

Efeito da incorporação de resíduos PVC como agregado alternativo em misturas asfálticas à quente

Effect of incorporation of PVC waste as alternative aggregate in hot asphalt mixtures

DOI:10.34117/bjdv8n10-095

Recebimento dos originais: 05/09/2022

Aceitação para publicação: 06/10/2022

Lucas Santos Felicetti

Mestrando em Engenharia de Transportes

Instituição: Instituto Militar de Engenharia (IME)

Endereço: Praça Gen. Tibúrcio, 80, Urca, Rio de Janeiro – RJ

E-mail: lucas.felicetti@hotmail.com

Antônio Carlos Rodrigues Guimarães

Doutor em Engenharia Civil

Instituição: Instituto Militar de Engenharia (IME)

Endereço: Praça Gen. Tibúrcio, 80, Urca, Rio de Janeiro - RJ

E-mail: guimaraes@ime.eb.br

Filipe Almeida Corrêa do Nascimento

Doutor em Engenharia de Transportes

Instituição: Instituto Militar de Engenharia (IME)

Endereço: Praça Gen. Tibúrcio, 80, Urca, Rio de Janeiro - RJ

E-mail: filipe.nascimento@ime.eb.br

RESUMO

Diante da necessidade de pavimentos que atendam às condições de volume e carga de tráfego cada vez maiores, novos materiais têm sido pesquisados em busca de melhorias no seu desempenho mecânico. Por outro lado, há uma grande preocupação ambiental em relação ao descarte de resíduos plásticos que se acumulam em lixões e aterros sanitários, o que impacta negativamente o meio ambiente. Neste contexto, este estudo investiga o efeito da incorporação de resíduos Policloreto de Vinila (PVC), como agregado alternativo em misturas asfálticas usinadas à quente. O PVC foi obtido de resíduos de tubulação de água, triturados em tamanhos entre 2 e 4,75 mm e adicionados nos teores 0,5% e 1% do peso da mistura, por meio do processo a seco. Uma mistura sem PVC também foi produzida para fins de comparação. A avaliação das misturas foi realizada com base nos parâmetros volumétricos e nos ensaios mecânicos de estabilidade Marshall, resistência à tração e fadiga por compressão diametral à tensão controlada. Os resultados mostraram uma melhora significativa da resistência à fadiga nas misturas com 1% de PVC. Assim, este trabalho busca contribuir para a redução das trincas dos pavimentos e, conseqüentemente, o aumento da sua vida útil, possibilitando também permitir uma forma de destinação ambientalmente adequada para os resíduos PVC.

Palavras-chave: resíduos PVC, misturas asfálticas, vida de fadiga.

ABSTRACT

Due to the demand for stronger pavements that meet the increasing volume and traffic load requirements, new materials have been researched to find ways to improve their mechanical performance. On the other hand, there is a great environmental concern about the disposal of plastic waste that accumulates in dumps and landfills, which negatively impacts the environment. In this context, this study investigates the effect of incorporating Polyvinyl Chloride (PVC) waste as an alternative aggregate in hot asphalt mixtures. PVC was obtained from water pipe waste, crushed to sizes between 2 and 4.75 mm and added at 0.5% and 1% of the weight of the mixture, through the dry process. A mixture without PVC was also produced for comparison purposes. The evaluation of the mixtures was carried out based on the volumetric parameters and mechanical tests of Marshall stability, tensile strength and fatigue by diametral compression at controlled tension. The results showed a significant improvement in fatigue strength in mixtures with 1% PVC. Thus, this work seeks to contribute to the reduction of cracks in the pavement and, consequently, to increase its useful life, also allowing for an environmentally appropriate form of disposal for PVC waste.

Keywords: PVC wastes, asphalt mixtures, fatigue life.

1 INTRODUÇÃO

O modal rodoviário é o principal sistema de transportes no Brasil, com fundamental contribuição para o desenvolvimento econômico e o crescimento do país, sendo responsável por 61% do transporte de cargas e 95% do transporte de passageiros. Entre 2009 e 2019, houve um aumento de 80,8% da frota no país (CNT, 2019), o que intensifica o processo de desgaste do pavimento. Esses dados mostram a importância e a necessidade em desenvolver pesquisas testando a viabilidade de materiais alternativos, a fim de melhorar o desempenho mecânico do pavimento, aumentar sua durabilidade e evitar o aparecimento prematuro de patologias.

Concomitantemente, há uma grande preocupação ambiental em relação ao descarte de resíduos plásticos que se acumulam em lixões e aterros sanitários, o que impacta negativamente o meio ambiente. Segundo a Organização das Nações Unidas para o Meio Ambiente, o mundo produz anualmente cerca de 300 milhões de toneladas de resíduos plásticos, porém apenas 14% são recolhidos para reciclagem e 9% são reciclados (Silva *et al.*, 2021). Em relação ao plástico PVC, estima-se que em 2013, foram utilizados mundialmente cerca de 39,3 milhões de toneladas (Ceresana Research, 2014). Isto porque é um material vastamente empregado, principalmente no setor da construção civil, sendo matéria prima para produção de tubos e conexões, janelas, forros, entre outros. Dessa forma, embora o consumo não possa ser interrompido, a reciclagem pode ser uma alternativa benéfica ao meio ambiente (Barboza e Souza, 2022; Batista, 2022).

Diante disso, o Governo Federal vem desenvolvendo políticas de incentivo ambiental com abordagens sustentáveis em relação à gestão da reintegração de resíduos sólidos. A Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída por meio da Lei 12.305/2010, incentiva a coleta e o reaproveitamento dos resíduos sólidos, promovendo sua destinação final ambientalmente adequada. Além disso, recentemente foi sancionado o Decreto 11.043, de 13 de abril de 2022, que estabelece como uma das metas, o encerramento dos lixões e aterros sanitários até 2024 e o reaproveitamento da metade dos resíduos sólidos gerados até 2040 (BRASIL, 2022).

A reciclagem do PVC em misturas asfálticas à quente é um assunto pouco pesquisado e novo. No banco de dados de publicações acadêmicas da Scopus, encontra-se apenas 22 artigos relacionados, dos quais 17 foram publicados a partir de 2018. A maioria deles relatou melhoria na resistência à deformação permanente nas misturas constituídas por PVC, no entanto, não há registros do comportamento à fadiga quando o PVC é adicionado em substituição de parte dos agregados da mistura.

Dentro desse contexto, o presente trabalho tem por objetivo analisar o comportamento à fadiga de misturas asfálticas à quente, testando a viabilidade técnica da incorporação de resíduos PVC como agregado alternativo. Dessa forma, este estudo busca contribuir para melhorar o desempenho de pavimentos asfálticos e, simultaneamente, mitigar os impactos ambientais causados pela disposição final inadequada dos resíduos plásticos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

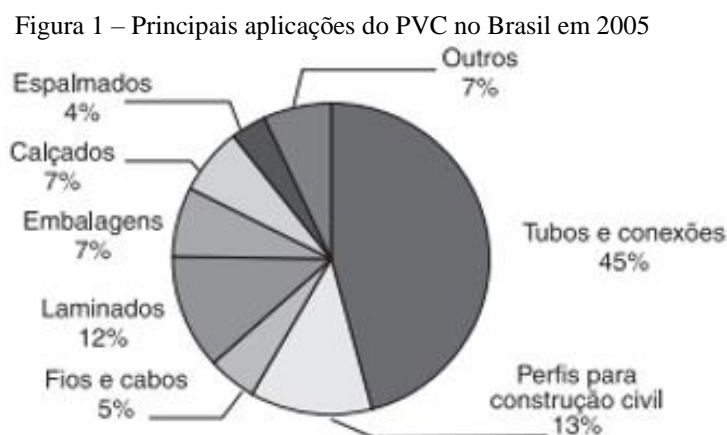
2.1 POLÍMERO PVC

O PVC é um polímero composto de 57% de peso em cloro, obtido da eletrólise da água do mar e 43% de derivados de petróleo. Caracteriza-se por ser um material termoplástico, amorfo e reciclável, que apresenta temperatura de transição 87°C, ponto de fusão 212°C (Canevarolo, 2006) e um baixo peso específico, de 1,4 g/cm³ (Rodolfo JR. *et al.*, 2006).

O polímero PVC é considerado o segundo termoplástico mais consumido no mundo (Grisa *et al.*, 2011), tendo uma ampla variedade de aplicações. As principais utilizações estão relacionadas à área da construção civil, sendo, por exemplo, matéria prima para produção de tubos, conexões, cabos elétricos, perfis de portas e janelas, o que somados correspondem a aproximadamente 62% da demanda total de PVC no Brasil. Isso porque caracteriza-se por ser um material com grande durabilidade e vida útil, uma vez

que 42% desses produtos apresentam ciclo de vida entre 20 e 100 anos (Rodolfo JR. *et al.*, 2006).

Também está presente na constituição de filmes plásticos para embalagens de alimentos, na confecção de solados para calçados, na fabricação de piscinas, lonas e em geomembranas para a proteção de solo (Rodolfo JR. *et al.*, 2006). A Figura 1 ilustra as principais aplicações do PVC no Brasil.



Fonte: Rodolfo JR. *et al.* (2006)

No entanto, o uso do PVC requer certos cuidados. Um deles refere-se ao processo de degradação. A exposição desse polímero puro (sem adição de estabilizantes) ao calor e à radiação ultravioleta, pode causar, dependendo da intensidade e tempo de exposição, a liberação do Cloreto de Hidrogênio (HCl), que é um gás tóxico. Esse processo de degradação pode ser observado pela mudança da coloração para um tom avermelhado do polímero, sendo mais escuro quanto maior o grau de degradação. Por esta razão, para o processamento industrial de PVC, é necessário o uso de estabilizantes térmicos, que atuam capturando e estabilizando os íons cloreto formados, controlando a formação de HCl e reduzindo significativamente a reação de degradação. Dessa forma, o PVC pode ser moldado em produtos comerciais (Canevarolo, 2006).

2.2 UTILIZAÇÃO DO PVC EM MISTURAS ASFÁLTICAS USINADAS À QUENTE

A pesquisa bibliográfica sobre a incorporação de PVC em misturas asfálticas à quente foi realizada a partir do banco de dados de publicações acadêmicas da Scopus. Foram selecionadas as principais pesquisas com o intuito de compreender os atuais avanços científicos e identificar as lacunas de pesquisa para direcionar futuros estudos.

Os termos de pesquisas foram definidos a partir dos seguintes operadores booleanos, em inglês: ((HMA OR "hot mix asphalt" OR "asphalt mix" OR "asphalt mixtures") AND (PVC OR "Polyvinyl Chloride")). A pesquisa buscou os estudos publicados até setembro de 2022.

Dessa forma, apenas 22 estudos testando PVC em misturas asfálticas à quente foram encontrados. Desses, o PVC é tipicamente incorporado por meio do processo úmido, conforme os estudos de Arabani e Taleghania (2017), Ezzat e Abed (2020), Fakhri *et al.* (2022), Salman e Jaleel (2020) e Ziari *et al.* (2019). Poucos trabalhos, como de Movilla-Quesada *et al.* (2019) e Sinha *et al.* (2021), testaram adicionando pelo processo seco. Além disso, a maioria dos estudos anteriores investigou o efeito do PVC na resistência à deformação permanente, no entanto, não há registros do comportamento quanto à fadiga deste material quando adicionado de forma a substituir parte dos agregados da mistura.

Movilla-Quesada *et al.* (2019) avaliaram a utilização de resíduos PVC, PET (Polietileno Tereftalato) e PEAD (Polietileno de Alta Densidade) em duas granulometrias: 0,25 a 2 mm e 5 a 10 mm. Os três tipos de resíduos foram incorporados simultaneamente, pelo método seco, porém substituindo 10% do teor ótimo do ligante. Os autores relataram que a adição desses resíduos permitiu uma melhora na resistência à compressão da mistura, mostrando maior dissipação de energia e a redução da deformação permanente em até 80%.

Sinha *et al.* (2021) testou materiais plásticos provenientes de resíduos eletrônicos, como placa de circuitos eletrônicos e outros componentes de PVC, como substitutos parciais dos agregados graúdos. Além disso, testaram o emprego de pó de mármore como filler na mistura asfáltica. Os resíduos plásticos foram adicionados em teores de 4%, 8% e 12% por peso do agregado e em tamanhos de 6 mm. Os autores observaram um aumento significativo da estabilidade e fluência Marshall, à medida que a porcentagem de plásticos aumenta.

Salman e Jaleel (2020) analisaram o efeito da adição de PVC nas propriedades do ligante. Testaram as percentagens 2,5, 5, 7,5, 10, 12 e 15% do peso de betume e em tamanhos de 2,5 a 3 mm. Relataram que o incremento do teor de PVC permitiu a redução da penetração e da ductilidade e o aumento do ponto de amolecimento. Com a adição de 15% de PVC, a penetração e a ductilidade diminuíram, respectivamente, 62,8% e 85% e o ponto de amolecimento aumentou 6%.

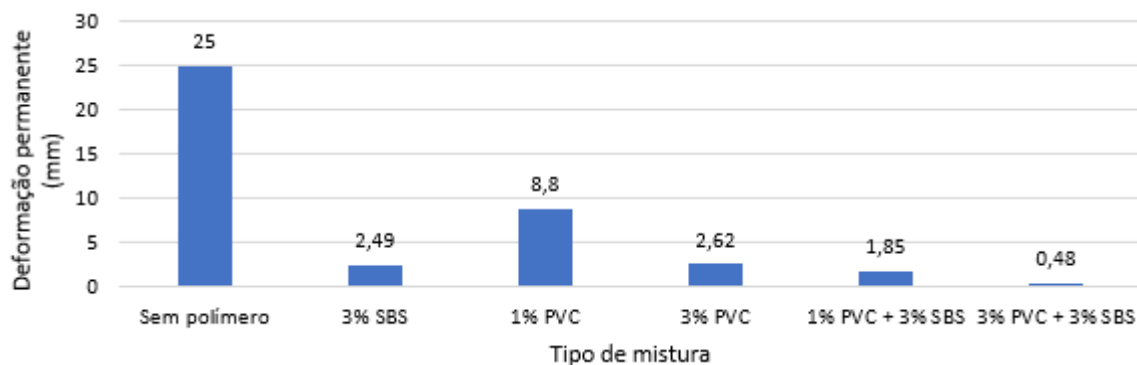
Arabani e Taleghania (2017) adicionaram ao betume, resíduos PVC com granulometria menor que 0,3 mm e em porcentagens 1%, 3% e 5% do peso do ligante. Os autores também relataram melhoria nas propriedades do betume, como o aumento do ponto de amolecimento e redução da penetração. Com base nos resultados do ensaio Marshall, os autores constataram que, com o incremento do teor de PVC, o valor da estabilidade aumentou, enquanto a fluência reduziu, indicando melhor resistência à deformação permanente. Esse aumento da resistência também foi observado no ensaio com carregamento repetido, investigando também o efeito de diferentes temperaturas. Os resultados indicaram que as misturas contendo 5% de PVC são mais resistentes à deformação permanente e que a adição desses resíduos leva à redução da sensibilidade térmica, melhorando, assim, o desempenho quando expostos à temperaturas mais altas.

Ziari *et al.* (2019) testaram o efeito da adição de PVC e do resíduo em pó proveniente do forno elétrico a arco. Ambos os resíduos foram incorporados no ligante nas proporções 5% e 10%. Observaram o aumento da resistência à tração com o incremento dos resíduos. A resistência ao dano por umidade induzida também foi melhorada comparada à mistura sem aditivos. As misturas com 10% de resíduos apresentaram melhor resistência à deformação permanente.

Fakhri *et al.* (2022) analisaram o uso de dois tipos de PVC reciclado (provenientes de tubulação de água e de embalagens), incorporando nas porcentagens 2%, 3,5% e 5%, do peso de betume, em misturas do tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA), por meio do processo úmido. Os autores relataram que ambos os resíduos possibilitaram melhorar a resistência à tração, ao dano por umidade induzida, à deformação permanente e à fadiga. A adição de 5% de PVC proveniente de tubos aumentou 71% da resistência à tração, 128% da resistência ao dano por umidade induzida, 101% da rigidez, 66% da vida de fadiga (à 15°C) e 65% da resistência à deformação permanente (à 60°C).

Ezzat e Abed (2020) estudaram os efeitos do uso de polímeros PVC e SBS (Estireno Butadieno) na resistência à deformação permanente da mistura asfáltica, incorporando ao ligante nas proporções de 1% e 3%. Os autores relataram que a adição de 3% de SBS e 3% de PVC possibilitou reduzir 98,08% da profundidade do afundamento do trilho de rodas em temperaturas de 60 °C, quando comparado à mistura sem aditivos. Os resultados obtidos estão indicados no gráfico da Figura 2.

Figura 2 – Resultados obtidos por Ezzat e Abed (2020)



Fonte: Ezzat e Abed (2020)

3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O programa experimental consistiu em três etapas: caracterização dos materiais empregados, dosagem das misturas e realização dos ensaios mecânicos, conforme apresentado no fluxograma da Figura 3. Três projetos de mistura foram elaborados: utilizando 0%, 0,5% e 1% de PVC. A dosagem do teor de ligante foi realizada para as misturas com 0% e 0,5% de PVC. Para a mistura 1% de PVC foi adotado o teor ótimo de ligante encontrado para a mistura 0,5% de PVC. A dosagem foi realizada a partir da moldagem de 15 amostras. Para cada mistura, foram produzidas 2 amostras para o ensaio de estabilidade Marshall, 2 para resistência à tração e 8 para o ensaio de vida de fadiga. Ao todo 66 corpos de prova foram compactados em laboratório pela metodologia Marshall, conforme resumido na Tabela 1. Os ensaios foram realizados utilizando os equipamentos pertencentes aos laboratórios de Ligante e Misturas Asfálticas do Instituto Militar de Engenharia e da Usina de Asfalto do Caju – Prefeitura do Rio de Janeiro.

Figura 3 – Fluxograma das etapas do trabalho

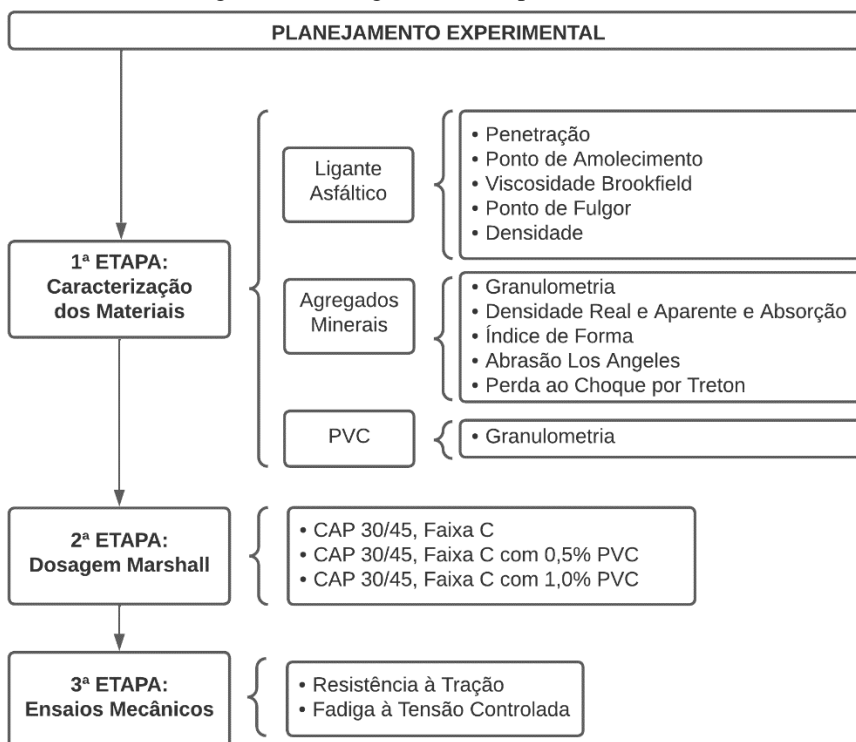


Tabela 1 – Quantitativo de corpos de prova produzidos

Ensaio	Projetos de mistura		
	0%	0,5% PVC	1% PVC
Dosagem Marshall	15	15	-
Estabilidade Marshall	2	2	2
Resistência à Tração	2	2	2
Vida de Fadiga	8	8	8

3.1 MATERIAIS

O PVC utilizado nesta pesquisa é proveniente de tubos e conexões do tipo rígido. Estes resíduos da construção civil foram quebrados mecanicamente em fragmentos com tamanhos que variam entre 2 mm e 4,8 mm (Figura 4).

Figura 4 – Resíduos de PVC utilizados na pesquisa



O Cimento Asfáltico de Petróleo utilizado é do tipo 30/45 e foi fornecido pela Usina de Asfalto da Prefeitura do Rio de Janeiro, sendo de origem da Refinaria Duque de Caxias (Reduc). A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios realizados para a caracterização do ligante asfáltico. Os valores encontrados estão dentro dos limites preconizados pela Agência Nacional de Petróleo (ANP).

Tabela 2 – Caracterização do ligante

Ensaio CAP 30/45	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração (100g, 5s, 25°C)	DNIT ME 155/10	30 a 45	34,6	0,1 mm
Ponto de Amolecimento	ABNT NBR 6560	mín 52	55,7	°C
Viscosidade Brookfield a 135°C, SP21, 20rpm	ABNT NBR 15184	mín 374	562	cP
Viscosidade Brookfield a 150°C	ABNT NBR 15184	mín 203	270	cP
Viscosidade Brookfield a 177°C, SP21	ABNT NBR 15184	76 a 285	96	cP
Ponto de Fulgor	ABNT NBR 11341	mín 235	> 260°C	°C
Densidade relativa à 20/4 °C	ABNT NBR 6296	-	1,054	-

Os agregados minerais britados utilizados no trabalho foram fornecidos pela Usina de Asfalto do Caju - Prefeitura do Rio de Janeiro. Três tipos de agregados foram utilizados: o Pó de Pedra é proveniente da pedreira Petra Agregados - RJ, a Brita 0 é oriunda da pedreira IPÊ Engenharia-RJ e a Brita 1 da pedreira Santa Luzia - RJ. A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios realizados para a caracterização física dos agregados, de acordo com as respectivas normas vigentes. A Tabela 4 e a Figura 5 mostram os resultados da análise granulométrica dos agregados, realizada conforme a DNER ME 083/98.

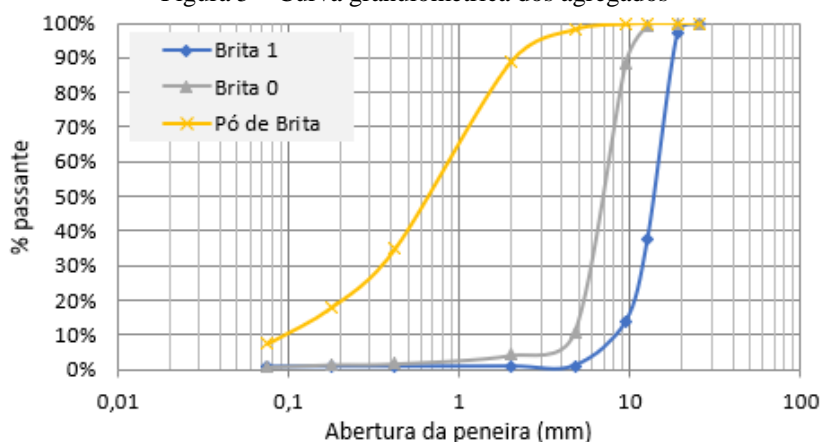
Tabela 3 – Caracterização dos agregados

Ensaio	Método	Resultados			Limites aceitáveis (IPR, 1998)
		Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra	
Densidade Real (g/cm ³)	DNER ME 081/98 e DNER ME 084/95	2,668	2,697	2,718	-
Densidade Aparente (g/cm ³)		2,574	2,597	-	-
Absorção (%)		2,17%	2,25%	-	-
Índice de Forma	DNIT ME 425/20	1,9	2,29	-	< 3
Abrãção Los Angeles (%)	DNER ME 035/98	46,75%	46,11%	-	< 65
Ensaio Treton (%)	DNER ME 399/99	31,98%	-	-	< 60

Tabela 4 – Granulometria dos agregados

Peneira	% passante				
	ABNT	mm	Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra
1"	25,4		100%	100,00%	100,00%
3/4"	19,1		97,44%	100,00%	100,00%
1/2"	12,7		37,37%	99,21%	100,00%
3/8"	9,5		13,88%	88,55%	99,76%
Nº 4	4,75		1,03%	10,88%	98,16%
Nº 10	2		0,84%	4,23%	88,74%
Nº 40	0,42		0,79%	1,81%	34,94%
Nº 80	0,18		0,79%	1,54%	18,16%
Nº 200	0,075		0,73%	0,85%	7,52%

Figura 5 – Curva granulométrica dos agregados



3.2 MÉTODOS

A composição granulométrica das amostras produzidas teve como referência a faixa C do DNIT 031/2006. De forma a enquadrar-se nos limites dessa faixa granulométrica, o traço da mistura convencional foi composto por 17% de brita 1, 35% de brita 0 e 48% de pó de pedra, conforme indicado na Tabela 5. O PVC foi adicionado nos teores 0,5% e 1,0% do peso da mistura, substituindo o percentual da massa do pó de pedra.

Tabela 5 – Composição dos agregados da mistura convencional conforme a faixa C do DNIT

Peneira mm	Brita 1 17%		Brita 0 35%		Pó de Pedra 48%		% mistura	Faixa C	
	17%	17,0%	35%	35,0%	48%	48,0%		% mín	% máx
25,4	100,0%	17,0%	100,0%	35,0%	100,0%	48,0%	100,0%	100	100
19,1	97,4%	16,6%	100,0%	35,0%	100,0%	48,0%	99,6%	100	100
12,7	37,4%	6,4%	99,2%	34,7%	100,0%	48,0%	89,1%	80	100
9,5	13,9%	2,4%	88,5%	31,0%	99,8%	47,9%	81,2%	70	90
4,75	1,0%	0,2%	10,9%	3,8%	98,2%	47,1%	51,1%	44	72
2	0,8%	0,1%	4,2%	1,5%	88,7%	42,6%	44,2%	22	50
0,42	0,8%	0,1%	1,8%	0,6%	34,9%	16,8%	17,5%	8	26
0,18	0,8%	0,1%	1,5%	0,5%	18,2%	8,7%	9,4%	4	16
0,075	0,7%	0,1%	0,9%	0,3%	7,5%	3,6%	4,0%	2	10

As temperaturas do ligante para o processo de usinagem e compactação foram, respectivamente, 162°C e 150°C. Já os agregados, juntamente com o PVC, foram condicionados em estufa à 150°C por cerca de 1 hora e, posteriormente, aquecidos em fogão até atingir a temperatura de 172°C, mantendo-se 10°C acima da temperatura de usinagem do ligante a fim de garantir uma boa adesividade agregado-ligante. A compactação foi feita pelo equipamento automático Marshall, por meio da aplicação de 75 golpes em cada face do corpo de prova. Os procedimentos para o ensaio de estabilidade Marshall e resistência à tração foram baseados nas normas DNER 043/95 e DNIT 136/18, respectivamente.

O ensaio de fadiga foi realizado aplicando as cargas por compressão diametral à tensão controlada, na frequência de 1 Hz, por meio da prensa mostrada na Figura 6. Os corpos de prova foram testados à 25°C e submetidos à 4 níveis de tensão: 10%, 20%, 30% e 40% da resistência à tração, seguindo os procedimentos descritos pelo DNIT 183/2018.

Figura 6 – Ensaio de fadiga realizado por compressão diametral à tensão controlada



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No processo de produção dos corpos de prova, foi observado que o PVC empregado não fundiu com as elevadas temperaturas de usinagem da mistura asfáltica, mantendo-se em seu estado sólido e possibilitando sua incorporação de forma a substituir os agregados convencionais. Durante o pré-aquecimento do PVC juntamente com os agregados convencionais em estufa, à 150°C, por um período de 1h, observa-se a partir da Figura 7, uma pequena alteração na cor do polímero, do tom branco para mais amarelado, indicando que o polímero sofreu um baixo grau de degradação. Essa mudança ocorreu de forma pouca expressiva, pois os resíduos PVC utilizados na pesquisa são, provavelmente, constituídos de estabilizantes térmicos, os quais são empregados no processo industrial para a moldagem de tubos.

Figura 7 – Aspecto físico do PVC antes (à esquerda) e após (à direita) o pré-aquecimento em estufa



A Tabela 6 apresenta o resultado do teor ótimo de ligante e a média das propriedades finais de cada projeto de mistura. A dosagem do teor de ligante das misturas sem PVC e com 0,5% de PVC foi realizada de forma a manter o volume de vazios na faixa entre 3 e 5% e a relação betume vazios entre 75% e 82%, conforme especificado pelo DNIT 031/2006.

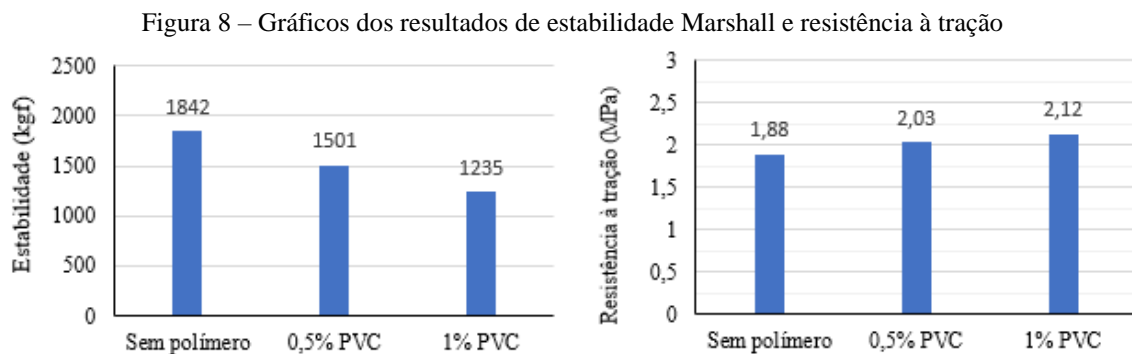
Tabela 6 – Características finais das misturas

Propriedades da mistura	Valor do projeto			Especificação DNIT (2006)
	Sem PVC	0,5% PVC	1,0 % PVC	
Teor de Ligante (%)	6,0	5,9	5,9	-
Densidade Máxima Medida (g/cm ³)	2,459	2,455	2,426	-
Densidade Aparente (g/cm ³)	2,368	2,378	2,333	-
Volume de Vazios (%)	4,03	4,06	3,83	3 a 5
Vazios com Betume (%)	13,5	13,6	13,1	-
Vazios do Agregado Mineral (%)	15,15	16,7	16,9	> 15
Relação Betume Vazios (%)	78,8	77,8	77,5	75 a 82

Pode-se observar que, quando comparado à mistura sem PVC, a adição de 0,5% de PVC, reduziu o teor ótimo de ligante. Além disso, embora não tenha sido realizada a dosagem Marshall para a mistura com 1% de PVC, a adoção do mesmo teor encontrado na mistura com 0,5% de PVC atendeu os requisitos estabelecidos pelo DNIT. No entanto, houve uma pequena redução do volume de vazios para 3,83%.

A redução do volume de vazios e, conseqüentemente, do teor ótimo de ligante das misturas com a adição de PVC, deve-se ao fato deste material ter menor porosidade e absorção quando comparado à brita. Além disso, a deformabilidade desse plástico, devido à altas temperaturas nas fases de usinagem e compactação, pode ter contribuído para o melhor entrosamento entre os grãos da mistura, reduzindo o volume de vazios.

A Figura 8 apresenta os valores médios de estabilidade Marshall e resistência à tração encontrados em cada mistura.



Pode-se verificar que a estabilidade reduziu consideravelmente com a adição dos polímeros. De acordo com Sinha *et al.* (2021), há um aumento significativo dessa resistência nas misturas com o emprego do PVC, o que não foi visualizado neste estudo. No entanto, apesar da redução da estabilidade, todas as misturas apresentaram-se muito superiores ao limite mínimo, de 500 kgf, estabelecido pelo DNIT 031/2006.

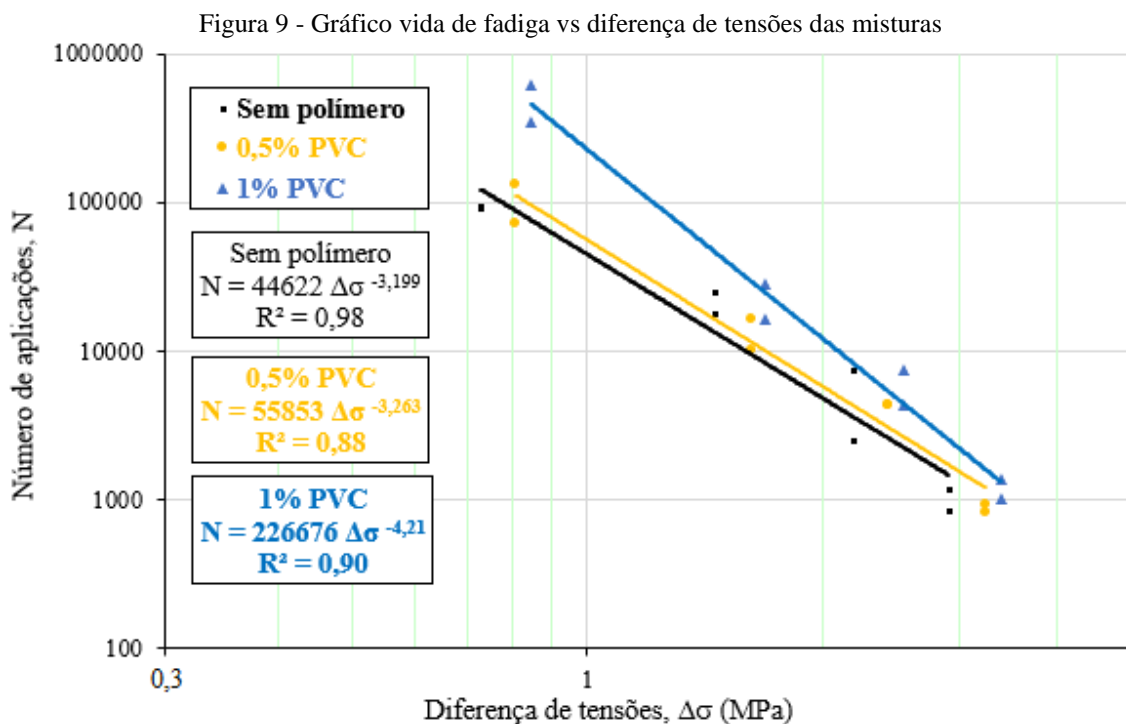
Quanto à resistência à tração, todas as misturas apresentaram-se acima do limite mínimo de 0,65 MPa, estabelecido na norma (DNIT, 2006). Pode-se perceber um pequeno incremento da resistência, à medida que o teor de PVC aumenta.

Como os valores de resistência à tração das três misturas apresentaram-se próximos, as tensões utilizadas no ensaio de fadiga foram praticamente similares, o que permitiu melhor comparação entre as curvas de fadiga. A Tabela 7 indica os resultados obtidos e o gráfico da Figura 9 apresenta os modelos matemáticos de vida de fadiga em função da diferença de tensões horizontais e verticais geradas no centro do corpo de prova.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de fadiga

Carga aplicada (kgf)	Pressão manométrica (kgf/cm ²)	Diferença de tensões (MPa)	Número de aplicações
Sem PVC			
734,6	5,96	2,92	1168
733,9	5,96	2,92	848
559,6	4,56	2,19	2542
556,3	4,54	2,19	7486
375,2	3,09	1,46	25041
372,3	3,07	1,46	18104
185,7	1,57	0,73	95360
186,0	1,57	0,73	91264

0,5% PVC			
821,9	6,66	3,24	940
843,0	6,83	3,24	810
623,6	5,08	2,43	4302
624,9	5,09	2,43	4357
413,2	3,39	1,62	10106
418,6	3,44	1,62	16237
210,0	1,77	0,81	72370
207,0	1,74	0,81	133052
1% PVC			
874,3	7,08	3,39	1370
875,7	7,09	3,39	1006
648,3	5,27	2,54	7386
653,5	5,32	2,54	4330
437,3	3,59	1,70	28289
439,4	3,60	1,70	16152
220,0	1,85	0,85	619750
219,0	1,84	0,85	345070



Pode-se observar que as misturas com PVC apresentaram uma melhora da resistência à fadiga, principalmente com a adição de 1% de PVC. Isso possivelmente ocorreu pelo fato deste material ser mais flexível que a brita, o que permite absorver melhor a energia de deformação, retardando o surgimento de trincas.

A partir dos parâmetros de regressão da curva de fadiga, pode-se estimar o número de solicitações de carga para a ruptura do corpo de prova de cada mistura, supondo a aplicação de baixas e altas tensões. A Tabela 8 apresenta estes resultados.

Tabela 8 - Estimativa da vida de fadiga das três misturas

Mistura	Diferença de tensões	Nº de ciclos	Aumento em relação à mistura sem PVC
Sem PVC	1	44622	-
0,5% PVC	1	55853	25%
1% PVC	1	226676	408%
Sem PVC	3	1328	-
0,5% PVC	3	1550	17%
1% PVC	3	2222	67%

Ao analisar os resultados, é possível verificar que o efeito da adição de 0,5% de PVC foi praticamente similar em ambas as magnitudes de aplicação das cargas, uma vez que, em baixas tensões, apresentou uma melhora na resistência à fadiga em 25% e, em altas tensões, o aumento foi de 17%. Já para a mistura com 1% de PVC, o incremento da resistência em baixas cargas foi de 408%, sendo mais expressivo quando comparado aos 67%, obtido pela aplicação de altas cargas.

5 CONCLUSÕES

A incorporação de 0,5% e 1% de resíduos PVC em misturas asfálticas à quente pelo processo a seco pode ser viável e promissora. A pesquisa mostrou que as misturas com esses resíduos atenderam às especificações de parâmetros volumétricos e comportamento mecânico, estabelecidos pelo DNIT, como o volume de vazios, relação betume/vazios, vazios do agregado mineral, estabilidade Marshall e resistência à tração por compressão diametral.

Apesar de poucas pesquisas misturando o PVC pelo processo a seco, verificou-se neste estudo que é possível a sua inserção a partir desse método, uma vez que o PVC utilizado não mudou para a fase líquida com a exposição de elevadas temperaturas, permitindo seu emprego como agregado alternativo na mistura.

Em relação ao efeito do PVC no comportamento mecânico, houve uma redução da estabilidade nas misturas. Mesmo assim, todas as misturas apresentaram-se muito superiores à especificação do DNIT. Já a resistência à tração, houve um pequeno acréscimo com o incremento do teor de PVC.

Nos ensaios de vida de fadiga, observou-se que a adição destes polímeros resultou em curvas de fadiga mais favoráveis. Quando foram aplicadas baixas cargas repetidas, a mistura com 0,5% de PVC apresentou uma melhora de 25% na resistência à fadiga e a mistura com 1% de PVC mostrou um ganho significativo de 408%. Quando aplicadas

elevadas cargas, observou-se o incremento de 17% da resistência com o uso de 0,5% de PVC e 67% com 1% de PVC.

A aplicação de 1% de PVC em cada quilômetro de uma rodovia, com 7 m de largura e 5 cm de espessura de revestimento, pode permitir a reciclagem de 8,28 toneladas de resíduos em lixões, o que corresponde à cerca de 19 km de tubulação de PVC de 25 mm de diâmetro, além da redução de 8,28 toneladas do consumo de brita.

Nesse sentido, acredita-se que o presente artigo possa contribuir para o desenvolvimento de futuros estudos, em busca de uma possível solução para minimizar os impactos ambientais causados pela disposição inadequada dos resíduos PVC, permitir a redução da exploração de jazidas pela substituição de parte dos agregados da mistura e melhorar o desempenho mecânico do revestimento asfáltico quanto às trincas e rachaduras, ocasionadas por carregamentos sucessivos.

Em termos de recomendação para estudos futuros, pode-se propor a análise de maiores quantidades de PVC, em menores granulometrias. Também pode-se indicar a realização dos ensaios de módulo de resiliência, deformação permanente e dano por umidade induzida, para melhor compreensão dos efeitos desses resíduos nas misturas. Sugere-se empregar a metodologia *Superpave*, para a dosagem e compactação dos corpos de prova, de modo a simular melhor as condições de campo. Por fim, recomenda-se avaliar o efeito do tempo de aquecimento do PVC, por meio de uma análise química e reológica.

REFERÊNCIAS

ABNT. *NBR 6296: Produtos betuminosos semissólidos - Determinação da massa específica e densidade relativa*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT. *NBR 6560: Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT. *NBR 11341: Derivados do petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. *NBR 15184: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2021.

ARABANI, M.; TALEGHANI, M. Y. *Rutting behavior of hot mix asphalt modified by polyvinyl chloride powder*. *Petroleum Science and Technology*, Taylor Francis, v. 35, n. 15, p. 1621–1626, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10916466.2017.1336772>>.

BATISTA, M. L. (2022). *Gestão de resíduos na construção civil: ênfase no desenvolvimento sustentável / Waste management in civil construction: emphasis on sustainable development*. *Brazilian Journal of Development*, 8(4), 23356–23373. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n4-042>

BRASIL. *Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022 - Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos*. Diário Oficial da União, Brasília: edição 72, seção 1, p. 2. 2022.

CANEVAROLO, S. V (2006). *Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros*. 2ª ed.. Câmara Brasileira do Livro, São Paulo, 2006.

CERESANA RESEARCH. *Global demand for PVC to rise by about 3.2%/year to 2021*. *Additives for Polymers*, v. 2014, Issue 11, 2014, p. 10-11, ISSN 0306-3747, [https://doi.org/10.1016/S0306-3747\(14\)70175-7](https://doi.org/10.1016/S0306-3747(14)70175-7). Konstanz, Germany, 2014.

CNT (2019). *Pesquisa CNT de rodovias 2019: relatório gerencial*. Brasília: CNT: SEST: SENAT. 2019. Disponível em: <<https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/gerencial.pdf>>

BARBOZA, D. dos S. M.; SOUZA, G. da S. M. (2022). *Reutilização e gestão de resíduos sólidos da construção civil / Reuse and management of solid waste from civil construction*. *Brazilian Journal of Development*, 8(5), 41404–41426. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n5-569>

DNER-ME. 35/98: *Agregados - Determinação da abrasão "Los Angeles"*. Rio de Janeiro, 1998.

DNER-ME. 081/98: *Agregados - Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo*. Rio de Janeiro, 1998.

- DNER-ME. 83/98: *Agregados - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, 1998.
- DNER-ME. 084/95: *Agregado miúdo - Determinação da densidade real*. Rio de Janeiro, 1995.
- DNER-ME. 399/99: *Agregados - Determinação da perda ao choque no aparelho Treton*. Rio de Janeiro, 1999.
- DNIT ES 031/2006: *Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - especificação de serviço*. Rio de Janeiro, 2006.
- DNIT ME 043/95: *Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall*. Rio de Janeiro, 1995.
- DNIT ME 136/10: *Resistência à Tração*. Rio de Janeiro, 2010.
- DNIT ME 155/10: *Material asfáltico - Determinação da penetração - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2010.
- DNIT ME 183/18: *Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2018.
- DNIT ME 425/20: *Pavimentação - Agregado - Determinação do índice de forma com paquímetro - Método de ensaio*. Brasília, 2010.
- EZZAT, E. N.; ABED, A. H. (2020) *Effects of polyvinyl chloride (pvc), styrene butadiene styrene (sbs) and aggregate gradation on permanent deformation of asphalt concrete pavement*. In: IOP PUBLISHING. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. [S.l.], 2020. v. 671, n. 1, p. 012093. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/671/1/012093/pdf> >
- FAKHRI, M.; SHAHRYARI, E; AHMADI, T. *Investigate the use of recycled polyvinyl chloride (PVC) particles in improving the mechanical properties of stone mastic asphalt (SMA)*. Construction and Building Materials, Volume 326, 2022, 126780, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126780>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822004688>
- GRISA, A. M. C.; SIMIONI, T.; CARDOSO, V.; M., Z.; BRANDALISE, R. N.; ZOPPAS, B. C. D. A. *Biological degradation of pvc in landfill and microbiological evaluation*. 2011. *Polímeros*, 21, 210-16, 2011.
- MOVILLA-QUESADA, D.; RAPOSEIRAS, A.; SILVA-KLEIN, L.; LASTRA-GONZÁLEZ, P.; CASTRO-FRESNO, D. (2019) *Use of plastic scrap in asphalt mixtures added by dry method as a partial substitute for bitumen*. *Waste Management*, v. 87, p. 751–760. 2019. ISSN 0956-053X.
- RODOLFO JR., A.; NUNES, L. R.; ORMANJI, W.; HAGE JR, E.; AGNELLI, J. A. M.; PESSAN, L. A. P. *Tecnologia do pvc*. 2006. 2ª edição revista e ampliada. São Paulo: pro editores/ Braskem, 2006. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/Portal/Principal/Arquivos/Download/Upload/Tecnologia%20do%20PVC%20a%20edição_22.pdf>

SALMAN, N.; JALEEL, Z. *Effects of waste pvc addition on the properties of (40-50) grade asphalt*. In: EDP SCIENCES. MATEC Web of Conferences. [S.l.], 2018. v. 162, p. 01046.

SILVA, T. R.; AZEVEDO, A. R. G.; CECCHIN, D.; MARVILA, M. T.; AMRAN, M.; FEDIUK, R.; VATIN, N.; KARELINA, M.; KLYUEV, S.; SZELAG, M (2021). *Application of plastic wastes in construction materials: A review using the concept of life-cycle assessment in the context of recent research for future perspectives*. Materials, v. 14, n. 13. 2021. ISSN 1996-1944.

SINHA, R.; KUMAR, S.; GARG, S.; PRASAD, N. M.. *Use of electronic waste plastic in asphalt mix with marble dust as filler*. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. v. 28, n. 1, p 36-45. 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85116835849&partnerID=40&md5=a37473b5fec8483365d4958ba7e252a6>

ZIARI, H.; NASIRI, E.; AMINI, A.; FERDOSIAN, O. *The effect of eaf dust and waste pvc on moisture sensitivity, rutting resistance, and fatigue performance of asphalt binders and mixtures*. Construction and Building Materials, v. 203, p. 188–200, 2019. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819301187>.