

Avaliação da Utilização de Emulsão Asfáltica com Solo Argiloso para Aplicação em Camadas do Pavimento

Eduarda Lesseux Spinelli

Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Frederico Westphalen, Brasil, eduardaspinelli0517@gmail.com

Rodrigo André Klamt

Doutorando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, rodrigoklamt@outlook.com

Elisangela Aparecida Mazzutti

Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, elisamazzutti@hotmail.com

Luciéle da Silva Knierim

Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, luh_knierim@hotmail.com

RESUMO: Ao longo dos anos o Brasil enfrenta desafios com estradas em mau estado, exacerbados pelo aumento do tráfego. Para garantir a segurança e conforto, é essencial que as rodovias e suas camadas de suporte sejam de boa qualidade. Muitas vezes, os solos locais não atendem às especificações necessárias, tornando o transporte de materiais de alta qualidade inviável. Assim, o melhoramento do solo local surge como uma alternativa econômica. Dessa forma, esse trabalho teve como objetivo analisar o emprego da emulsão asfáltica RR-1C, nas proporções 4, 6 e 8%, como reforço de um solo argiloso de Frederico Westphalen/RS, visando a aplicação em camadas de pavimento. Foram realizados ensaios de compactação, Resistência à Compressão Simples (RCS) e Índice de Suporte Califórnia (ISC) para avaliar a potencialidade de utilização do solo-emulsão. No ensaio de RCS obteve-se uma tendência de redução, chegando a ser 62,45% inferior ao solo puro. O ISC apresentou um aumento de até 151,43% na mistura com a adição de 4% de emulsão. No entanto, nas misturas contendo 6% e 8% de emulsão, houve uma tendência significativa de redução em comparação ao solo puro. Além disso, observou-se um aumento na expansão em todas as misturas. Concluiu-se que todas as combinações de solo com emulsão podem ser aplicadas como subleito e reforço do subleito, mas apenas a mistura de 96% solo + 4% emulsão tem potencial para ser utilizada como sub-base.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilização de solos, Emulsão, RR-1C, sustentabilidade.

ABSTRACT: Over the years, Brazil has faced challenges with poorly maintained roads, exacerbated by increased traffic. To ensure safety and comfort, it is essential that highways and their supporting layers are of good quality. Often, local soils do not meet the required specifications, making the transport of high-quality materials unfeasible. Thus, improving the local soil emerges as a cost-effective alternative. Therefore, this study aimed to analyze the use of RR-1C asphalt emulsion, in proportions of 4%, 6%, and 8%, as reinforcement for a clayey soil from Frederico Westphalen/RS, aiming for application in pavement layers. Compaction tests, Unconfined Compressive Strength (UCS), and California Bearing Ratio (CBR) tests were performed to evaluate the potential of using the soil-emulsion mixture. In the UCS test, a decreasing trend was observed, with values up to 62.45% lower than pure soil. The CBR showed an increase of up to 151.43% in the mixture with the addition of 4% emulsion. However, in mixtures containing 6% and 8% emulsion, there was a significant downward trend compared to pure soil. Additionally, an increase in expansion was observed in all mixtures. It was concluded that all combinations of soil and emulsion could be applied as subgrade and subgrade reinforcement, but only the 96% soil + 4% emulsion mixture has potential for use as a sub-base.

KEYWORDS: Soil stabilization, Emulsion, RR-1C, sustainability.

1 INTRODUÇÃO

As rodovias desempenham papel essencial no desenvolvimento socioeconômico, atuando como elemento catalisador por meio do transporte. No Brasil, o modal rodoviário é o mais utilizado, respondendo por cerca de 65% do transporte de cargas, segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2023). No entanto, a carência de investimentos em infraestrutura tem elevado os custos logísticos, sobretudo devido às precárias condições das estradas, que aumentam os gastos com manutenção de veículos (Mühlbeier, 2018).

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2021), a malha rodoviária brasileira possui aproximadamente 1,7 milhão de quilômetros, dos quais apenas 12,4% são pavimentados, o que corresponde a cerca de 213,5 mil quilômetros. A degradação do pavimento pode ocorrer em diversas etapas, desde o projeto até a operação da via, sendo influenciada por falhas de dimensionamento, execução inadequada, ausência de manutenção preventiva e fiscalização deficiente (Reis et al., 2010).

Entre os principais fatores de deterioração destacam-se a sobrecarga, o elevado volume de tráfego e o uso de materiais com baixa qualidade ou fora das especificações técnicas. Tais problemas são apontados pela CNT (2023) como desafios estruturais enfrentados pela infraestrutura rodoviária nacional.

Diante desse cenário, o projeto de pavimentação requer atenção criteriosa para garantir desempenho estrutural e funcional. A escolha adequada dos materiais depende do conhecimento detalhado das características geotécnicas do solo local. Quando o solo não atende às exigências técnicas, torna-se necessário adotar soluções alternativas, como o uso de materiais estabilizados ou importados, de forma a assegurar a durabilidade e eficiência da via (Reis et al., 2010).

A utilização de materiais adequados na construção e manutenção de pavimentos rodoviários é essencial para garantir sua durabilidade, segurança e eficiência (Reis et al., 2010). Nesse contexto, destaca-se a mistura solo-emulsão, composta por solo, água e emulsão asfáltica, cuja aplicação tem se tornado cada vez mais relevante na infraestrutura viária.

A mistura solo-emulsão tem despertado interesse crescente devido às suas propriedades técnicas vantajosas, como o aumento da capacidade de suporte do solo, redução da permeabilidade, resistência ao desgaste e às intempéries, além da possibilidade de reutilização de materiais locais. Outro aspecto positivo é o fato de que sua aplicação ocorre em temperatura ambiente, favorecendo a preservação ambiental (Rebelo, 2009).

Essa técnica é particularmente útil em regiões com solos de baixa qualidade, como os argilosos, que apresentam limitações para aplicação direta em camadas de pavimento. Nessas áreas, como ocorre no norte do Rio Grande do Sul, muitas vezes é necessário modificar o solo local ou buscar materiais mais adequados em outras regiões, o que pode elevar os custos da obra (Mendonça, 2019).

Embora a técnica de solo-emulsão seja empregada no Brasil desde as décadas de 1960 e 1970, ainda há escassez de estudos científicos, especialmente de caráter regional, que abordem de forma detalhada a caracterização desses materiais. Além disso, não há um método padronizado de dosagem nem especificações técnicas consolidadas para seu uso.

Diante dessa lacuna, a presente pesquisa visou investigar o comportamento da mistura solo-emulsão aplicada a um solo argiloso típico de Frederico Westphalen (RS). O estudo buscou avaliar seu desempenho quanto à compactação, resistência mecânica e expansão volumétrica, além de discutir sua viabilidade em diferentes camadas de pavimento, contribuindo para o avanço técnico e normativo na área.

2 METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido por meio de pesquisa bibliográfica e ensaios laboratoriais, visando caracterizar o solo e analisar o desempenho do solo-emulsão em diferentes camadas de pavimento, com embasamento teórico e prático. As atividades laboratoriais foram conduzidas no Laboratório de Materiais e Construção Civil (LMCC) e no Laboratório de Solos da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões Câmpus de Frederico Westphalen.

2.1 Materiais

O solo utilizado na pesquisa foi obtido de uma jazida localizada na cidade de Frederico Westphalen (FW), no estado do Rio Grande do Sul (RS). Essa jazida está situada na Volta Grande, às margens da BR-386, no km 38, onde o solo proveniente dela é comumente empregado nas obras no município citado.

A emulsão asfáltica utilizada como estabilizante foi fornecida pela empresa Paviter Britagem e Pavimentação, empresa a qual possui sede no município de Frederico Westphalen/RS. O estabilizante foi do tipo emulsão catiônica de ruptura rápida, conhecida como RR-1C, escolhida por representar a opção de menor custo no mercado e por sua excelente trabalhabilidade em comparação com outros tipos de emulsões. Esse composto, quando combinado com o solo, tem o potencial de desempenhar funções tanto de estabilização química quanto granulométrica.

2.2 Métodos

2.2.1 Coleta e Preparo do Solo

O processo de coleta do solo seguiu as diretrizes estabelecidas pela NBR 9604 (ABNT, 2016). Antes da escavação, foi realizado uma limpeza superficial do terreno para remover qualquer vestígio de vegetação, conforme exigido pela norma. O solo foi acondicionado em bolsas limpas para transporte e armazenamento no laboratório. No laboratório, as amostras foram destorroadas manualmente para preparação dos ensaios.

2.2.2 Caracterização da emulsão

Foi utilizado o mesmo solo estudado por Mazzutti, Klamt e Faro (2023), adotando-se, portanto, os mesmos dados obtidos pelos autores para a análise granulométrica, limites de Atterberg, massa específica real dos grãos e classificações do solo.

Quanto a emulsão asfáltica RR-1C, sua caracterização foi cedida pela empresa Paviter (apresentada na Tabela 1) que forneceu o produto para o estudo onde tal apresenta uma fácil aplicação, rompimento rápido, baixa viscosidade, é isento de solventes e permite diluição para baixas taxas de aplicação. A emulsão asfáltica tipo RR-1C é constituída por uma fase asfáltica dispersa em uma fase aquosa composta por tensoativos químicos e outros aditivos, resultando em um ligante asfáltico que pode ser utilizado a frio para diversos tipos de aplicação, facilitando assim o seu uso. Além da facilidade de aplicação o RR-1C possui uma grande performance na aderência da capa asfáltica com o substrato.

Ressalta-se que, para a ideal condução de estudos com misturas solo-emulsão, a dosagem deve ser realizada em função do teor de ligante residual, considerando a água presente na emulsão, e o protocolo de cura deve seguir procedimentos específicos que favoreçam a ruptura e a coalescência do ligante. Além disso, recomenda-se a utilização de emulsões de ruptura lenta ou média, mais adequadas para garantir tempo suficiente de mistura e compactação. No entanto, o presente trabalho foi estruturado como uma análise preliminar, empregando metodologias simplificadas com o objetivo de levantar pontos de atenção e identificar ajustes necessários para investigações posteriores mais robustas.

Tabela 1. Caracterização emulsão RR-1C (Adaptado de DNIT 165, 2013).

Características	Unidade	Limite	Método de ensaio
Viscosidade a 25°C, máx.	s	90	ABNT NBR 14491 (2007)
Sedimentação, máx., 5 dias	% massa	5	ABNT NBR 6570 (2016)
Peneiração 0,84 mm (nº 20), máx.	% massa	0,1	ABNT NBR 14393 (2012)
Resistência à água (cobertura), mín.	%	80	ABNT NBR 14249 (2007)
Carga da Partícula	-	positiva	ABNT NBR 6567 (2015)
Desemulsibilidade, mín.	%	50	ABNT NBR 6569 (2008)
Resíduo seco, mín.	% massa	62	ABNT NBR 14376 (2019)
Ensaios para o resíduo da emulsão obtido pela NBR 14896 (2019)			
Penetração a 25°C, 100 g, 5s	mm	4,0 - 15,0	ABNT NBR 6576 (2007)
Teor de betume, mín	%	97	ABNT NBR 14855 (2015)
Ductilidade a 25°C, mín	cm	40	ABNT NBR 6293 (2015)

2.2.3 Misturas

A porcentagem de emulsão asfáltica foi escolhida com base em outras bibliografias, dando destaque aos estudos de Rebelo (2009) e Mendonça (2019). Dessa forma, foi determinado as seguintes misturas: Mistura 1: 100% solo; Mistura 2: 96% solo + 4% emulsão; Mistura 3: 94% solo + 6% emulsão; Mistura 4: 92% solo + 8% emulsão.

2.2.4 Ensaio de Compactação

Para determinar os valores dos pesos específicos aparentes secos máximos e das umidades ótimas, tanto do solo natural quanto das misturas de solo-emulsão, foram conduzidos ensaios de compactação utilizando o cilindro Proctor. Neste estudo foi empregada a energia intermediária de compactação, uma vez que essa energia é amplamente utilizada na compactação das camadas de pavimentação. O procedimento para a realização do ensaio seguiu a metodologia estabelecida na NBR 7182 (ABNT, 2020).

2.2.5 Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS)

Os corpos de prova foram preparados em moldes cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, utilizando a umidade ótima e o peso específico máximo para cada dosagem (mistura), determinados através do ensaio de compactação Proctor, com aplicação de energia intermediária. A moldagem foi realizada de maneira dinâmica, utilizando um compactador manual. Foram produzidos três corpos de prova para cada dosagem (mistura) a fim de calcular a média da resistência à compressão simples.

Após a moldagem, foram deixados os corpos de prova em repouso por 7 dias para sua cura, conforme indicado na NBR 12025 (ABNT, 2012). Posterior a esse período, os corpos de prova foram rompidos para a realização do ensaio de resistência à compressão simples, seguindo as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 12025 (ABNT, 2012).

2.2.6 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC)

A determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou CBR (California Bearing Ratio) foi essencial para avaliar a capacidade de suporte de um determinado material. Este ensaio seguiu as diretrizes da norma NBR 9895 (ABNT, 2016).

Inicialmente, o solo foi compactado em um cilindro, com um número de 26 golpes por camada, conforme estabelecido na norma NBR 7182 (ABNT, 2020). Após a compactação, o cilindro foi pesado e submerso em água por 5 dias, onde a expansão do solo quando saturado foi verificada com o auxílio de um extensômetro. Após o período de imersão, o corpo de prova foi removido e deixado para escoar a água por 15 minutos antes de ser submetido à prensa de penetração.

Para este ensaio, foram produzidos dois corpos de prova para cada mistura, visando obter a média do valor de CBR e de expansão. Os corpos de prova foram ensaiados utilizando uma prensa manual.

2.2.7 Análise dos resultados

Após a conclusão dos ensaios, os resultados foram confrontados com os parâmetros obtidos para o solo in natura e foram comparados com as normas vigentes, a fim de avaliar a viabilidade da aplicação deste material em diferentes camadas do pavimento.

Já os resultados do ensaio de resistência à compressão simples (RCS) foram analisados em termos de desempenho, uma vez que não existem normas específicas para misturas solo-emulsão.

3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Ensaio de Compactação

Os resultados encontrados para as Misturas 1, 2, 3 e 4 em relação ao peso específico aparente seco máximo foram, respectivamente, 1,53 g/cm³, 1,45 g/cm³, 1,42 g/cm³, 2,26 g/cm³, já para a umidade ótima



foram, respectivamente, 28,20%, 21,40%, 21,40%, 22,10%. É possível observar que ao substituir 4% e 6% de solo por emulsão houve uma diminuição de 5,23% e 7,19%, respectivamente, no PEASM (Peso Específico Aparente Seco Máximo), em relação à mistura de 100% Solo. Já a substituição de 8% de emulsão obteve um aumento de 47,74%, no PEASM. A umidade ótima das três misturas estudadas apresentou redução em relação a mistura de 100% solo, sendo essa redução cerca de 24,12%, 24,12% e 21,64% para as misturas de 4%, 6% e 8% de emulsão, respectivamente. Ou seja, em duas amostras estudadas o peso específico aparente seco máximo (PEASM) teve tendência de redução e uma amostra teve tendência de aumento, já a umidade ótima teve tendência de redução nas três amostras estudadas, se comparado ao material de referência (100% solo).

O fato de reduzir o PEASM (ao comparar ao solo in natura) se dá principalmente porque a emulsão afeta a capacidade de compactação do solo ao modificar a interação entre as partículas, aumentando o volume de vazios, alterando a granulometria e interferindo na distribuição de umidade. O comportamento do solo também depende da quantidade de emulsão adicionada. Já o aumento do PEAMS (quando analisadas apenas as misturas de solo-emulsão) se dá ao fato de fatores como a interação solo-emulsão, onde a emulsão preenche melhor os espaços entre as partículas, promovendo maior compactação, ações aglutinantes onde há maior coesão entre as partículas e uma distribuição de umidade (Santos, 2009).

Quanto a redução da umidade ótima nas misturas com emulsão pode ser explicada por diversos fatores. Primeiramente, a substituição do solo por emulsão altera as propriedades físicas do material, reduzindo a quantidade de água necessária para atingir a umidade ótima. Além disso, a emulsão possui menor capacidade de retenção de água em comparação ao solo puro. As interações físico-químicas entre as partículas do solo também são afetadas, tornando a absorção de água menos eficaz. Por fim, a emulsão melhora a trabalhabilidade e a coesão da mistura, permitindo uma compactação eficiente com menor umidade. Esses fatores contribuem para a redução da umidade ótima em relação ao solo de referência (Santos, 2009).

3.2 Resistência à Compressão Simples (RCS)

O resultado médio de 3 corpos de prova para as misturas 1, 2, 3 e 4, referentes ao ensaio de RCS foram, respectivamente, 0,253 MPa, 0,211 MPa, 0,183 MPa e 0,095 MPa. Nota-se que a incorporação da emulsão ao solo apresentou uma redução na resistência à compressão simples para todas as misturas. Estes resultados vão ao encontro às análises comentadas por Soliz (2007) onde a autora utilizou essas mesmas porcentagens de 4, 6 e 8% de emulsão dos tipos RM-1C e RL-1C com solo argiloso e também observou uma redução na resistência a compressão simples com relação ao solo 100%.

Ainda quanto aos ensaios de RCS ao comparar com a amostra de 100% solo (0,253 MPa), a mistura com 4% de emulsão obteve uma menor perda de resistência, sendo esta uma redução de 16,6% (0,211 MPa). Já os teores de 6% e 8% de emulsão tiveram maiores perdas de resistência sendo 27,67% e 62,45% (0,183 MPa e 0,095 MPa), respectivamente. Observa-se também que houve uma linearidade nos resultados conforme aumentava-se a porcentagem de emulsão inserida.

A diminuição do RCS (Resistência à Compressão Simples) à medida que o teor de emulsão asfáltica aumenta pode ser explicada por vários fatores relacionados às propriedades do solo e à interação entre o ligante asfáltico e os agregados do solo.

Uma possível explicação para essa redução é a diminuição da rigidez do material. À medida que aumenta o teor de emulsão asfáltica na mistura, o material tende a se tornar mais flexível e menos rígido. Mesmo em pequenas quantidades, o asfalto modifica as propriedades do solo, tornando-o mais suscetível à deformação sob compressão (Soliz, 2007).

Outro fator é a diminuição da coesão do solo. Em teores mais elevados, a emulsão pode interferir nas interações entre as partículas de solo, reduzindo sua coesão natural. O excesso de emulsão cria uma camada de ligante em torno das partículas, prejudicando a interação entre os grãos e, assim, diminuindo a resistência mecânica da mistura (Soliz, 2007).

Além disso, o fator de saturação é relevante. Como a emulsão contém água, o aumento de sua quantidade pode elevar a umidade residual no solo. Se a emulsão não rompe de maneira eficiente, esse excesso de umidade pode enfraquecer a estrutura do solo, particularmente em teores mais altos de emulsão (Soliz, 2007).

Por fim, conforme relata Soliz (2007), devido ao fato do solo ser argiloso, a mistura já possui uma certa coesão, fazendo com que a emulsão atue mais como um lubrificante. Isso impede o aumento da resistência à compressão simples. Em teores elevados, a emulsão pode reduzir o atrito entre as partículas do solo, o que facilita a deformação sob compressão e, conseqüentemente, diminui a resistência do material.

Em resumo, o comportamento de redução linear da resistência com o aumento do teor de emulsão indica que há um ponto ideal para equilibrar flexibilidade e resistência. Ultrapassado esse ponto, o excesso de emulsão compromete as propriedades mecânicas da mistura, resultando em perdas mais significativas de resistência.

3.3 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

A Tabela 2 apresenta os resultados de ISC e expansão obtidos através da média entre os dois ensaios realizados para cada mistura; os parâmetros para o solo in natura foram obtidos através de seus respectivos ensaios.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de ISC e expansão (Autores, 2025).

Mistura	ISC (%)	Expansão (%)
100% Solo	11,53	0,05
96% Solo + 4% Emulsão	28,99	0,52
94% Solo + 6% Emulsão	9,28	0,98
92% Solo + 8% Emulsão	5,80	0,70

Conforme observado na Tabela 2 apenas uma mistura apresentou aumento no ISC, enquanto todas as misturas mostraram aumento na expansão em comparação ao solo 100%. Especificamente em relação ao ISC, que é o principal parâmetro para avaliar a capacidade de suporte das camadas de pavimento, houve um aumento de 151,43% na mistura com 4% de emulsão. No entanto, as misturas contendo 6% e 8% de emulsão apresentaram uma redução de 19,52% e 49,70%, respectivamente, em comparação ao solo puro.

Diante a esses dados, esse comportamento pode ser explicado pela interação entre o solo e a emulsão asfáltica, o que leva a estudos comentados por Santos (2009). No caso da mistura com 4% de emulsão, o aumento no ISC indica que essa proporção proporcionou uma melhoria na coesão entre as partículas do solo, resultando em uma maior resistência e capacidade de suporte. Nesse teor de emulsão, a mistura consegue estabilizar o solo, preencher os vazios e criar uma estrutura mais rígida, favorecendo o desempenho mecânico.

Por outro lado, nas misturas com 6% e 8% de emulsão, houve uma redução no ISC. Essa diminuição pode ser explicada pelo fato de que o excesso de emulsão asfáltica começa a atuar como um lubrificante entre as partículas do solo, em vez de um agente estabilizador. Quando a emulsão é aplicada em quantidades excessivas, ela pode preencher demasiadamente os espaços intersticiais, resultando em uma mistura mais saturada e menos densa, o que diminui a fricção e a resistência entre as partículas do solo. Isso acaba comprometendo a capacidade de suporte das camadas do pavimento, levando à redução do ISC (Santos, 2009).

Além disso, Santos (2009) comenta que o aumento da expansão nas misturas também contribui para esse comportamento. Misturas com maior teor de emulsão tendem a ter mais fluência e deformações, o que pode afetar a compactação e a estabilidade da estrutura, especialmente em condições de carga. Assim, teores elevados de emulsão podem ser prejudiciais à capacidade de suporte do solo, enquanto uma proporção equilibrada, como a de 4%, pode otimizar o desempenho.

3.4 Análise da viabilidade técnica do uso das misturas em camadas de pavimentos rodoviários

Foi realizada uma análise da aplicação dos materiais em estudo para o uso em camadas de subleito, reforço de subleito, sub-base e base de pavimentos rodoviários. Para isso, foram compilados os requisitos obrigatórios das normas pertinentes, seguidos da elaboração de um checklist para verificar a viabilidade de utilização de cada uma das misturas analisadas, conforme apresentado na Tabela 3.

Em relação ao Índice de Suporte Califórnia (ISC) e à expansão, conforme indicado na Tabela 3, as três amostras analisadas nesta pesquisa cumpriram os requisitos mínimos para camadas de subleito e reforço do subleito. No entanto, apenas uma amostra atendeu aos critérios para a sub-base (a mistura com 4% de emulsão), enquanto as três amostras satisfizeram os requisitos de expansão. Vale destacar que nenhuma das misturas estudadas atendeu aos critérios estabelecidos para aplicação em camada de base, impossibilitando, portanto, o uso dessas misturas para essa finalidade.

Tabela 3. Verificação da utilização das misturas em camadas de pavimento.

Camadas	Parâmetro	Condição para aplicação	Material/Verificação da aplicação		
			96% solo + 4% emulsão	94% solo + 6% emulsão	92% solo + 8% emulsão
Subleito	DNIT (2006)	ISC \geq 2%	SIM	SIM	SIM
		Expansão \leq 2%	SIM	SIM	SIM
Reforço do Subleito	DNIT (2006)	ISC $>$ 2%	SIM	SIM	SIM
		Expansão \leq 1%	SIM	SIM	SIM
Sub-Base	DNIT (2006)	ISC \geq 20%	SIM	NÃO	NÃO
		Expansão \leq 1%	SIM	SIM	SIM
Base	DNIT (2006)	ISC \geq 80%	NÃO	NÃO	NÃO
		Expansão \leq 0,5%	NÃO	NÃO	NÃO

5 CONCLUSÕES

O principal objetivo desta pesquisa foi avaliar a viabilidade do uso de emulsão como reforço para solo argiloso, visando sua aplicação nas camadas do pavimento. Os ensaios realizados permitiram concluir que o peso específico aparente seco máximo diminuiu nas misturas com 4% e 6% de emulsão devido a emulsão asfáltica introduzir uma fase líquida na mistura. Essa fase líquida ocupa os espaços entre as partículas do solo, reduzindo a densidade da mistura, já que a emulsão é menos densa que os sólidos do solo. Em contrapartida, na mistura com 8% de emulsão, o aumento do teor de emulsão pode favorecer uma melhor compactação e adesão entre as partículas, resultando em uma estrutura mais densa e, conseqüentemente, em um aumento do peso específico aparente seco máximo. Já a redução da umidade ótima em todas as misturas, quando comparada ao solo 100%, ocorre porque a emulsão asfáltica altera a interação da umidade com as partículas do solo. Com mais emulsão, a mistura se torna mais saturada, necessitando de menos água para atingir a umidade ótima. Além disso, a emulsão melhora a adesão entre as partículas, permitindo uma compactação eficiente com menor teor de água.

Quanto à resistência à compressão simples, observou-se uma redução conforme o teor de emulsão nas misturas aumentou. Essa diminuição pode ser atribuída à diluição da matriz causada pelo aumento da emulsão asfáltica, o que compromete a coesão e a resistência do material. Além disso, o excesso de emulsão pode aumentar o espaçamento entre as partículas sólidas, prejudicando a compactação e aumentando a plasticidade, resultando em um material mais flexível e menos rígido. Esses fatores, juntamente com possíveis impactos negativos no processo de cura e na evaporação, contribuem para a redução da resistência à compressão. A mistura que apresentou a menor perda de resistência foi a de 96% de solo e 4% de emulsão, com uma redução de 16,6% em relação à resistência do solo puro. Assim, conclui-se que teores superiores a 4% de emulsão podem não ser viáveis tecnicamente para solos argilosos.

No ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC), foi identificado um aumento significativo na resistência à penetração apenas na mistura com 4% de emulsão, que apresentou um desempenho notável, com um incremento de 151,43% no ISC. Todas as misturas, no entanto, mostraram um aumento considerável na expansão, o que pode comprometer a estabilidade em condições de carga.

Apesar de nenhuma das misturas cumprir os requisitos para aplicação em camadas de base, todas atenderam aos critérios necessários para serem utilizadas nas camadas de subleito e reforço de subleito. Entre as misturas testadas, apenas a composição com 4% de emulsão foi capaz de satisfazer os requisitos para ser utilizada em camadas de sub-base.

Por fim, conclui-se que os resultados obtidos neste estudo foram fortemente influenciados por três limitações metodológicas principais: (i) a dosagem das misturas em função da emulsão bruta (4%, 6% e 8%), sem a devida conversão para ligante residual, o que aumentou artificialmente o teor de umidade, prejudicou a densificação e reduziu a resistência; (ii) o protocolo de cura empregado, baseado na norma de solo-cimento, que reteve umidade em excesso e atrasou a ruptura da emulsão, comprometendo a coalescência do ligante; e (iii) a escolha da emulsão RR-1C, de ruptura rápida, que limitou o tempo de mistura e compactação, resultando em menor homogeneização. Esses fatores explicam a redução progressiva da resistência à compressão simples com o aumento do teor de emulsão, bem como os ganhos pontuais de ISC apenas no teor de 4%, distorcendo a real representatividade da técnica. Ressalta-se, entretanto, que tais escolhas tiveram caráter exploratório e

visaram avaliar preliminarmente a aplicabilidade da estabilização com emulsão. Para etapas futuras, pretende-se reformular a metodologia a partir da dosagem em termos de ligante residual, utilizar protocolos de cura específicos para misturas solo-emulsão e adotar emulsões de ruptura lenta ou média, além de ampliar os parâmetros de avaliação para incluir resistência à tração indireta, módulo resiliente e durabilidade. Dessa forma, os achados não devem ser interpretados como evidência da ineficácia da técnica, mas sim como indicativo da necessidade de ajustes experimentais para que o verdadeiro potencial da estabilização com emulsão seja adequadamente demonstrado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 7182. *Solo – Ensaio de compactação – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 9604. *Abertura de Poço e Trincheira de Inspeção em Solo, com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 9895. *Solo – Índice de Suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). NBR 12025. *Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Confederação Nacional dos Transportes (2023). *Pesquisa de Rodovias 2023*. SEST SENAT, Brasília, DF, BR.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2021). Sistema Nacional de Viação. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/sistema-nacional-de-viacao/sistema-nacional-de-viacao>. Acesso em: 14 abr. 2025.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2013). NORMA DNIT 165. *Emulsões asfálticas para pavimentação – Especificação de material*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006). *Manual de Pavimentação*. 3ª edição, publicação IPR 719, Rio de Janeiro, RJ, BR, 278 p.
- Mazzutti, E.A., Klamt, R.A., Faro, V.P. (2023). Study of the hydro-mechanical behavior of a stabilized soil with water treatment plant sludge for application in sanitary landfills. *Soils and Rocks*, 46 (1), e2023011222.
- Mendonça, B.M.V. (2019). *Estabilização Física de Solos Tropicais para Base de Pavimento de Baixo Custo na Região Metropolitana de Manaus-AM*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, 120 p.
- Mühlbeier, C.H. (2018). *Avaliação da utilização de solo betume em camadas de pavimentos de baixo tráfego na região Noroeste do Rio Grande do Sul*. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.
- Reis, R.M.M., Teixeira, L.H., Contantito, R., Omena, W. *Manual básico de emulsões asfálticas*. 2ª ed. ABEDA, Rio de Janeiro, RJ, BR, 133 p.
- Rebelo, E.P. (2009) *Estudo de mistura solo-emulsão para a região de Urucu (Coari-AM)*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Amazonas, 116 p.
- Santos, W.J. (2009). *Avaliação do uso de emulsão asfáltica na estabilização química de três Solos de Sergipe*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, 162 p.
- Soliz, V.V.P. (2007). *Estudo de Três Solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 182 p.