TRANSPORTES
revistatransportes.org.br
anpet
associação nacional de pesquisa e ensino em transportes
anpet.org.br

Determinação da ativação relativa do ligante RAP e avaliação da interferência de aditivos de reciclagem em misturas asfálticas produzidas com 100% RAP

Determination of the RAP binder relative's activation and evaluation of the interference of recycling additives in asphalt mixtures produced with 100% RAP

Laiana Ferreira da Costa[1], Ana Letícia Feitosa de Macêdo[2], Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena[2], Luciana de Figueirêdo Lopes Lucena[3]

[1] Universidade Federal Rural de Pernambuco, Cabo de Santo Agostinho, Pernambuco, Brasil

[2]Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil

[3] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil

Contato: laianaferreira02@gmail.com, (LFC); leticiamacedo.engcivil@gmail.com, (ALFM); ledach@uol.com.br, (LCFLL); lllucena@yahoo.com.br, (LFLL)

Recebido:
2 de agosto de 2022
Aceito para publicação:
29 de agosto de 2023
Publicado:
17 de janeiro de 2024
Editor de Área:
Kamilla Vasconcelos, Universidade de São Paulo, Brasil

Palavras-chave:
Reclaimed Asphalt Pavement.
Zeólita.
Óleo de Algodão.

Keywords:
Reclaimed Asphalt Pavement.
Zeolite.
Cotton oil.

DOI: 10.58922/transportes.v31i3.2805

OPEN ACCESS
CC BY

RESUMO
Uma das alternativas que segue a tendência da sustentabilidade é a reciclagem do material fresado, denominado *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). Alguns métodos têm sido adotados no intuito de elevar a quantidade de RAP na composição das misturas asfálticas e restaurar as características originais do ligante envelhecido, com destaque para os aditivos de misturas mornas e os óleos de origem animal e vegetal. Esse estudo pretende quantificar o grau relativo de ativação do ligante RAP (DoA') usando os valores de resistência à tração, módulo de resiliência e volume de vazios de misturas confeccionadas com 100% RAP. Objetiva também avaliar a interferência do uso de dois aditivos (zeólita natural clinoptilolita e óleo de algodão) em diferentes teores e condições de temperatura de condicionamento, nas propriedades de resistência à tração (RT), módulo de resiliência (MR) e no parâmetro volumétricos de volume de vazios (Vv) de misturas asfálticas com taxa de reciclagem de 100%. Os resultados apontam que o ligante RAP apresentou 100% de ativação na temperatura de 140°C. No geral, em comparação com as amostras sem aditivo, o óleo de algodão apresentou potencial de reduzir a RT, o MR e o Vv em todas as condições de temperatura avaliadas, e identificou-se que a variável "teor de óleo" é aquela que implica em variações estatisticamente significativas desses parâmetros. O uso da zeólita não demonstrou ter influência significativa na RT e MR considerando as variáveis "teor de zeólita", "temperatura" e "tempo de condicionamento". Entretanto, observou-se que a temperatura de 160°C aparentou ser mais eficiente na redução do volume de vazios das amostras com zeólita.

ABSTRACT
One of the alternatives that follows the sustainability trend is the recycling of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). Some methods have been adopted with

the aim of increasing the amount of RAP in the composition of asphalt mixtures and restoring the original characteristics of the aged binder, with emphasis on additives for warm mixtures and oils of animal and vegetable origin. This study intends to quantify the relative degree of activation of the RAP ligand (DoA') using the values of tensile strength, resilience modulus and voids content of asphalt mixtures made with 100% RAP. It also aims to evaluate the interference of the use of two additives (natural zeolite clinoptilolite and cotton oil) at different contents and conditioning temperature conditions, on the properties of tensile strength (ITS), resilient modulus and on the volumetric parameter of voids content (Vv) of asphalt mixtures with a recycling rate of 100%. The results indicate that the aged binder showed 100% activation at a temperature of 140°C. In general, compared to samples without additive, cottonseed oil had the potential to reduce ITS, MR and Vv in all evaluated temperature conditions, and it was identified that the variable "oil content" is the one that implies statistically significant variations of these parameters. The use of zeolite did not demonstrate a significant influence on ITS and MR considering the variables "zeolite content", "temperature" and "conditioning time". However, it was observed that the temperature of 160°C appeared to be more efficient in reducing the voids content of the samples with zeolite.

1. INTRODUÇÃO

A indústria da pavimentação tem sido incentivada para uma atuação mais sustentável a partir do entendimento dos impactos que suas atividades impõem ao meio ambiente. Esse fato tem motivado a investigações de estratégias que melhorem o desempenho ambiental e reduzam os custos das práticas de construção e manutenção de pavimentos rodoviários.

Uma das alternativas que segue a tendência da conservação de recursos financeiros e ambientais na pavimentação é a reciclagem do material fresado, denominado *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)*, proveniente do desbastamento durante as operações de restauração e reabilitação de pavimentos asfálticos (Al-Qadi, Elseifi e Carpenter, 2007; Arshad e Ahmed, 2017; Zhu, Ma e Fang, 2020).

O ligante asfáltico e os agregados que compõem o RAP são valorosos e podem substituir uma parte dos agregados e ligante virgens de uma mistura asfáltica recém-projetada, reduzindo assim a quantidade de suprimentos novos a serem adicionados. Isso proporciona uma economia de espaço, de energia e de recursos financeiros e a conservação de recursos naturais (McDaniel e Anderson, 2001; Copeland, 2011; Dai Lu e Saleh, 2016; Rocha Segundo et al., 2016; Carizzio Monteiro, Silva e Rezende, 2023).

No entanto, a incorporação de quantidades elevadas de RAP em misturas asfálticas a quente ainda esbarra nos receios relacionados às peculiaridades do RAP, à interação do ligante RAP com os componentes virgens e/ou com agentes de reciclagem e ao desempenho do produto final.

Diversos artifícios têm sido estudados e desenvolvidos no intuito de elevar a quantidade de RAP na composição das misturas asfálticas. Nesse quesito, dentre as alternativas, a literatura aponta como eficazes o uso de tecnologias de formação de espuma aplicadas às misturas asfálticas mornas (WMA), mais especificamente a zeólita (Mallick, Kandhal e Bradbury, 2008; Tao e Mallick, 2009; Vaiana, Iuele e Gallelli, 2013; Hill et al., 2013; Sengoz et al., 2016; Sanchez-Alonso, Valdes-Vidal e Calabi-Floody, 2020) e o uso de bioligantes à base de

material animal, vegetal ou de processamento industrial (Mogawer et al., 2012; Hill et al., 2013; Sengoz et al., 2016; Elkashef et al., 2017; Zhu, Ma e Fang, 2020).

Esse estudo pretender quantificar o grau relativo de ativação do ligante RAP (DoA') em diferentes temperaturas (120°C; 140°C; 160°C e 180°C) usando não somente os valores de resistência à tração, mas também os resultados de módulo de resiliência e volume de vazios das misturas confeccionadas com 100% RAP. O estudo objetiva ainda avaliar a interferência do uso da zeólita natural clinoptilolita e do óleo de algodão, em diferentes teores e condições de temperatura, nas propriedades de resistência, rigidez e volume de vazios de misturas asfálticas com taxa de reciclagem de 100%.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

O RAP utilizado nesta pesquisa foi oriundo dos serviços de fresagem da rodovia federal BR-230, do trecho compreendido entre os quilômetros 35,7 e 42. A distribuição granulométrica dos grãos do agregado RAP foi realizada antes e após a extração do ligante. Três amostras foram ensaiadas e as curvas granulométricas de cada uma delas, juntamente com a curva média para cada situação, estão mostradas na Figura 1.

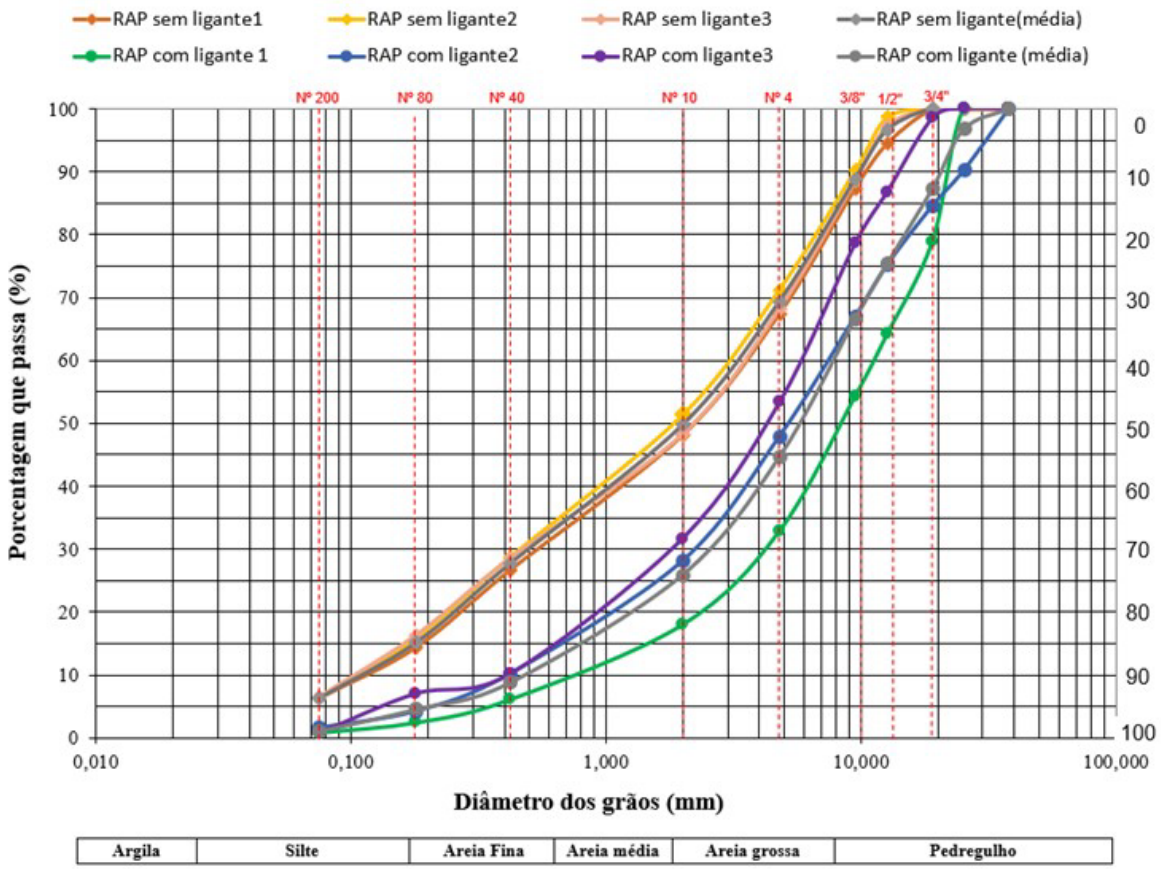


Figura 1. Curvas granulométricas dos agregados RAP.

Para a extração do ligante RAP da matriz de agregados foi aplicada a técnica de centrifugação no Rotarex utilizando como solvente o tricloroetilento, seguindo as recomendações da norma DNIT 053 (DNIT, 1994). Essa técnica permitiu determinar também o teor de ligante envelhecido presente no RAP, que foi de 5,64%.

O óleo de algodão bruto usado nesse estudo teve a sua viscosidade determinada no viscosímetro rotacional na temperatura ambiente (25°C), obtendo um valor de 70,16 cP. A zeólita utilizada foi a clinoptilolita, de origem natural e proveniente da Eslováquia, cedida por uma empresa de São Paulo. Segundo o fornecedor, esse material tem capacidade de liberar de 5% a 6% do seu peso na forma de água no momento da mistura.

A zeólita estudada possui tamanho do grão de #325 (45 μm), cor bege, massa específica aparente entre 0,5 e 1,0 g/cm^3, ponto de fusão de 1000 a 1400°C e capacidade de troca catiônica de 1,2 a 2,0 mEq/g. Por meio da Tabela 1 verifica-se que a zeólita clinoptilolita apresenta a sílica (62,0%) e o óxido de alumínio (7,0%) como principais constituintes químicos.

Tabela 1: Composição Química da zeólita clinoptilolita

Ensaio	Valor máximo (%)	Valor mínimo (%)
Perda de fogo	15,0	7,0
SiO2	75,0	62,0
Al2O3	15,0	7,0
Fe2O3	3,0	0,5
TiO2	0,5	0,0
CaO	5,0	0,5
MgO	3,0	0,0
Na2O	5,0	0,0
K2O	5,0	0,5
MnO	0,5	0,0
P2O5	0,5	0,0
ZnO	0,5	0,0
CuO	0,1	0,0

2.2. Métodos

2.2.1. Determinação do DoA'

Esta etapa da pesquisa teve como objetivo estimar o grau relativo de ativação do ligante RAP (DoA') em diferentes condições de temperatura de mistura, sem a influência de outros fatores tais como umidade do RAP, tempo de mistura e adição de agente de reciclagem.

Esta etapa foi baseada no roteiro proposto no RILEM TC 264 RAP Task Group 5 (Hugener et al., 2022), com alterações no modo de compactação, pois ao invés da compactação Marshall foi utilizada a compactação Superpave, e nas temperaturas de condicionamento avaliadas que, nesse estudo foram 120°C, 140°C, 160°C e 180°C. Outra inovação é que além do parâmetro de resistência à tração, o DoA' também foi calculado em função do volume de vazios da mistura e em função dos valores de módulo de resiliência dos corpos de prova compactados.

Inicialmente, o RAP foi seco em estufa em baixa temperatura (40°C) por 48 horas para eliminar a umidade residual. Posteriormente, procedeu-se com a etapa de condicionamento por quatro horas, onde, para cada temperatura, foram aquecidas oito amostras de RAP seco.

Passadas as primeiras duas horas na estufa, o RAP foi misturado manualmente com o objetivo de desmanchar os grumos, sendo posteriormente reconduzido para a continuação do condicionamento.

Após o período de condicionamento, os oito corpos de prova, por temperatura, foram moldados no compactador Superpave com aplicação de 100 giros considerando um tráfego de veículos de médio a alto e, posteriormente, foi determinado o volume de vazios (Vv) de todos eles por meio dos procedimentos da norma DNIT 428 (DNIT, 2022). Depois de passado um mínimo de 24 h os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) e módulo de resiliência (MR), seguindo as normas DNIT 135 (DNIT, 2018a) e DNIT 136 (DNIT, 2018b), respectivamente. Com os resultados do Vv, RT e MR, calculou-se o DoA'$_{Vv}$, DoA'$_{RT}$ e o DoA'$_{MR}$, possibilitando assim a análise da variação do grau relativo de ligante RAP ativado em função da temperatura de mistura.

A nomenclatura de cada composição analisada, bem como as suas especificações de tempo e temperatura de condicionamento e a quantidade mínima de corpos de prova compactados (CPs) estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Composições para avaliação do DoA'

Nomenclatura Adotada	$t_{condicionamento}$ (h)	$T_{condicionamento}$ (°C)	CPs
RAP-120		120	10
RAP-140		140	10
RAP-160		160	10
RAP-180	2+2	180	10

O DoA'$_{Vv}$, DoA'$_{RT}$ e o DoA'$_{MR}$ foram calculados conforme Equações 1, 2 e 3:

$$DoA'_{Vv}\ (\%) = \frac{Vv_{RAP}(t_{(mínVv)}°C)}{Vv_{RAP}(X°C)} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

$Vv_{RAP}(X°C)$ - é o resultado do Vv do RAP em uma temperatura específica "X",

$Vv_{RAP}(t_{(mínVv)}°C)$ - é o valor mínimo de Vv observado entre as temperaturas avaliadas.

$$DoA'_{RT}\ (\%) = \frac{RT_{RAP}(X°C)}{RT_{RAP}(t_{(máxRT)}°C)} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

$RT_{RAP}(X°C)$ - é o resultado da RT do RAP em uma temperatura específica "X",

$RT_{RAP}(t_{(máxRT)}°C)$ - é o valor máximo de RT observado entre as temperaturas avaliadas.

$$DoA'_{\mathrm{MR}}\ (\%) = \frac{MR_{RAP}(X°C)}{\mathrm{MR}_{RAP}(Vv_{mín})} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

$\mathrm{MR}_{RAP}(X°C)$ - é o resultado da MR do RAP em uma temperatura específica "X",

$\mathrm{MR}_{RAP}(Vv_{mín})$ - é o valor de MR correspondente à situação de menor volume de vazios "Vv".

Segundo Zhao (2011) a RT é um indicador da coesão entre o ligante asfáltico e os agregados. Lo Presti et al. (2019) salientam que em baixas temperaturas o ligante envelhecido não será fluido o suficiente para revestir as partículas de agregado, sendo assim a RT tende a apresentar um valor baixo. Com o aumento da temperatura de pré-aquecimento, o ligante asfáltico envelhecido torna-se mais fluido, o valor de RT aumenta e o tipo de falha torna-se coesiva (através do filme de ligante) ou combinada (coesiva/adesiva) (Canestrari et al., 2010).

Sendo assim, tem-se considerado que o valor máximo de RT corresponde a uma resistência à fissuração mais forte (Islam, Hossain e Tarefder, 2015), ocasionada pela máxima ativação do ligante envelhecido que promove uma maior coesão à mistura.

O módulo de resiliência é pouco influenciado pelo teor de asfalto dentro da faixa normal de dosagem, mas pode variar com o tipo de mistura, faixa granulométrica, tipo de ligante (maior quanto menor a penetração do asfalto ou maior a sua viscosidade), propriedades volumétricas (maior com a diminuição do teor de vazios de ar), energia de compactação, temperatura de compactação e temperatura do ensaio (Kato, 2016; Boeira, 2018).

Como a quantidade mínima de ligante RAP ativo varia em função das condições de processamento (temperatura de mistura e tempo de condicionamento), o que leva a alterações no volume de vazios da mistura e como o valor do módulo de resiliência pode ser considerado inversamente proporcional ao volume de vazios, dessa forma considerou-se no cálculo do DoA' o MR correspondente ao menor Vv, condição indicativa de maior ativação do ligante envelhecido.

2.2.2. Avaliação do cenário RAP + Agentes de Reciclagem

Nessa etapa da pesquisa pretendeu-se estabelecer um comparativo entre os valores das propriedades volumétricas (volume de vazios) e mecânicas (resistência à tração e módulo de resiliência) dos corpos de prova contendo somente RAP, obtidos na etapa anterior, com os corpos de prova contendo RAP + agentes de reciclagem (zeólita e óleo de algodão) no intuito de verificar a possível interferência dos agentes de reciclagem estudados na disponibilidade de ligante RAP.

Os corpos de prova contendo RAP + zeólita e os corpos de prova contendo RAP + óleo de algodão foram confeccionados seguindo os mesmos descritos no item anterior. Ambos os agentes de reciclagem foram adicionados ao RAP após as primeiras 2h de condicionamento, no momento da mistura para desmanche dos grumos.

Os teores de 0,3% e 0,6% de zeólita (percentual por massa de RAP) foram escolhidos seguindo as recomendações do fabricante. A escolha dos teores de óleo de algodão (percentual por massa de ligante RAP) foi escolhido com base em dados da literatura (Ziegler et al., 2017; Melo Neto, 2022).

Vaiana, Iuele e Gallelli (2013) verificaram que o "tempo de formação de espuma" da zeólita (*foaming time* – FT) é um tempo de reação (condicionamento em estufa) entre a mistura e compactação para a formação de espuma devido a adição a zeólita, que leva a um ligeiro aumento no volume do ligante com a consequente redução da viscosidade da mistura, aumento da trabalhabilidade e no revestimento dos agregados e, consequentemente, possibilidade de melhoria do desempenho mecânico. Os autores verificaram que o

efeito espumante da zeólita foi maior após FT = 1h à temperatura de compactação, parecendo desaparecer após FT = 2h.

Sendo assim, com base nas constatações de Vaiana, Iuele e Gallelli (2013), para as composições com zeólita desse estudo, avaliou-se dois tempos de condicionamento após a sua inserção no RAP (1h e 2h), no intuito de analisar também a influência do efeito espumante desse mineral no volume de vazios, na resistência à tração, no módulo de resiliência das misturas asfálticas contendo 100% de RAP e, consequentemente, na disponibilidade do ligante RAP.

A nomenclatura de cada composição analisada, bem como as suas especificações de teor de agente de reciclagem, tempo e temperatura de condicionamento e a quantidade mínima de corpos de prova compactados (CPs) estão mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Composições para avaliação do cenário RAP + Agentes de Reciclagem

Nomenclatura Adotada	**% de zeólita/massa de RAP**	**$t_{condicionamento}$ (h)**	**$T_{condicionamento}$ (°C)**	**CPs**
0,3Z-1h-120	0,30	2+1	120	4
0,3Z-2h-120		2+2		4
0,6Z-1h-120	0,60	2+1		4
0,6Z-2h-120		2+2		4
0,3Z-1h-140	0,30	2+1	140	4
0,3Z-2h-140		2+2		4
0,6Z-1h-140	0,60	2+1		4
0,6Z-2h-140		2+2		4
0,3Z-1h-160	0,30	2+1	160	4
0,3Z-2h-160		2+2		4
0,6Z-1h-160	0,60	2+1		4
0,6Z-2h-160		2+2		4
Nomenclatura Adotada	**% de óleo de algodão/massa de ligante RAP**	**$t_{condicionamento}$ (h)**	**$T_{condicionamento}$ (°C)**	**CPs**
2%Alg-120	2	2+2	120	4
2%Alg-140	2		140	4
2%Alg-160	2		160	4
4%Alg-120	4		120	4
4%Alg-140	4		140	4
4%Alg-160	4		160	4
6%Alg-120	6		120	4
6%Alg-140	6		140	4
6%Alg-160	6		160	4
10%Alg-120	10		120	4
10%Alg-140	10		140	4
10%Alg-160	10		160	4

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1. Valores do DoA'

As Figuras 2(a), 2(b) e 2(c) apresentam os valores de Vv (%), RT (MPa) e MR (MPa) em função das temperaturas de condicionamento, para os corpos de prova compactados com 100% de

RAP. Por meio das linhas de tendência, observa-se que na temperatura de 140 °C os corpos de prova apresentaram menor volume de vazios e maior resistência à tração e módulo de resiliência e nas outras temperaturas houve um aumento do volume de vazios e redução dos valores das duas propriedades mecânicas avaliadas. Analisando as barras de erros, constata-se também uma menor dispersão dos resultados de RT e MR nesta temperatura.

Segundo Pires, Lo Presti e Airey (2019), um aumento na temperatura de compactação amolece o ligante do RAP e, assim, diminui a viscosidade geral da mistura, melhora a compactação e resulta em uma amostra mais resistentes. No entanto, por meio dos resultados obtidos verifica-se que acima de uma certa temperatura os corpos de prova RAP podem se tornar menos resistentes e menos rígidos.

Na temperatura de 120°C possivelmente o ligante do RAP ainda não havia experimentado uma ativação suficiente para melhor aglomerar as partículas de agregados, o que pode ser comprovado pelos resultados dos DoA'$_{Vv}$, DoA'$_{RT}$ e o DoA'$_{MR}$ calculados nesta temperatura e mostrados na Figura 3. Isso fez com que os corpos de prova apresentassem baixos valores de RT e MR e alto percentual de vazios em comparação com as amostras compactadas à 140°C.

Visualmente verificou-se que os corpos de prova das temperaturas de 160°C e 180°C apresentavam um aspecto menos coeso, com desprendimento das partículas mais finas, resultando em uma estrutura com mais vazios. Este mesmo fenômeno de maiores porcentagens de vazios e valores de resistência à tração mais baixos, juntamente com uma tendência parabólica sobre as temperaturas de condicionamento, também foi verificado nos resultados do RILEM TC 264 RAP Task Group 5 (Hugener et al., 2022).

A Figura 3 mostra a relação dos graus relativos de ativação com os teores de ligante RAP ativados em cada uma das temperaturas avaliadas, sabendo que o teor total de ligante envelhecido presente no RAP é de 5,64%. Observa-se que o DoA'$_{Vv}$, DoA'$_{RT}$ e o DoA'$_{MR}$ exibiram 100% de ativação na temperatura de 140°C.

Os DoA' calculados em função do Vv e MR mostram que houve um aumento da quantidade de ligante envelhecido participando da coesão da amostra devido a elevação da temperatura de 120°C para 140°C.

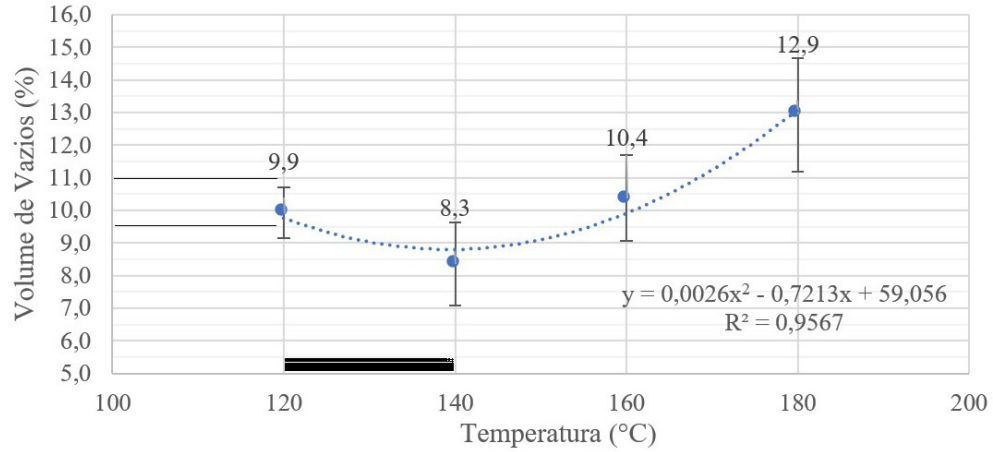
Pelos valores de DoA' calculados em função da RT é possível verificar que na temperatura de 160°C ainda ocorreu uma ativação considerável do ligante RAP, superior à quantidade encontrada na temperatura de 120°C.

Essas constatações mostram que a temperatura de 140°C foi a que mais favoreceu a ativação do ligante envelhecido do RAP estudado. Acima de 140°C existe a possibilidade de ter havido uma queima ou um envelhecimento excessivo do ligante RAP, o que conduziu a uma perda das suas propriedades coesivas comprometendo a sua ativação e, consequentemente, a coesão da amostra.

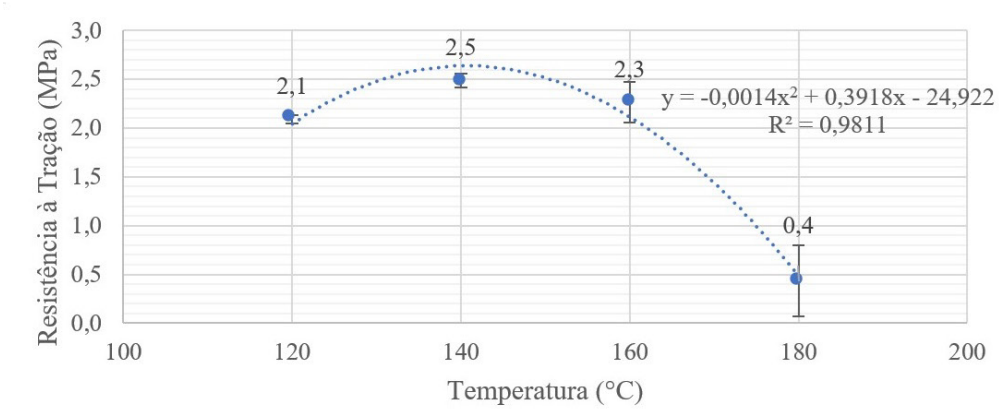
Com a redução da coesão das amostras confeccionadas na temperatura de 160°C e, mais expressivamente, na temperatura de 180°C, as partículas mais finas se desprenderam deixando uma estrutura com maior quantidade de vazios, menos rígida e com a resistência próxima a das amostras confeccionadas em temperaturas mais baixas.

Durante a realização dos ensaios pode-se perceber que os corpos de prova da temperatura de 180°C estavam ressecados e se desagregando, possivelmente devido à falta de coesão resultante da queima do ligante do RAP provocada pelo superaquecimento.

Assim, dentre todas as temperaturas, a de 180°C foi a que resultou nos menores valores de RT e MR e maiores valores de Vv acarretando, consequentemente, nos menores valores de DoA'$_{Vv}$, DoA'$_{RT}$ e DoA'$_{MR}$, que indicaram uma quantidade de ligante RAP ativo de 3,64%, 3,24% e 0,98%, respectivamente.



(a)



(b)

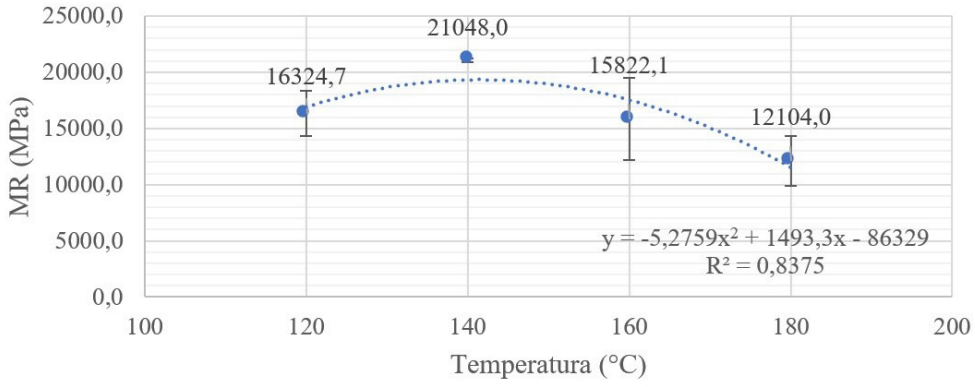
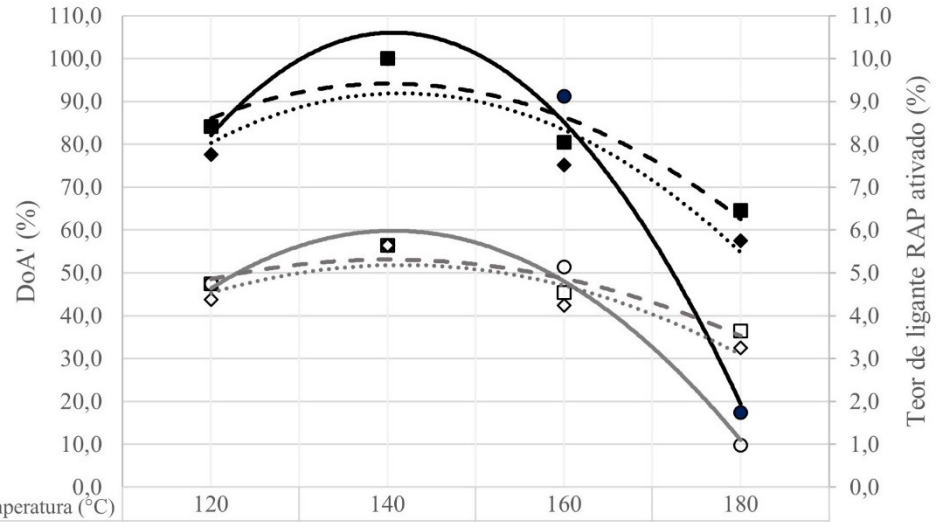


Figura 2. (a) Volume de Vazios × Temperatura; (b) Resistência à Tração × Temperatura; (c) Módulo de Resiliência × Temperatura.



Temperatura (°C)	120	140	160	180
● DoA'-RT	84,1	100,0	91,2	17,4
◆ DoA'-MR	77,6	100,00	75,2	57,5
■ DoA'-Vv	84,1	100,0	80,5	64,5
○ Teor de ligante RAP ativado (DoA' - RT)	4,7	5,6	5,1	1,0
◇ Teor de ligante RAP ativado (DoA' - MR)	4,4	5,6	4,2	3,2
□ Teor de ligante RAP ativado (DoA' - Vv)	4,7	5,6	4,5	3,6

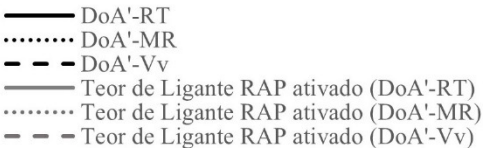


Figura 3. DoA' e teor de ligante RAP ativado.

3.2. Avaliação do cenário RAP + Agentes de Reciclagem

Com o intuito de comparar os valores de resistência à tração, módulo de resiliência e volume de vazios das amostras com agentes de reciclagem com as amostras sem agentes de reciclagem foram plotados gráficos com os resultados dos ensaios e foi feita uma análise estatística por meio do teste t de *Student*.

Nas avaliações do teste t de *Student* considerou-se como hipótese nula a de que não há diferença significativa entre os resultados dos parâmetros analisados das amostras com aditivos e os das amostras sem aditivos e a hipótese alternativa o inverso.

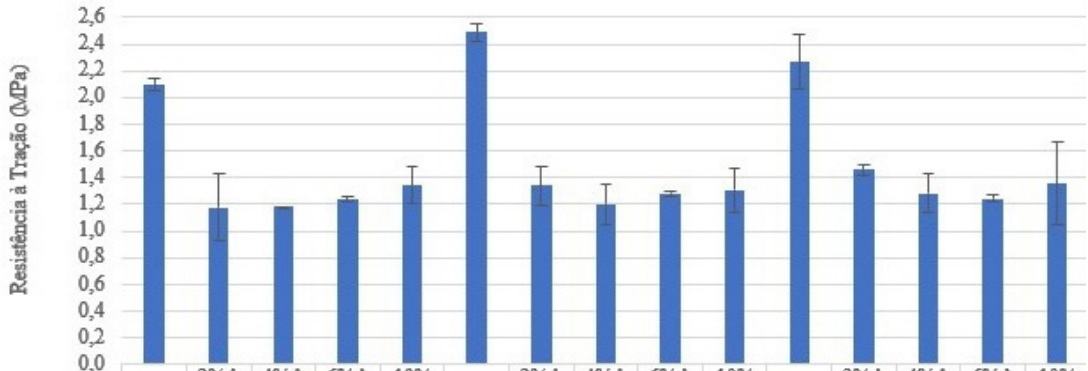
Realizou-se ainda uma Análise de Variância (ANOVA) para investigar estatisticamente a interferências das variáveis "teor de óleo" e "temperatura" e das variáveis "teor de zeólita", "temperatura" e "tempo de condicionamento" na resistência à tração, módulo de resiliência e volume de vazios dos cenários RAP + Óleo de Algodão e RAP + Zeólita. As hipóteses nulas consideradas eram as de que essas variáveis não interferiam nos resultados dos parâmetros analisados e as hipóteses alternativas o inverso.

3.2.1. Resistência à tração por compressão diametral

As Figuras 4(a) e 4(b) mostram o comparativo gráfico dos resultados do ensaio de Resistência à Tração das amostras 100%RAP, com e sem agentes de reciclagem, respectivamente. Na tabela de dados da Figura 3(a) e 3(b) estão apresentados os valores médios de RT e do erro amostral para cada situação analisada, bem como os seus respectivos p-valores resultantes do teste t de *Student.*

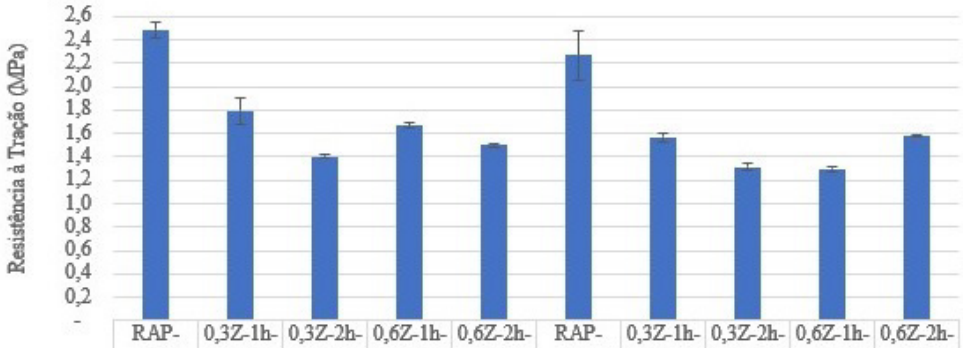
A princípio, observa-se que todos os valores de RT de ambos os cenários ficaram acima de 0,65 MPa, limite mínimo especificado pela norma DNIT 031 (DNIT, 2006) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes do Brasil.

Com relação à resistência à tração, verificou-se que todas as amostras com óleo de algodão e com zeólita apresentaram diferença significativa quanto às amostras sem agente de reciclagem, pois os p-valores foram menores que a significância de 5%. Portanto, tanto o óleo de algodão, como a zeólita influenciaram no parâmetro de resistência à tração do RAP.



	RAP -120	2%Alg-120	4%Alg-120	6%Alg-120	10% Alg-120	RAP -140	2%Alg-140	4%Alg-140	6%Alg-140	10% Alg-140	RAP -160	2%Alg-160	4%Alg-160	6%Alg-160	10% Alg-160
Resistência à Tração (MPa)	2,1	1,2	1,2	1,2	1,3	2,5	1,3	1,2	1,3	1,3	2,3	1,5	1,3	1,2	1,4
p-valor		0,0364	0,0213	0,0016	0,0051		0,0012	0,0009	0,0002	0,0026		0,0068	0,0043	0,0029	0,0115
Erro	0,04	0,25	0,00	0,022	0,13	0,07	0,15	0,15	0,020	0,17	0,21	0,04	0,15	0,030	0,31

(a)



	RAP-140	0,3Z-1h-140	0,3Z-2h-140	0,6Z-1h-140	0,6Z-2h-140	RAP-160	0,3Z-1h-160	0,3Z-2h-160	0,6Z-1h-160	0,6Z-2h-160
Resistência à Tração (MPa)	2,5	1,8	1,4	1,7	1,5	2,3	1,6	1,3	1,3	1,6
p-valor		0,0030	0,0002	0,0006	0,0003		0,0112	0,0037	0,0035	0,0071
Erro	0,07	0,11	0,02	0,02	0,02	0,21	0,04	0,03	0,02	0,01

(b)

Figura 4. Resistência à tração: (a) RAP + Óleo de Algodão; (b) RAP + Zeólita.

As Tabelas 5 e 6 mostram os resultados da análise de variância para a resistência à tração dos cenários RAP + óleo de algodão e RAP + zeólita, respectivamente, feitas para uma conjunto de no mínimo 8 amostras para cada situação. A ANOVA do cenário RAP + Óleo de Algodão foi realizada variando-se inicialmente o teor de óleo e posteriormente a temperatura. Na ANOVA do cenário RAP + zeólita, inicialmente para cada condição de tempo de condicionamento variou-se o teor de zeólita e a temperatura e posteriormente, para cada condição de teor de zeólita variou-se o tempo de condicionamento e a temperatura. A variância dos resultados de RT das amostras de RAP sem aditivo foi de 0,039.

Os valores da Tabela 4 indicam que a variável "teor de óleo" implicou em variações estatisticamente significativas da RT, pois o seu *p*-valor (5,21E-06) foi menor que a significância de 5% e o F > Fcrítico. Isso revela que a redução da RT é influenciada pela quantidade de óleo presente na mistura. Torres et al. (2022) também identificou que a variação do teor de óleo vegetal foi significante no comportamento de resistência à tração de misturas recicladas com 30% e 60% de RAP.

Quanto à variação de temperatura, como o *p*-valor foi maior que 5% e o F $<$ Fcrítico a hipótese nula foi aceita, ou seja, a variável temperatura não acarreta diferenças nos resultados de RT.

Os valores da Tabela 5 mostram que as variáveis "teor de zeólita" e "temperatura" não influenciam significativamente os resultados de RT, pois os seus p-valores foram maiores que a significância de 5% e o F $<$ Fcrítico. Embora a adição da zeólita tenha influenciado no parâmetro de resistência à tração do RAP, conforme mostrado anteriormente pelos resultados do teste *t*, a Tabela 5 indica que as variáveis tempo de condicionamento e temperatura, avaliadas em cada situação de teor de zeólita, não ocasionaram diferenças significativas nos valores de RT, pois os p-valores foram maiores que 5% e os F $<$ Fcrítico.

Tabela 4: ANOVA para RT - Fatores Teor de Óleo de Algodão e Temperatura

	Resistência à tração		
Variável	**F**	**p-valor**	**F crítico**
Teor de óleo	60,1989	**5,21E-06**	3,8379
Temperatura	2,2724	0,1654	4,4590

Tabela 5: ANOVA para RT – Fatores Teor de Zeólita e Temperatura e Tempo de condicionamento e Temperatura

	Resistência à tração					
	1h			2h		
Variável	**F**	**p-valor**	**F crítico**	**F**	**p-valor**	**F crítico**
Teor de zeólita	7,51	0,2227	161,45	4,19	0,2893	161
Temperatura	17,29	0,1502	161,45	0	0,9837	161
	Resistência à Tração					
	0,30%			**0,60%**		
Variável	**F**	**p-valor**	**F crítico**	**F**	**p-valor**	**F crítico**
Tempo de condicionamento	22,16	0,13	161,45	0,06	0,84	161,45
Temperatura	5,46	0,26	161,45	0,39	0,65	161,45

3.2.2. Módulo de resiliência

As Figuras 5(a) e 5(b) mostram o comparativo dos resultados do ensaio de Módulo de Resiliência das amostras 100%RAP, com e sem agentes de reciclagem, respectivamente.

Na avaliação do teste *t* de *Student* verificou-se que as amostras 2%Alg-160, 4%Alg-160, 0,6Z-2h-140, 0,3Z-1h-160 e 0,6Z-1h-160 não apresentaram diferença significativa quanto às amostras sem aditivo, pois os *p*-valores foram de 0,7516 e 0,1952, 0,5973, 0,1174 e 0,2072 respectivamente, superando a significância de 5%. Mas de modo geral, pode-se afirmar que o óleo de algodão diminuiu a rigidez do RAP nas temperaturas de 120°C, 140°C e 160°C e a zeólita diminuiu a rigidez do RAP na temperatura de 140°C, para ambos os tempos de condicionamento.

O óleo de algodão proporcionou uma maior redução de rigidez na temperatura de 120°C. A rigidez aumentou nas temperaturas de 140°C e 160°C, mesmo assim ainda foi inferior a do RAP em ambas as temperaturas. Costa (2022) também verificou que a adição de óleo de motor usado diminuiu a rigidez de amostras com 100% de RAP.

Esses resultados corroboram com a observação de Mogawer et al. (2012) que alertam que os efeitos positivos da utilização de ligantes asfálticos mais moles nas misturas asfálticas recicladas podem ser amenizados pelas condições de temperaturas de produção e pelos fatores de armazenamento, que influenciam fortemente na rigidez e nas propriedades de resistência ao trincamento.

Em todas as temperaturas houve uma redução do módulo de resiliência com o aumento do teor de óleo no RAP, no entanto, nas temperaturas de 160°C não foi observada diferença significativa entre o valor do MR do RAP e os valores das amostras 2%Alg-160 e 4%Alg-160, conforme resultado do teste t de *Student,* pois seus p-valores foram de 0,7516 e 0,1952 respectivamente. Isso também afirma a observação de Mogawer et al. (2012), apontada anteriormente.

O teor de 0,3% de zeólita pode promover uma redução de MR na temperatura de 140°C, em ambos os tempos de condicionamento, pois todas as amostras com esse teor de aditivo confeccionadas à 140°C apresentaram *p*-valor < 5%, conforme mostrado na Figuras 5(b). No entanto na temperatura de 160°C a probabilidade é que aconteça um aumento da rigidez do RAP, principalmente com 2h de condicionamento, condição em que a amostra exibiu *p*-valor de 0,0553.

O teor de 0,6% de zeólita no tempo de condicionamento de 2h a 140°C não alterou a rigidez do RAP, pois o *p*-valor > 5% nesta condição. Na temperatura de 160°C e tempo de condicionamento de 2h aconteceu um aumento da rigidez do RAP, conforme indicado na avaliação do teste *t* de *Student* (*p*-valor < 5%) mostrada na Figura 5(b). Esse aumento do módulo de resiliência pode ser devido aos efeitos do ligante mais rígido e envelhecido do RAP, que é mais pronunciado à medida que a temperatura aumenta (Behnood, 2020).

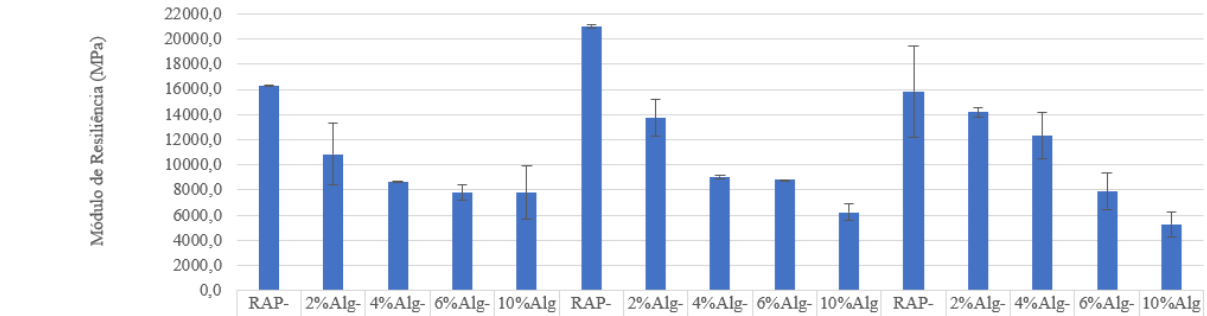
As Tabelas 6 e 7 mostram os resultados da análise de variância para o módulo de resiliência dos cenários RAP + óleo de algodão e RAP + zeólita, respectivamente, feitas para uma conjunto de no mínimo 8 amostras para cada situação. A ANOVA do cenário RAP + Óleo de Algodão foi realizada variando-se inicialmente o teor de óleo e posteriormente a temperatura. Na ANOVA do cenário RAP + zeólita, inicialmente para cada condição de tempo de condicionamento variou-se o teor de zeólita e a temperatura e posteriormente, para cada condição de teor de zeólita variou-se o tempo de condicionamento e a temperatura.

Os valores da Tabela 6 indicam que a variável "teor de óleo" implicou em variações estatisticamente significativas do MR, pois o seu *p*-valor foi menor que a significância de 5% e F>Fcrítico. Realizando a ANOVA para cada condição de tempo de condicionamento e para cada condição de teor de zeólita, verificou-se que a variação de temperatura não

acarretou diferenças expressivas nos resultados de MR pois os seus *p*-valores foram maiores que a significância de 5% e F<Fcrítico.

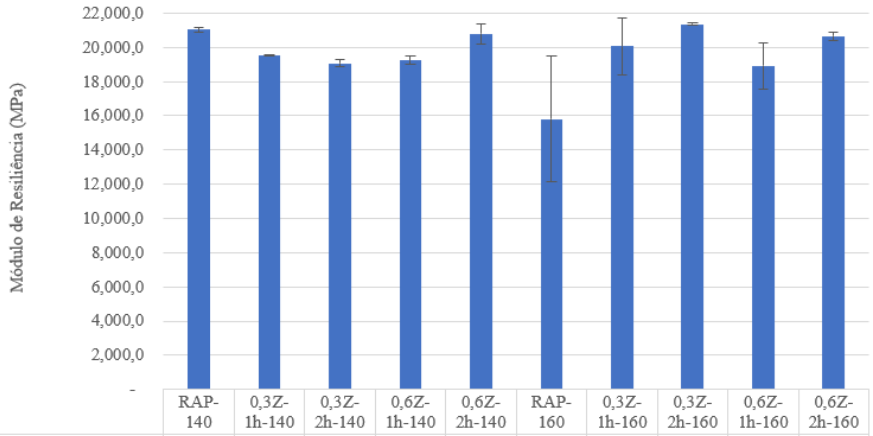
Os valores da Tabela 7 mostram que as variáveis “teor de zeólita” e “temperatura” não influenciam significativamente os resultados de MR, pois os seus p-valores foram maiores que a significância de 5%.

A Tabela 7 indica que as variáveis “tempo de condicionamento” e “temperatura”, avaliadas em cada situação de teor de zeólita, também não ocasionaram diferenças significativas nos valores de módulos de resiliência.



	RAP-120	2%Alg-120	4%Alg-120	6%Alg-120	10%Alg-120	RAP-140	2%Alg-140	4%Alg-140	6%Alg-140	10%Alg-140	RAP-160	2%Alg-160	4%Alg-160	6%Alg-160	10%Alg-160
Módulo de Resiliência (MPa)	16324,7	10867,5	8642,3	7799,5	7793,7	21048,0	13731,3	9041,5	8836,0	6247,2	15822,1	14216,5	12328,0	7874,8	5269,1
Erro	0,03	2468,13	59,69	637,911	2137,56	135,76	1450,57	127,99	0,007	670,21	3666,70	376,89	1832,50	1474,132	980,91
p-valor		0,0000	0,0000	0,0001	0,0203		0,0026	0,0001	0,0050	0,0011		0,7516	0,1952	0,0048	0,0088

(a)



	RAP-140	0,3Z-1h-140	0,3Z-2h-140	0,6Z-1h-140	0,6Z-2h-140	RAP-160	0,3Z-1h-160	0,3Z-2h-160	0,6Z-1h-160	0,6Z-2h-160
Módulo de Resiliência (MPa)	21,048,0	19558,5	19070,5	19235,5	20786,0	15,822,1	20058,0	21364,5	18938,5	20647,5
Erro	135,76	37,48	202,94	234,05	579,83	3666,70	1685,74	85,56	1351,28	263,75
p-valor		0,0044	0,0075	0,0110	0,5973		0,1174	0,0553	0,2072	0,0070

(b)

Figura 5. Módulo de Resiliência: (a) RAP + Óleo de Algodão; (b) RAP + Zeólita.

Tabela 6: ANOVA para MR - Fatores Teor de Óleo de Algodão e Temperatura

	Módulo de Resiliência		
Variável	**F**	**p-valor**	**F crítico**
Teor de óleo	15,9571	0,0007	3,8379
Temperatura	0,7560	0,5004	4,4590

Tabela 7: ANOVA para MR – Fatores Teor de Zeólita e Temperatura e Tempo de condicionamento e Temperatura

	Módulo de Resiliência					
	1h			2h		
Variável	**F**	**p-valor**	**F crítico**	**F**	**p-valor**	**F crítico**
Teor de zeólita	3,28	0,3212	161,45	0,17	0,752	161
Temperatura	0,06	0,8415	161,45	0,79	0,5384	161
	Módulo de Resiliência					
	0,30%			**0,60%**		
Variável	**F**	**p-valor**	**F crítico**	**F**	**p-valor**	**F crítico**
Tempo de condicionamento	0,21	0,73	161,45	422,91	**0,03**	161,45
Temperatura	2,42	0,36	161,45	7,55	0,22	161,45

3.2.3. Volume de vazios

As Figuras 6(a) e 6(b) comparam valores de volume de vazios das amostras 100%RAP, com e sem agentes de reciclagem.

Na avaliação do teste t de *Student* verificou-se que as amostras 2%Alg-140, 4%Alg-140, 0,3Z-1h-140, 0,3Z-2h-140 e 0,6Z-1h-140 não apresentaram diferença significativa quanto às amostras sem agente de reciclagem, pois os p-valores foram de 0,0913, 0,1126, 0,6437, 0,1715 e 00,0731 respectivamente, superando a significância de 5%. Isso mostrou que a redução do volume de vazios das amostras produzidas em temperaturas mais baixas só acontece com a utilização de maiores teores de óleo de algodão. A zeólita, independente do teor e do tempo de condicionamento, só conseguiu reduzir os valores desse parâmetro volumétrico da mistura em temperaturas mais elevadas, possivelmente devido a melhor ativação do seu efeito espumante.

De modo geral, o óleo de algodão proporcionou uma redução no volume de vazios da amostra de RAP, sendo mais expressiva na temperatura de 140°C e 160°C. Na temperatura de 140°C a diminuição do volume de vazios pode também ter sido auxiliada pela maior quantidade de ligante RAP ativo, conforme apresentado nos resultados de DoA'.

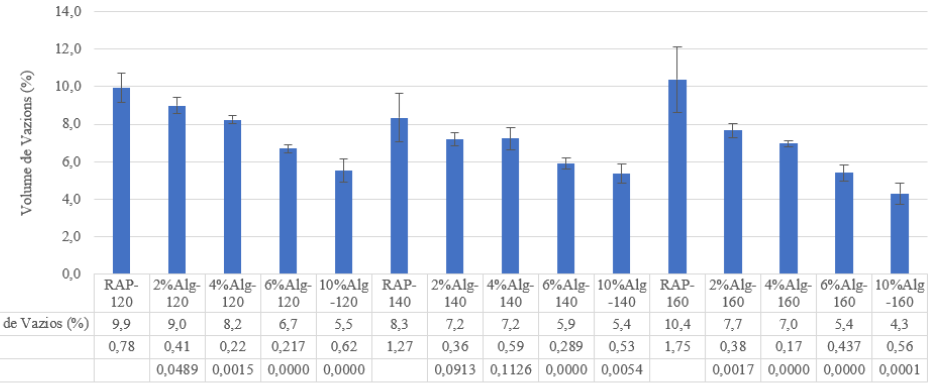
Foi realizado um teste t de *Student* para comparar os volumes de vazios obtidos nas temperaturas de 140°C e 160°C para cada teor de óleo e verificou-se que os resultados não apresentaram diferença significativa entre si.

Comparando as amostras com óleo de algodão com as amostras sem óleo, à 160°C observou-se um comportamento inverso. As amostras sem óleo apresentaram um aumento de volume de vazios nessa temperatura de condicionamento. Com a adição do óleo de algodão aconteceu uma redução do volume de vazios na ordem de 3 a 6% e uma redução do desvio padrão para todos os teores analisados, comprovando a eficiência desse agente de reciclagem na melhoria desse parâmetro volumétrico. Portanto o óleo de algodão pode diminuir a dificuldade em obter a volumetria da mistura desejada em laboratório e em campo (Al-Qadi et al., 2015) e melhorar a homogeneidade dos valores de propriedades mecânicas que possuem relação direta com esse parâmetro volumétrico.

Na temperatura de 140°C não houve alteração significativa no volume de vazios para ambos os teores de zeólita, exceto para a condição 0,6Z-2h-140, onde o teste t de *Student* indicou que o aumento observado no valor desse parâmetro volumétrico foi significativo.

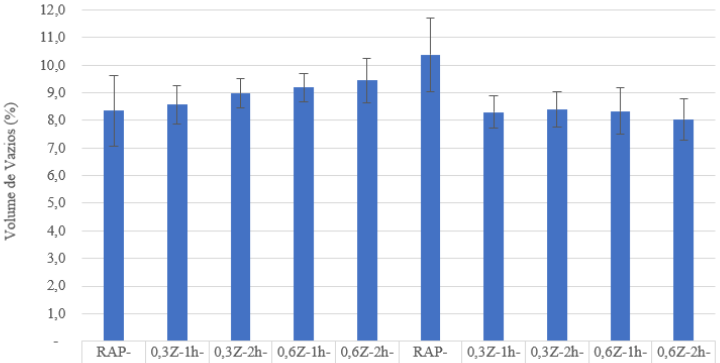
As Tabelas 8 e 9 mostram os resultados da análise de variância para o volume de vazios dos cenários RAP + óleo de algodão e RAP + zeólita, respectivamente, feitas para um conjunto de no mínimo 8 amostras para cada situação. A ANOVA do cenário RAP + Óleo de Algodão foi realizada variando-se inicialmente o teor de óleo e posteriormente a temperatura. Na ANOVA do cenário RAP + zeólita, inicialmente para cada condição de tempo de condicionamento variou-se o teor de zeólita e a temperatura e posteriormente, para cada condição de teor de zeólita variou-se o tempo de condicionamento e a temperatura. A variância dos resultados de Vv das amostras de RAP sem aditivo foi de 1,13.

Por meio dos p-valores da Tabela 8, observa-se que a variação do teor de óleo de algodão acarreta diferenças significativas do volume de vazios da amostra, sendo este menor quanto maior for o teor de óleo. Quanto a temperatura no cenário RAP+óleo de algodão, como o p-valor ficou (0,0588) ficou próximo da significância de 5%, existe uma probabilidade dessa variável também ter influenciado no valor de volume de vazios.



	RAP-120	2%Alg-120	4%Alg-120	6%Alg-120	10%Alg-120	RAP-140	2%Alg-140	4%Alg-140	6%Alg-140	10%Alg-140	RAP-160	2%Alg-160	4%Alg-160	6%Alg-160	10%Alg-160
Volume de Vazios (%)	9,9	9,0	8,2	6,7	5,5	8,3	7,2	7,2	5,9	5,4	10,4	7,7	7,0	5,4	4,3
Erro	0,78	0,41	0,22	0,217	0,62	1,27	0,36	0,59	0,289	0,53	1,75	0,38	0,17	0,437	0,56
p-valor		0,0489	0,0015	0,0000	0,0000		0,0913	0,1126	0,0000	0,0054		0,0017	0,0000	0,0000	0,0001

(a)



	RAP-140	0,3Z-1h-140	0,3Z-2h-140	0,6Z-1h-140	0,6Z-2h-140	RAP-160	0,3Z-1h-160	0,3Z-2h-160	0,6Z-1h-160	0,6Z-2h-160
Zeo-Temp, Teor e Cond	8,3	8,6	9,0	9,2	9,4	10,4	8,3	8,4	8,3	8,0
Erro	1,27	0,68	0,54	0,52	0,81	1,32	0,59	0,64	0,84	0,74
p-valor		0,6437	0,1715	0,0731	0,0296		0,0004	0,0007	0,0008	0,0001

(b)

Figura 6. Volume de Vazios: (a) RAP + Óleo de Algodão; (b) RAP + Óleo de Algodão.

Tabela 8: ANOVA para Vv – Fatores Teor de Óleo de algodão e Temperatura

	Volume de Vazios		
Variável	**F**	**p-valor**	**F crítico**
Teor de óleo	22,4621	**0,0002**	3,8379
Temperatura	4,1221	**0,0588**	4,4590

O teste t de *Student* indicou que a temperatura de 160°C é mais eficiente na redução do volume de vazios das amostras com zeólita, mas não há diferença significativa entre as amostras com 0,3% e 0,6%, conforme aponta os resultados da ANOVA (Tabela 9). Entre as amostras com zeólita também não houve interferência significativa das variáveis tempo de condicionamento e temperatura no volume de vazios (Tabela 9).

Tabela 9: ANOVA para Vv – Fatores Teor de Zeólita e Temperatura e Tempo de condicionamento e Temperatura

	Volume de Vazios					
	1h			**2h**		
Variável	**F**	**p-valor**	**F crítico**	**F**	**p-valor**	**F crítico**
Teor de zeólita	1,26	0,4635	161,45	0,02	0,9141	161,45
Temperatura	3,57	0,3099	161,45	5,96	0,2476	161,45
	Volume de Vazios					
	0,30%			**0,60%**		
Variável	**F**	**p-valor**	**F crítico**	**F**	**p-valor**	**F crítico**
Tempo de condicionamento	2,46	0,36	161,45	0,01	0,95	161,45
Temperatura	6,8	0,23	161,45	16,64	0,15	161,45

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As principais conclusões e constatações desse estudo foram as seguintes:

- Os resultados do DoA' calculados por meio do volume de vazios e do módulo de resiliência demonstraram coerência com os resultados obtidos pela metodologia já existente na literatura, que faz uso do RT como ensaio padrão para a determinação desse grau de ativação relativo do ligante RAP, pois todos eles indicaram a temperatura de 140°C como aquela que promove a maior mobilização do ligante envelhecido.
- Temperaturas mais altas (acima de 140°C) promovem uma ativação do ligante do RAP, mas também incrementam o seu envelhecimento e a sua queima, acarretando numa redução da coesão da mistura, que é refletida nos maiores valores de Vv e menor valores de RT e MR.
- Tanto o óleo de algodão como a zeólita promovem uma redução na resistência à tração do RAP.
- O óleo de algodão tem o potencial de reduzir a rigidez do RAP, entretanto em temperaturas de condicionamento mais elevadas (160°C), mesmo com a utilização de 2% e 4% de óleo, a mistura apresentou rigidez semelhando à do RAP sem aditivo. O envelhecimento adicional devido ao incremento de temperatura talvez tenha ocasionado esse aumento na rigidez do RAP, indicando a necessidade da utilização de uma maior quantidade de óleo na mistura para que, de fato, houvesse uma diminuição do MR.
- O teor de 0,3% de zeólita parece ser o mais promissor para a redução da rigidez do RAP em temperaturas mais baixas (140°C), independente do tempo de condicionamento.
- A temperatura e o teor de óleo de algodão influenciaram na redução do volume de vazios, sendo mais expressiva na temperatura de 140°C e 160°C e nas condições de maiores teores de óleo. Nas amostras com zeólita, a redução do volume de vazios aconteceu somente na temperatura de 160°C, independente do teor desse aditivo.

Essa redução pode ter sido auxiliada pela maior quantidade de ligante RAP ativo nessas temperaturas, conforme valores de DoA'.

- A temperatura de 160°C é mais eficiente na redução do volume de vazios das amostras com zeólita, independente do teor desse aditivo.
- Ambos os aditivos trouxeram benefícios na interação com o RAP. No uso do óleo de algodão, a temperatura de 140°C parece ser promissora pois além de proporcionar uma maior ativação do ligante envelhecido, também promoveu bons resultados de RT, MR e Vv. Nesta temperatura, o teor de 4% e 6% de óleo de algodão poderia ser utilizado sem prejuízos à resistência e à rigidez da mistura, no entanto para uma maior redução do Vv indica-se o teor de 10%.
- Na temperatura de 140°C, em termos de RT e MR o teor de 0,3% de zeólita é o mais indicado, independente do tempo de condicionamento, entretanto uma redução do Vv da mistura só aconteceu com o aumento da temperatura.

As principais sugestões para trabalhos futuros são as seguintes:

- O DoA' calculado por meio do volume de vazios e do módulo de resiliência pode ser aplicado em RAPs com características físicas diferentes, avaliando-se um conjunto maior de temperaturas de condicionamento.
- Outros ensaios mecânicos, a exemplo da vida de fadiga e do *flow number,* ainda podem ser avaliados para os cenários considerados nesse estudo no intuito de validar essas comprovações.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossa sincera gratidão a FAPESQ - Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba, pelo financiamento que tornou possível a publicação deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Al-Qadi, I.L.; H. Ozer; J. Lambros et al. (2015). *Testing Protocols to Ensure Performance of High Asphalt Binder Replacement Mixes Using RAP and RAS.* Springfield: Illinois Center for Transportation (Research Report No. FHWA-ICT-15-017).

Al-Qadi, I.L.; M. Elseifi e S.H. Carpenter (2007). *Reclaimed Asphalt Pavement - A Literature Review*. Springfield: Illinois Center for Transportation (Research Report FHWA-ICT-07-001).

Arshad, M. e M.F. Ahmed (2017) Potential use of reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate in base/subbase layers of flexible pavements. *Construction & Building Materials*, v. 151, p. 83-97. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.028.

Behnood, A. (2020) A review of the warm mix asphalt (WMA) technologies: effects on thermo-mechanical and rheological properties. *Journal of Cleaner Production*, v. 259, p. 120817. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120817.

Boeira, F.D. (2018). *Estudo da rigidez, da deformação permanente e da fadiga de misturas asfálticas com ligantes convencionais e modificados.* Tese (doutorado). Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

Canestrari, F.; F. Cardone; A. Graziani et al. (2010) Adhesive and cohesive properties of asphalt-aggregate systems subjected to moisture damage. *Road Materials and Pavement Design*, v. 11, n. sup1, p. 11-32. DOI: 10.1080/14680629.2010.9690325.

Carizzio Monteiro, A.M.; J.P.S. Silva e L.R. Rezende (2023) Estudo laboratorial de misturas asfálticas recicladas à quente com diferentes teores de asfalto fresado.*Transportes*, v. 31, n. 1, p. 2771. DOI: 10.58922/transportes.v31i1.2771.

Copeland, A. 2011. *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice*. McLean: Federal Highway Administration (Research Report No. FHWA-HRT-11-021).

Costa, B.C. (2022) *Análise do envelhecimento, rigidez e suscetibilidade à presença de água em misturas recicladas com adição de agentes de reciclagem.* Tese (doutorado). Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

Dai Lu, X. e M. Saleh (2016) Evaluation of warm mix asphalt performance incorporating high RAP content. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 43, n. 4, p. 343-50. DOI: 10.1139/cjce-2015-0454.

DNIT. (1994) *DNIT 053-ME: Misturas Betuminosas - Percentagem de Betume.* Brasília: DNIT.

DNIT. (2006*) DNIT 031-ME: Pavimentos Flexíveis - Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço*. Brasília: DNIT.

DNIT. (2018a) *DNIT 135-ME: Pavimentação Asfáltica - Misturas Asfálticas - Determinação do Módulo de Resiliência - Método de Ensaio.* Brasília: DNIT.

DNIT. (2018b) *DNIT 136-ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio.* Brasília: DNIT.

DNIT. (2022) DNIT 428-ME: *Pavimentação – Misturas Asfálticas – Determinação da Densidade Relativa Aparente e da Massa Específica Aparente de Corpos de Prova Compactados – Método de Ensaio.* Brasília: DNIT.

Elkashef, M.; J. Podolsky; R.C. Williams et al. (2017) Preliminary examination of soybean oil derived material as a potential rejuvenator through Superpave criteria and asphalt bitumen rheology. *Construction & Building Materials*, v. 149, p. 826-36. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.195.

Hill, B.; B. Behnia; W.G. Buttlar et al. (2013) Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement through mechanical performance tests and an acoustic emission approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 25, n. 12, p. 1887-97. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000757.

Hugener, M.; D. Wang; A. Cannone Falchetto et al. (2022) Recommendation of RILEM TC 264 RAP on the evaluation of asphalt recycling agents for hot mix asphalt. *Materials and Structures*, v. 55, n. 2, p. 31. DOI: 10.1617/s11527-021-01837-0.

Islam, M.R.; M.I. Hossain e R.A. Tarefder (2015) A study of asphalt aging using Indirect Tensile Strength test. *Construction & Building Materials*, v. 95, p. 218-23. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.159.

Kato, R.B. (2016) *Estudo da influência do resíduo de beneficiamento de cobre sulfetado nas propriedades do concreto asfáltico*. Tese (Doutorado). Engenharia de Recursos Naturais, Universidade Federal do Pará, Amazônia.

Lo Presti, D.; K. Vasconcelos; M. Orešković et al. (2019) On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agents. *Road Materials and Pavement Design*, v. 21, n. 8, p. 2071-90. DOI: 10.1080/14680629.2019.1607537.

Mallick, R.B.; P.S. Kandhal e R.L. Bradbury (2008) *Using Warm Mix Asphalt Technology to Incorporate High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Material in Asphalt Mixtures*. Washington: Transportation Research Board, 2008. DOI: 10.3141/2051-09.

Mcdaniel, R. e R.M. Anderson (2001*). Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual*. Washington: Transportation Research Board. (NCHRP REPORT 452).

Melo Neto, O.M. (2022) *Viabilidade de misturas asfálticas recicladas com ácido graxo da borra do óleo de soja*. Dissertação (mestrado). Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

Mogawer, W.S.; E.H. Fini; A.J. Austerman et al. (2012) Performance characteristics of high reclaimed asphalt pavement containing bio-modifier, *Road Materials and Pavement Design*. v. 17, n. 3, p. 753-67. DOI: 10.1080/14680629.2015.1096820.

Pires, G.M.; D. Lo Presti e G.D. Airey (2019) A practical approach to estimate the degree of binder activity of reclaimed asphalt materials. *Road Materials and Pavement Design*, v. 22, n. 5, p. 1093-116. DOI: 10.1080/14680629.2019.1663244.

Rocha Segundo, I.G.; V.T.F. Castelo Branco; K.L. Vasconcelos et al. (2016) Misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado. *Transportes*, v. 24, n. 4, p. 85-94. DOI: 10.14295/transportes.v24i4.1148.

Sanchez-Alonso, E.; G. Valdes-Vidal e A. Calabi-Floody (2020) Experimental study to design warm mix asphalts and recycled warm mix asphalts using natural zeolite as additive for sustainable pavements. *Sustainability*, v. 12, n. 3, p. 980-93. DOI: 10.3390/su12030980.

Sengoz, B.; A. Topal; J. Oner et al. (2016) Performance evaluation of warm mix asphalt mixtures with recycled asphalt pavement. *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*. v. 61, n. 1, p. 117-12. DOI: 10.3311/PPci.8498.

Tao, M. e R.B. Mallick (2009) Effects of warm-mix asphalt additives on workability and mechanical properties of reclaimed asphalt pavement material. *Journal of the Transportation Research Board*. v. 18, n. 2126, p. 151-60. DOI: 10.3141/2126-18.

Torres, P.R.B.; A.E.F.L. Lucena; T.M. Sousa et al. (2022) Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas modificadas com a adição de óleo vegetal residual. *Transportes*, v. 30, n. 1, p. 2585. DOI: 10.14295/transportes.v30i1.2585.

Vaiana, R.; T. Iuele e V. Gallelli (2013) Warm mix asphalt with synthetic zeolite: a laboratory study on mixes: a laboratory study on mixes workability. *International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 6, n. 5, p. 562-9.

Zhao, W. (2011). The effects of fundamental mixture parameters on hot-mix asphalt performance properties. Disponível em: <https://tigerprints.clemson.edu/all_dissertations/801> (acesso em 02/08/2022).

Zhu, J.; T. Ma e Z. Fang (2020) Characterization of agglomeration of reclaimed asphalt pavement for cold recycling. *Construction & Building Materials*, v. 240, p. 1-8. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117912.

Ziegler, C.R.; A.G. Barros; C.C.V.P. Silva et al. (2017) Avaliação da adição do óleo de algodão bruto nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo. In *XXXI ANPET*. Recife. Rio de Janeiro: ANPET, p. 1.