TITÂNIO

Chrysttyn Thalles Ribeiro Félix¹, Adriano Elisio De Figueiredo Lopes ²

RESUMO

A engenharia civil com o passar dos anos busca pela melhoria de suas tecnologias, materiais e métodos construtivos. Neste contexto, o setor da pavimentação está sempre à procura de estudar formas para oferecer conforto, boa trafegabilidade e durabilidade aos asfaltos para os usuários. Nesse sentido, uma alternativa de melhora para as misturas asfálticas é a incorporação do dióxido de titânio, o qual possui capacidade fotocatalítica, ou seja, auxiliando na depuração de impurezas contidas no ar, além de possível melhoria nas propriedades mecânicas como sugerido em trabalhos de análise reológica. Assim, a pesquisa em questão objetivou fazer a avaliação mecânica de misturas betuminosas com a incorporação de TiO_2 na proporção de 2% e 3% como filler. Para isso, foram realizados os ensaios mecânicos de Resistência à Compressão Diametral, Dano por Umidade Induzida (Lottman), Módulo de Resiliência e Deformação Permanente (*Flow Number*). A partir da análise dos resultados, pode-se concluir que a incorporação do TiO_2 ajudou na melhoria da resistência à tração e na resistência ao dano por umidade induzida, enquanto obteve uma redução do *Flow Number*. Já em relação ao MR, houve aumento do parâmetro na adição de 2% de TiO_2 , enquanto que a adição de 3% reduziu o valor em relação a referência. Portanto, observou-se o potencial uso do TiO_2 em misturas asfálticas quanto à melhoria de algumas propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Desempenho mecânico, Pavimentação, Óxido Metálico.

¹Aluno de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: thalles.chrysttyn@gmail.com

²Doutor, Orientador, Departamento de Engenharia Civil, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: adriano.elisio@professor.ufcg.edu.br

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM ADIÇÃO DE DIÓXIDO DE TITÂNIO

ABSTRACT

Over the years, civil engineering has sought to improve its technologies, materials and construction methods. In this context, the paving sector is always looking for ways to offer comfort, good trafficability and durability to asphalt for users. In this sense, an alternative for improving asphalt mixtures is the incorporation of titanium dioxide, which has photocatalytic capacity, that is, it helps to purify impurities contained in the air, in addition to possible improvement in mechanical properties as suggested in rheological analysis studies. Thus, the research in question aimed to perform the mechanical evaluation of bituminous mixtures with the incorporation of TiO_2 in the proportion of 2% and 3% as filler. For this, mechanical tests were performed for Diametrical Compression Strength, Induced Moisture Damage (Lottman), Resilience Module and Permanent Deformation (Flow Number). From the analysis of the results, it can be concluded that the incorporation of TiO_2 helped to improve the tensile strength and resistance to moisture-induced damage, while obtaining a reduction in the Flow Number. Regarding the MR, there was an increase in the parameter with the addition of 2% TiO_2 , while the addition of 3% reduced the value in relation to the reference. Therefore, the potential use of TiO_2 in asphalt mixtures was observed regarding the improvement of some mechanical properties.

Keywords: Mechanical performance, Paving, Metal Oxide.

1.0 INTRODUÇÃO

Na atualidade com os avanços das tecnologias, aumento de demanda para comercialização, turismo, entre outros, a pavimentação se torna parte do dia a dia da população tendo em vista a necessidade de locomoção. Camargo (2023) afirma que a pavimentação asfáltica tem a finalidade de trazer a melhoria para trafegabilidade, com o intuito de oferecer melhores condições no deslocamento, além da segurança para os usuários.

Dentro desse contexto, é interessante compreender que com o uso contínuo do pavimento, além das intempéries podem vir a provocar possíveis patologias. Nesse sentido, Araújo Junior *et al.* (2021) afirma que em pavimentos flexíveis, por exemplo, que as patologias são oriundas a princípio pela perda das propriedades mecânicas devido a ação do tempo e uso contínuo.

Desta forma, a procura pela melhoria da qualidade dos pavimentos, trouxe consigo o estudo das misturas asfálticas modificadas com diferentes materiais. Sendo assim, este estudo tem como o material modificante da mistura asfáltica o Dióxido de Titânio (TiO_2), o qual já está sendo utilizado no setor da construção civil, como também em diversas outras áreas do mercado.

Estudos recentes têm avaliado as possíveis aplicações do TiO_2 em diversas áreas. Neste sentido, Albuquerque *et al.* (2019) afirma a aplicação do TiO_2 na produção de argamassas devido sua capacidade fotocatalítica, auxiliando na degradação de poluentes atmosféricos urbanos. Concomitante a isso, o na produção de medicamentos (Moreira *et al.*, 2019), dentro da medicina (Maddah *et al.*, 2023), ou na área ambiental sendo aplicados em aterros controlados (Oliveira *et al.*, 2018), entre outras.

Soares (2018) fez avaliação de uma mistura asfáltica modificada com nanopartículas de dióxido de titânio e observou melhoria no comportamento em relação a estabilidade *Marshall* e *Flow Number*. Desta forma, observou-se uma lacuna na literatura em relação a análise de misturas asfálticas com a adição de TiO_2 como filler, sendo assim, essa pesquisa objetivou avaliar as propriedades mecânicas de misturas com adição de 2 e 3% de dióxido de titânio quanto a Resistência à Tração, Módulo de Resiliência, Dano por Umidade Induzida e *Flow Number*.

2.0 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Para a dosagem de misturas asfálticas necessita dos seguintes materiais: agregados, cal hidratada, ligante e dióxido de titânio. Desta forma, para a escolha do ligante foi realizada uma análise da tipologia mais utilizada na região, sendo definido o ligante classificado como 50/70. Neste sentido, o material outrora apresentado foi cedido pela empresa Cordilheira Pavimentos LTDA, situada na cidade de Campina Grande - Paraíba.

Concomitante a isso, a Construtora Rocha Cavalcante da cidade de Campina Grande - PB forneceu os agregados graúdos e o agregado miúdo utilizados no estudo. Desta forma, é válido salientar que como agregados graúdos foram utilizadas britas granitas de diâmetros nominais de 19 mm e 12,5 mm. Já como o agregado miúdo foi feito uso do pó de pedra de mesma origem.

Além disso, para filler das misturas de referência foi utilizada uma cal hidratada dolomítica adquirida em comércio local. As misturas modificadas, por sua vez, fizeram o uso de micropartículas Dióxido de Titânio disponibilizado pela Laioun's Pigmentação, situada na cidade do Rio de Janeiro - RJ.

2.2 METODOLOGIA

2.2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A pesquisa foi dividida em duas etapas, sendo a primeira composta pela caracterização dos materiais, e a segunda - por sua vez - composta pelos ensaios mecânicos e análise dos resultados. Dentro desse contexto, a caracterização dos agregados foi realizado de acordo com cada norma vigente, estando dispostos na tabela a seguir.

Tabela 1. Caracterização dos materiais

Ensaio	Norma	Especificações	Material		
			Brita 19 mm	Brita 12,5 mm	Pó de Pedra
Massa Específica Real (g/cm³)	ASTM C127:2015	-	2,777	2,772	2,712
Massa Específica Aparente (g/cm³)	ASTM C127:2015	-	2,767	2,750	2,659

Absorção (%)	ASTM C127:2015	≤2	0,130	0,287	0,731
Abrasão “Los Angeles” (%)	ASTM C131:2020	≤55	18,50	20,40	-
Índice de Forma	ASTM D4791:2019	≥0,5	0,653	0,649	-
Adesividade ao ligante		-	Não satisfatório	-	-
Equivalente Areia (%)	ASTM D2419:2014	≥55	-	-	67,3
Partículas alongadas e achatadas (%)	ASTM D4791:2019	≤10	5,68	3,25	-
Partículas fraturadas (%)	ASTM D5821-13:2017	≥90	98,28	99,34	-
Angularidade (%)	ASTM C1252:2017	≥45	-	-	45,1

Dando continuidade, através do ensaio de adesividade ao ligante asfáltico, foi perceptível que a brita 19 mm obteve um resultado abaixo do esperado, sendo mostrada a necessidade do DOPE. Dentro desse contexto, é importante frisar que foi utilizado o DOPE Concentrado D.08-líquido-TM na proporção de 0,1% em relação ao peso do ligante. Desta forma, após a incorporação do DOPE ao ligante foi realizado novamente o ensaio, no qual ficou perceptível a melhora da adesividade, da brita 19 mm, tornando-se desta vez um resultado satisfatório.

Ainda nesse contexto, a tabela 2 mostra os resultados dos ensaios de caracterização do ligante. Sendo assim, é importante salientar que para a realização destes procedimentos experimentais foram seguidas as normas respectivas a cada ensaio. Concomitante a isso, pode-se dar ênfase ao aumento da viscosidade do ligante pós-RTFO (tabela 2), como também, a diminuição da massa do ligante sendo justificado pela volatilidade do material.

Tabela 2.Caracterização do ligante

Ensaio	Especificação (antes RTFO)	Resultado antes RTFO	Especificação (pós-RTFO)	Resultado Pós-RTFO
Penetração 0.1 mm (100g, 5s a 25°C)	50 a 70	59	-	38
Ponto de Amolecimento (°C)	>46	48	-	50
Aumento do Ponto de Amolecimento (°C)	-	-	≤8	2
Variação de massa do ligante (%)			≤0,5	0,10
Índice de suscetibilidade térmica (ISC)	-1,5 a +0,7	-1,33	-	-
Viscosidade 135 °C	≥274	405,94	-	554,08

Rotacional (cP)	150 °C	≥112	202,37	-	264,99
	175 °C	57 a 285	73,97	-	91,53
Temperatura máxima de PG (°C)		>64° C	66,9	-	65,6
MSCR	Jnr a 0,1 kPa ⁻¹	-	-	-	3,51
	Jnr a 3,2 kPa ⁻¹	-	-	-	3,86
	Percentual de recuperação a 0,1 kPa [%]	-	-	-	4,24
	Percentual de recuperação a 3,2 kPa [%]	-	-	-	0,34
	Sensibilidade a níveis de deformação (Jnr _{diff}) [%]	-	-	-	9,97
*Penetração Retida (%)		≥55		63,39	

*Cálculo envolvendo resultados de parâmetros pré e pós-RTFO.

Prosseguindo com a caracterização dos materiais, o dióxido de titânio, a princípio foi realizada a determinação de sua granulometria através da difração a laser. Logo, através do procedimento foi possível concluir que o material tem granulometria de micropartículas, tendo seu diâmetro na faixa de 0,1 a 1µm. Concomitante a isso, a análise por difração de raio-x identificou predominância da fase Rutilo (97,6%) e uma fase pequena parcela da fase Anatase (2,4%).

2.2.2 AVALIAÇÃO MECÂNICA

A realização da avaliação mecânica foi feita através de ensaios laboratoriais. Nesse contexto, foram realizados os seguintes ensaios: Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT), Dano por Umidade Induzida (Lottmam), Módulo de Resiliência (MR) e Deformação Permanente (*Flow Number*).

O ensaio de *Flow Number* é regido pela norma DNIT 184/2018 e possui como objetivo determinar a deformação permanente do corpo de prova, em formato cilíndrico, sendo resultado da aplicação de uma carga uniaxial vertical. Já o Dano por Umidade Induzida, objetiva analisar a sensibilidade dos corpos de prova da mistura asfáltica frente a água, realizando a avaliação da coesão e da adesividade entre agregado e ligante por meio da saturação e do condicionamento rápido em água.

O Módulo de Resiliência é regido pela norma DNIT 135/2018-ME. Desta forma, o objetivo principal deste ensaio é de determinar a capacidade de um corpo elástico fazer o armazenamento de energia e posteriormente voltar a sua deformação inicial, ou seja, a avaliação do corpo é feita dentro do regime elástico. Para complementar a avaliação mecânica, o ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral é realizado de acordo com a norma DNIT 136/2018 – ME, o

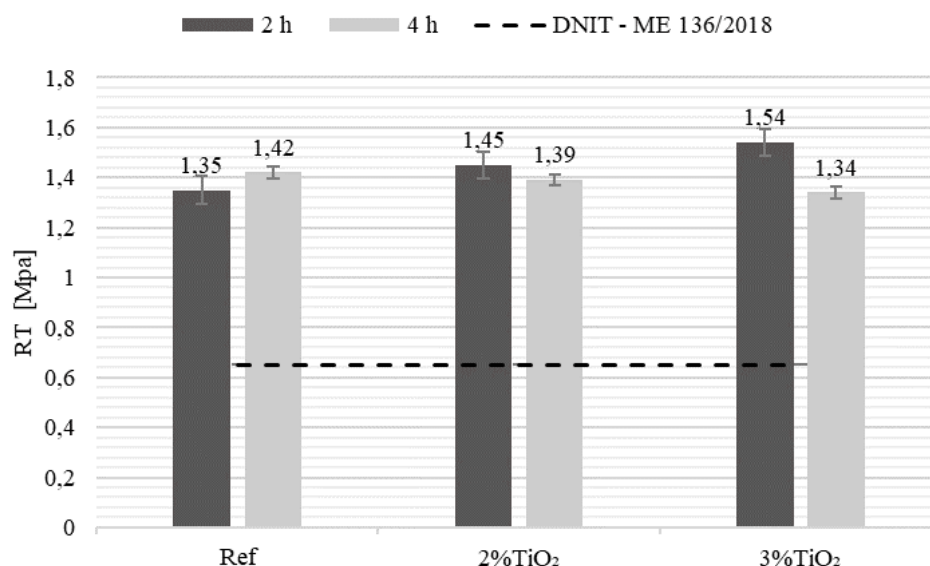
qual objetiva a determinação da resistência à tração dos corpos de prova das misturas asfálticas, sendo executado o RT com a aplicação de uma carga estática crescente.

3.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT)

Observando a figura 1, pode-se enfatizar que todas as misturas estão com todos os resultados superiores ao valor mínimo sugerido pela norma DNIT 136/2018, sendo todos maiores que 0,65 MPa à uma temperatura de 25°C. Dentro desse sentido, pode-se observar que as mistas - antes do envelhecimento - com a adição de dióxido de titânio obtiveram um aumento em sua resistência com a medida que aumentava a porcentagem de TiO_2 na mistura.

Figura 1. Resultado do ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Autor, 2024.

Outra análise que pode ser feita é que após o envelhecimento dos corpos de prova, percebe-se que os corpos de prova diminuem de resistência à tração de acordo com o aumento da porcentagem de TiO_2 na mistura. Concomitante a isso, enfatiza-se que mesmo com a perda após o envelhecimento, essa perda foi

consideravelmente pequena, tendo em vista que a mistura com 2% de dióxido de titânio reduziu 0,06 MPa comparada com a mistura antes do envelhecimento. Além disso, o desempenho está satisfatório, pois obteve resultados superiores aos estabelecidos pela norma.

É possível observar que adição de materiais finos, como filler, nas misturas asfálticas tendem a aumentar a rigidez até determinado ponto. Logo, Choudhary, Kumar e Rahaman (2019), observaram um aumento de resistência à tração por compressão diametral ao adicionarem resíduo de bauxita, como filler, em proporções de 4,0% e 5,5%. Contudo, as misturas com proporções maiores (7,0% e 8,0%) obtiveram redução da resistência, indicando que uma alta concentração do material não tende a proporcionar benefícios. Desta forma, é possível que a adição de TiO_2 em grandes proporções possa apresentar efeito oposto ao apresentado neste estudo, logo é necessário a realização de mais experimentos para avaliar esse comportamento.

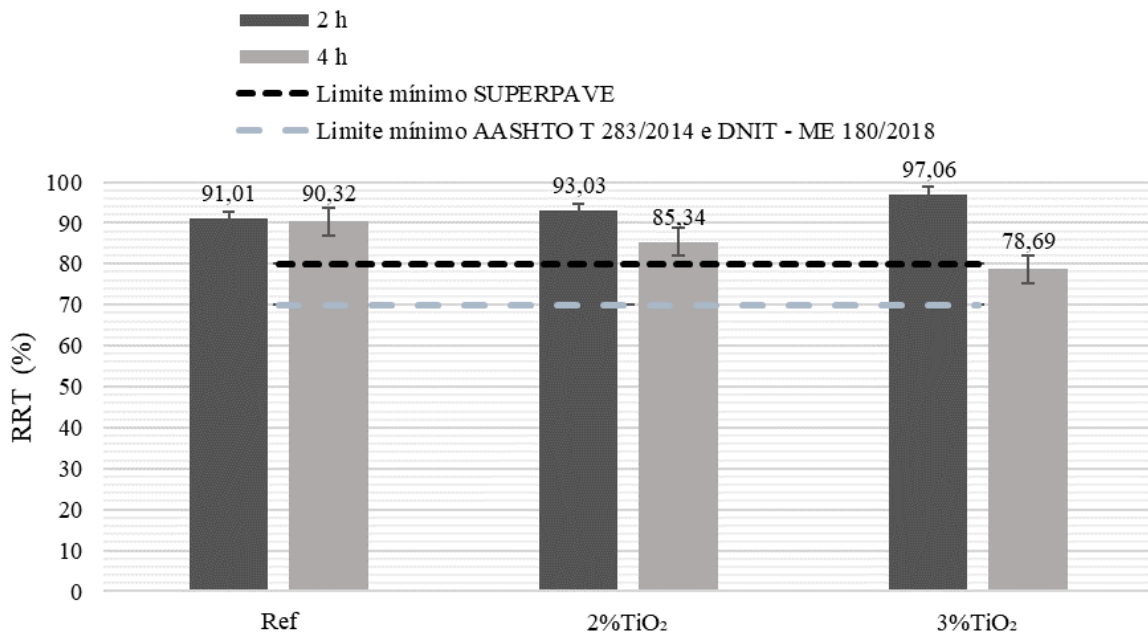
As misturas envelhecidas a curto prazo, pode ser observado uma redução no valor do RT a medida que a proporção de TiO_2 aumento na mistura, sendo um comportamento contrário às misturas que não foram envelhecidas.

Além disso, fazendo uma comparação de uma misturas antes e após o envelhecimento, mistura de referência, ocorreu uma aumento do ITS, sendo comportamento típico de misturas convencionais, conforme afirmou Alnaqib e Bazuhair (2023) em seu estudo. Por outro lado, as misturas que estavam com a adição de TiO_2 apresentaram uma redução de 4,14% e 12,99% em relação ao RT após o envelhecimento a curto prazo, apontando uma possível diminuição da rigidez, similar ao que Al-Hadidy e Khalid (2022) obtiveram em misturas com adição de zeólita natural e cera de petróleo.

3.2 Dano por umidade induzida

Fazendo a análise da figura 2 pode-se observar que de acordo com as normas DNIT 180/2018 – ME e AASHTO T 283/2022 todas as misturas obtiveram resultados satisfatórios, estando todas superiores a 70% de RRT. Contudo, com relação a metodologia superpave, a mistura com adição de 2% de dióxido de titânio e a de referência atenderam a metodologia (ambos superiores a 80%), com exceção da com adição de 3% que obteve um RRT de 78,69%.

Figura 2. Resultados do dano por umidade induzida



Fonte: Autor, 2024.

Ainda observando a imagem outrora apresentada pode-se verificar que as misturas não envelhecidas apresentaram um aumento de RRT com o aumento de dióxido de titânio. As misturas após envelhecimento apresentam comportamento oposto, havendo uma redução com o aumento de TiO₂, sendo essa redução de 5,51% e 12,87% para misturas com 2% e 3% de dióxido de titânio, respectivamente..

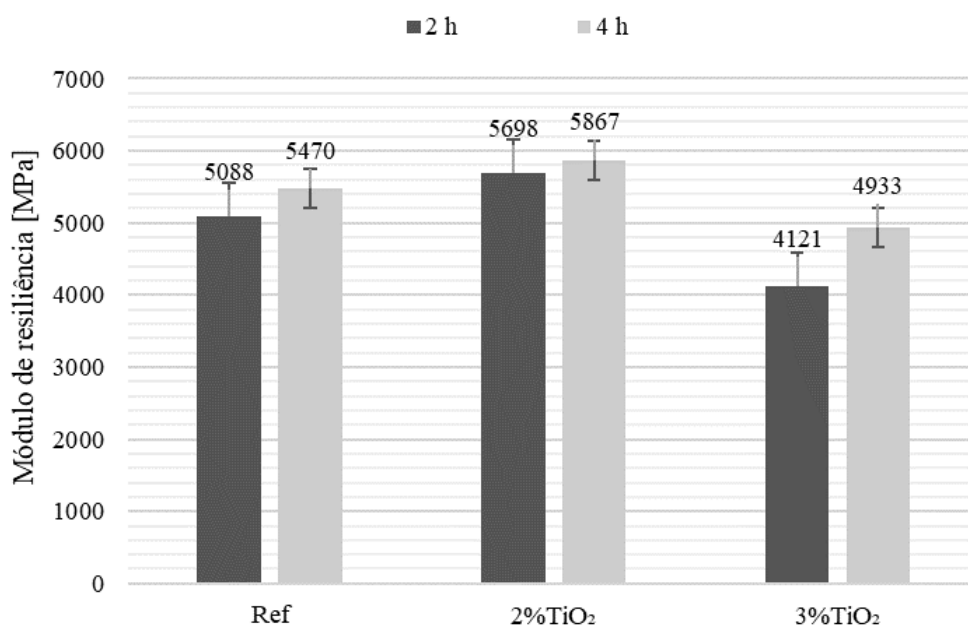
Além disso, pode-se enfatizar também que as misturas com adição de dióxido de titânio obtiveram uma redução em relação a resistência ao dano por umidade. Por outro lado, as misturas que tiveram a substituição total da cal hidratada pelo TiO₂ não obteve resultado satisfatório, sugerindo que maior quantidade não conseguiu reduzir o dano por umidade ao conjunto da mistura.

Ademais, os resultados obtidos mostram que, assim como Stirb *et al.* (2021) sugeriu, a composição mineralógica de uma mistura pode vir a interferir na adesividade e contribuição do ligante betuminoso. Fazendo uma análise acerca do comportamento das misturas ao envelhecimento, foi possível fazer a verificação da redução típica da resistência ao dano por umidade. Ocorreu uma redução de 0,76%, podendo ser atrelado a grande quantidade de cal hidratada na sua composição (3%), que melhorou a adesividade entre ligante e agregados, e concordância com Singh *et al.* (2021).

3.3 Módulo de Resiliência (MR)

No que se refere ao módulo de resiliência, a figura seguir mostra que as misturas antes do envelhecimento sofreram uma tendência a redução em relação ao MR, logo, pode-se salientar que quanto maior a redução maior a quantidade de TiO_2 na mistura. Contudo, quando analisado o MR após o envelhecimento, percebe-se que as misturas com adição do TiO_2 obtiveram resultados numericamente melhores quando comparadas com as de referência. Neste sentido, pode-se salientar que diversos outros fatores podem vir a influenciar no MR, como temperatura, o histórico de carregamento, entre outros.

Figura 3. Resultados do módulo de resiliência



Fonte: Autor, 2024.

A mistura com 2% TiO_2 -4h obteve um Módulo de Resiliência semelhante aos valores encontrados por Bhat *et al.* (2024) para misturas asfálticas contendo lignite asfáltico modificado com óxido de silício (SiO_2) na proporção de 2% em relação ao peso do ligante. Concomitante a isso, os autores também puderam observar também que o MR de uma mistura com ligante asfáltico modificado com 1% de Al_2O_3 em peso do ligante, obteve resultados numéricos semelhantes ao de 3%3% TiO_2 -4h.

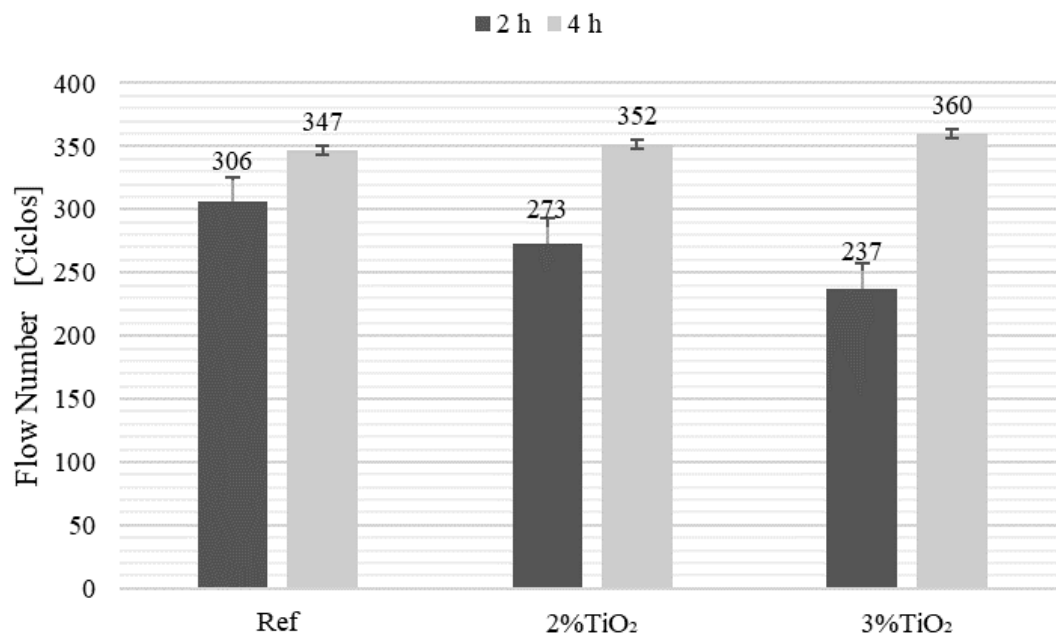
Tahmoorian, Yeaman e Mizababaei (2020), afirmam que o valor do Módulo de Resiliência de uma camada de pavimento pode vir a ser afetado por inúmeros

fatores, sendo alguns deles: temperatura, agentes, rejuvenescedores, aditivos, histórico de carregamento, tempo de carregamento e tipo de mistura asfáltica.

3.4 Flow number

A figura a seguir, nos mostra que quanto maior o teor de dióxido de titânio na mistura asfáltica, maior a redução na resistência à deformação permanente. Neste sentido, pode-se enfatizar que essa pesquisa fez a análise apenas para a adição de 2 e 3%, mas existe a possibilidade que as misturas com outros teores possam a vir ter resultados mais positivos.

Figura 4. Resultados do flow number



Fonte: Autor, 2024.

Ainda nesse contexto, pode-se observar que ao contrário das misturas antes do envelhecimento, as misturas com a adição de dióxido de titânio envelhecidas (4h) obtiveram certa melhoria quando comparadas com as misturas de referência. Contudo, é importante compreender que mesmo obtendo melhoria, ela não foi de grande aumento. Deste modo, pode-se exemplificar que a mistura com adição de 3% obteve um aumento de 13 ciclos.

Nascimento (2014), em seu estudo propôs limites de classificação em relação ao *Flow Number*. As misturas asfálticas não envelhecidas foram sugeridas para tráfego médio, com o FN variando de 100 a 300, sendo classificado em classe

2 para níveis normais de tráfego. Concomitante a isso, foi possível observar que as misturas envelhecidas enquadraram-se para tráfego pesado, devido apresentar FN superiores a 300 em condições normais de tráfego, de acordo com o definido pelo DNIT (2018), considerando velocidades superiores a 60 km/h, para vias sem interseções, sem faixa adicional e com uma temperatura máxima moderada do revestimento asfáltico.

5.0 CONCLUSÃO

A pesquisa em questão buscou fazer a análise do desempenho mecânico de misturas asfálticas com adição de 2% e 3% de dióxido de titânio. Neste sentido, pode-se salientar que essas misturas quanto à resistência a tração as misturas com adição de TiO_2 obteve melhorias quando comparada com a mistura de referência. Além disso, o dano por umidade induzida também obteve resultados satisfatórios, tendo uma melhoria de 2,22% e 6,65% quando comparadas com a referência.

Quanto ao módulo de resiliência, o aumento do parâmetro só ocorreu para a mistura com 2% do TiO_2 . Já em relação ao Flow Number, as misturas apresentaram uma redução na deformação permanente de 10,78% e 22,55% para as misturas com adição de 2% e 3%, respectivamente.

Ressalta-se também que em alguns ensaios após o protocolo de envelhecimento dos corpos de prova, obtiveram uma redução no desempenho dos seus respectivos resultados, como a resistência à tração, com uma redução de 2,11% e 5,63% e no dano por umidade induzida, com a redução de 5,51% e 12,87% respectivamente.

Por fim, pode-se concluir que, a mistura que continha uma adição de 2% de dióxido de titânio obteve uma menor variação nos resultados, quando comparados antes e após o envelhecimento. Desta forma, esses resultados podem indicar que a longo prazo misturas com adição parcial do TiO_2 como filler podem trazer melhorias no que se refere ao RT e dano por umidade induzida e MR, além de apresentar melhoria do *Flow Number* após o envelhecimento.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil, fazendo parte do Programa Institucional Voluntário de Iniciação Científica - PIVIC/UFCG.

REFERÊNCIAS

- AL-HADIDY, A. I.; KHALID, S. A. Influence of Long-Term Aging on the Engineering Properties of WMA Mixtures Containing Petroleum Wax and Natural Zeolite. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 15, n. 3, p. 706–718, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00047-9>
- ALBUQUERQUE, D.D.M.; ANDRADE NETO, J.S.; AMORIM JUNIOR, N.S.; RIBEIRO, D.V. Propriedades de argamassas de revestimento contendo resíduo proveniente da produção do TiO₂ (MNR). **Cerâmica** **65**. p. 340-350 (Julho - Setembro de 2019). DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132019653752562>
- ALNAQIB, H. M.; BAZUHAIR, R W. Evaluation of HMA Modified with Titan Polymer. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, v. 13, n. 3, p. 10725–10730, 2023. DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.5856>
- ARAÚJO JUNIOR, Edberto Moreira de; SOUSA, João Pedro Nogueira; RAMOS, Saulo Passos. Patologias em pavimentos flexíveis. **Cadernos de Graduação**. V. 5, n9. 2019. ISSN 2318.9363
- BHAT, F.S.; GILANI, T.A.; DIN, I.M.U.; *et al.* Integration of nano Al₂O₃ and nano SiO₂ in asphalt mixes: A comprehensive performance and durability evaluation. **Construction and Building Materials**, v. 412, p. 134687, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134687>
- CAMARGO, Anderson Waine. RECUPERAÇÃO DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS. UM ESTUDO DE CASO DA AVENIDA NEW YORK NO SETOR JARDIM NOVO MUNDO EM GOIÂNIA-GO. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 2023.
- CHOUDHARY R.; KUMAR A.; RAHMAN G. Rheological and mechanical properties of bauxite residue as hot mix asphalt filler. **Int J Pavement Res Technol**. 12(6):623–31, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42947-019-0074-4>
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 136: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 158: Mistura asfáltica – Determinação da porcentagem de betume em mistura asfáltica utilizando o extrator Soxhlet – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 180: Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 183: Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 184: Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 416: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

MADDAH, A.; DANESH, H.; GHASEMI, P. et al. The Effect of Titanium Dioxide (TiO₂) Nanoparticles on Oxidative Stress Status in the HCT116 Human Colon Cancer Cell Line. **BioNanoScience**, 13(2):1-9, 2023. DOI: [10.1007/s12668-023-01103-3](https://doi.org/10.1007/s12668-023-01103-3)

MOREIRA, A.J.; MALDI, C.P.; FRESCHI, G.P.G. Aplicação de processo fotocatalítico mediado por dióxido de titânio para degradação de Sertralina. *Acta Brasiliensis*, 3(1):17, 2019. DOI: [10.22571/2526-4338117](https://doi.org/10.22571/2526-4338117)

OLIVEIRA, Fabiano Alves de. ALMEIDA, Darlene Souza da Silva. Avaliação das interações das nanopartículas de dióxido de titânio em solos de aterro controlado contaminados por óxido de cobre. **Tecnol. Metal. Mater. Miner.** V 15, n 3, p. 327-332 (julho/setembro de 2018). DOI: [10.4322/2176-1523.01401](https://doi.org/10.4322/2176-1523.01401)

SINGH, D.; HABAL, A.; ASHISH, P.K.; KATAWARE, A. Effect of warm mix additives and hydrated lime on viscosity and bonding–debonding behaviour of RET and PPA modified asphalt binder with aggregates. **Road Materials and Pavement Design**, 24(10):2522–44, 2023. DOI: [10.1080/14680629.2022.2151500](https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2151500)

SOARES, L.R.R. Avaliação de misturas asfálticas modificadas com nanopartículas de dióxido de titânio modificadas superficialmente. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018

Stirb, A.; Marc, P.; Belc, A.; Belc, F.; Lucaci, G. Influence of Natural Aggregates' Mineralogical Composition on the Adhesiveness and Affinity of Bitumen. Em: Di Benedetto H, Baaj H, Chailleux E, Tebaldi G, Sauzéat C, Mangiafico S, organizadores. **Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials**. Cham: Springer International Publishing; p. 1095–101. 2022. (RILEM Bookseries). DOI: [10.1007/978-3-030-46455-4_139](https://doi.org/10.1007/978-3-030-46455-4_139)

TAHMOORIAN, F.; YEAMAN, J.; MIRZABABAEI, M. Comparisons of the Resilient Moduli of Asphalt Mixes Containing Recycled Materials through Empirical and Experimental Methods. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 9, p. 04020255, 2020. DOI: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003308](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003308).