

ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLO RESIDUAL DE BASALTO COM CIMENTO PARA FINS DE UTILIZAÇÃO NA PAVIMENTAÇÃO

Tamires Suani Calgaro

Engenheira Civil, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI,
Campus Frederico Wetsphalen.
tamirescalgaro@hotmail.com

Ana Paula Kamphorst

Engenheira Civil, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI,
Campus Frederico Wetsphalen.
kamphorst.ana@hotmail.com

Mateus Arlindo da Cruz

Engenheiro Civil, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI,
Campus Frederico Wetsphalen.
mateusArlindo@hotmail.com

Thaís Aquino dos Santos

Doutoranda em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
thaiis_as@hotmail.com

Fábio Dischkaln do Amaral

Professor, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI, Campus
Frederico Wetsphalen.
amaral@uri.edu.br

Resumo. A presente pesquisa apresenta a análise de um solo residual basáltico, proveniente do município de Frederico Westphalen/RS, melhorado com adição de 3% e 4% e estabilizado com a adição de 7% e 10% de cimento Portland CPV-ARI, para emprego na pavimentação. Para verificar as propriedades do solo natural e misturas de solo+cimento, realizaram-se os seguintes ensaios: caracterização físico-química, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão, compactação e Resistência à Compressão Simples (RCS). Identificou-se que o solo tem predominância argilosa. Referente à RCS, constatou-se melhorias em comparação ao solo natural e diferença nos valores encontrados de RCS para os corpos de prova rompidos na prensa manual e mecânica. Apesar de ocorrerem melhorias na capacidade de suporte do solo, este não atingiu os valores mínimos da norma para aplicação na camada de base e sub-base de pavimentos flexíveis.

Palavras-chave: Pavimentação. Estabilização de Solos. Cimento Portland.

1. INTRODUÇÃO

Os custos para a execução de um pavimento são diretamente relacionados aos materiais utilizados na sua construção. Para Bernucci et al. (2008), os valores gastos na execução de pavimentos são elevados, sendo possível realizar uma significativa redução através da utilização de novas técnicas e materiais. Assim é necessária uma evolução na pavimentação tradicional, utilizando os recursos disponíveis na região, sendo que as técnicas utilizadas devem ser previamente testadas em laboratórios, o que permite verificar a sua viabilidade e empregabilidade.

Núñez (1991) pontua ainda que, nem sempre os materiais no local da obra possuem as propriedades necessárias para seu uso, sendo necessário realizar o transporte dos materiais

de locais distantes, o que influencia diretamente nos custos totais do pavimento. Para Specht (2013), devido à dificuldade de se encontrar materiais com as propriedades necessárias *in situ*, se evidencia a necessidade de encontrar novas técnicas e materiais que possam ser utilizados para reduzir os custos do pavimento. A utilização de técnicas como a estabilização realiza alterações das características e propriedades do solo natural, de modo a melhorar o comportamento do mesmo.

Neste contexto, o presente trabalho visa estudar a estabilização química de um solo residual de basalto, oriundo do município de Frederico Westphalen/RS, com a adição de cimento Portland CPV-ARI, para uso em base e sub-base de pavimentos flexíveis.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O pavimento

O pavimento é uma estrutura estratificada que tem por objetivo suportar os esforços a ele submetidos através da ação do tráfego e do intemperismo. Para resistir aos esforços impostos, o pavimento possui múltiplas camadas constituídas de materiais que possuem diferentes resistências e deformações. As principais camadas constituintes de um pavimento são: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito.

Conforme a CNT (2017), o revestimento de pavimentos flexíveis é composto por um material betuminoso, e, as demais camadas como a base, sub-base e o reforço do subleito são constituídas de materiais granulares, terrosos ou estabilizados e melhorados. (BERNUCCI et al., 2008 e DNIT, 2006).

A qualidade dos materiais utilizados na base deve ser superior à dos materiais utilizados nas camadas subsequentes, pois a qualidade dos materiais está relacionada ao tamanho dos esforços a serem suportados pela camada (CNT, 2017). Para Balbo (2007), muitas vezes os esforços que chegam à camada

de base são muito grandes e para dissipação destes esforços, seria necessária uma camada muito espessa, então utiliza-se a divisão de camadas, criando-se a sub-base. A sub-base ocasiona uma redução da espessura e dos custos da camada da base.

A camada de sub-base tem finalidades técnicas e econômicas, auxiliando a camada de base a receber e distribuir os esforços atuantes. Geralmente, a qualidade e resistência dos materiais é inferior à dos utilizados na camada de base do pavimento. Alguns materiais que podem ser utilizados nesta camada são: solo estabilizado ou melhorado com cimento, misturas de solo e agregado, brita graduada, entre outros (CNT, 2017).

2.2 Estabilização química de solos

A realização de uma estabilização tem a finalidade de aumentar as propriedades de resistência e sustentação do solo, deixando-o adequado para seu uso de maneira mais eficaz e econômica. (LAUFER, 1967).

Para fins de pavimentação, França (2003) cita a estabilização química e a estabilização mecânica como as mais utilizadas. Além dessas, pode-se destacar ainda a estabilização granulométrica. A estabilização química pode ser alcançada através da adição de aditivos químicos no solo. Este processo é obtido por meio da mistura do solo (material a ser estabilizado) com os aditivos químicos (cal e ou cimento). A estabilização química é capaz de melhorar uma ou diversas propriedades do solo, tais como sua resistência mecânica, permeabilidade e durabilidade.

Núñez (1991) pontua que a estabilização química permite a estabilização do solo através da troca de íons, precipitação, polimerização e oxidação. O processo de reações químicas no solo tem seu início acompanhado da hidratação do cimento Portland, o qual ocorre de maneira lenta e produz diversos cristais, como: etringita, portlandita, alita, belita e monossulfualuminato de cálcio hidratado, denominados Silicatos de Cálcio Hidratado (C-

S-H) (BRITO e PARANHOS, 2017). Conforme Mehta et al. (1994), os C-S-H são os principais responsáveis pelo ganho de resistência da mistura, sendo que cada cristal citado anteriormente é responsável pela resistência em diferentes idades.

Considera-se os teores mais usuais de solo melhorado com cimento a adição de 2% a 4% de cimento e para a mistura solo-cimento valores de 6% a 10%. Estes valores são constantemente utilizados para a estabilização e melhoria de solos, modificando as propriedades e características do solo *in situ*, possibilitando o seu emprego nas camadas de pavimentos flexíveis (DE OLIVEIRA, 2011).

Ao contrário do solo natural que tem a capacidade de suporte verificada através do ISC, o solo estabilizado verifica a capacidade do material através da realização do ensaio de resistência à compressão simples (RCS). As especificações de serviços rodoviários do DER/PR ES-P 11/05, preveem como valor mínimo de resistência à compressão simples aos sete dias de idade os seguintes valores para as seguintes misturas de solo cimento: (a) solo tratado com cimento: 1,2 à 2,1 MPa para aplicação na camada de sub-base e 1,5 a 2,1 MPa para a camada de base; (b) solo-cimento: superior a 2,1 MPa para posterior aplicação na camada de base e sub-base.

Milani et al. (2006) realizaram um estudo referente ao comportamento e características mecânicas de dois tipos de solos, um arenoso e outro argiloso. Em uma das análises realizadas, ambos foram misturados com cimento Portland do tipo CPIII-40 RS. As misturas realizadas no solo arenoso com adição de 8% de cimento e com 12% tiveram valores de RCS aos sete dias de 2,4 e 3,45 MPa, respectivamente. Já para o solo argiloso, a adição de 8% e 12% obteve valores de RCS inferiores, chegando à 0,65 e 1,25 MPa, respectivamente. Através do estudo pode-se evidenciar que o tipo de solo influencia diretamente nos valores de resistência obtidos, sendo assim, solos do tipo arenosos apresentam um melhor comportamento na presença de cimento, quando comparados a solos argilosos.

3. PROCESSOS METODOLÓGICOS

3.1 Materiais

Para realizar os ensaios que caracterizam o comportamento do solo e sua resposta frente a estabilização, foi necessário utilizar alguns materiais, bem como o solo natural e o cimento Portland do tipo CPV-ARI.

A jazida escolhida para a coleta do solo foi a de Volta Grande pertencente ao município de Frederico Westphalen/RS, localizada na BR 386, km 38, com as seguintes coordenadas: latitude 27°24'9.35" S e longitude 53°24'28.93" W. O solo existente na jazida é do tipo residual de basalto. Na Figura 1 está representada a localização da jazida e o ponto de coleta do material utilizado.



Figura 1. Localização e ponto de coleta da jazida.

Ressalta-se que foi efetuada a coleta de 200 kg de solo, através da retirada de amostras deformadas, que posteriormente foram encaminhadas ao Laboratório de Solos, localizado no prédio 13 da URI-FW. O cimento utilizado na pesquisa para a estabilização química do solo foi o de alta resistência inicial CP-V ARI, da marca Itambé. A escolha deste tipo de cimento se dá ao fato de sua pureza e resistência inicial ser superior aos demais tipos de cimento Portland.

3.2 Metodologia dos ensaios

Para realizar a presente pesquisa, foram executados alguns procedimentos, os quais são descritos e apresentados nos próximos itens.

Esses procedimentos foram realizados com a finalidade de determinar as propriedades do solo natural e das misturas de solo+cimento, as quais foram obtidas através da realização de ensaios que após serem analisados permitiram caracterizar o solo coletado antes e depois do processo de estabilização. A fim de regulamentar os ensaios efetuados, foram utilizadas suas respectivas normas técnicas.

3.2.1 Análise granulométrica

Com a finalidade de conhecer a distribuição granulométrica do solo e as dimensões dos seus grãos, foi realizado o ensaio de granulometria com e sem a adição de defloculante, conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016).

3.2.2 Limites de Atterberg

Para se obter os limites de Atterberg do solo, tomou-se uma amostra de 200 g conforme prescrito na NBR 6457 (ABNT, 2016), sendo que 100 g da amostra total foi utilizada para a determinação do limite de liquidez e as 100 g restantes para o ensaio de limite de plasticidade. O solo utilizado foi passado na peneira nº 40 com abertura de 0,42 mm.

Na realização do ensaio de limite de liquidez, utilizou-se o aparelho de Casagrande, o qual determina a umidade do solo através da quantidade de golpes necessários para o fechamento das bordas da ranhura aberta ao longo do comprimento de aproximadamente 12,7 mm. As verificações de umidade foram realizadas cinco vezes dentro de um intervalo de 35 a 15 golpes, estando de acordo com o requerido na NBR 6459 (ABNT, 2016). Esta normativa prevê que o limite de liquidez do solo corresponde ao teor de umidade do solo expresso em porcentagem no ponto onde foi aplicado 25 golpes.

No ensaio de limite de plasticidade (NBR 7180/2016) realizou-se rolamentos sucessivos da massa de solo sob uma placa de vidro

esmerilhada, até que a amostra de solo alcançasse uma forma esférica, com aproximadamente 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento. Após o filamento de solo chegar à espessura desejada, retirou-se sua umidade. Realizou-se este procedimento por 3 vezes, e a partir da média dos valores de todas as amostras, obteve-se o limite de plasticidade do solo em porcentagem.

A partir da diferença entre os valores de limite de liquidez e plasticidade, obteve-se o índice de plasticidade do solo. Com base nos resultados obtidos nos ensaios de granulometria e limites, efetuou-se a classificação deste solo pelos sistemas tradicionais, sendo eles a SUCS e AASHTO/TBR.

3.2.3 Peso específico real dos grãos

O peso específico real dos grãos é regulamentado pela NBR 6458 (ABNT, 2016). Este ensaio já foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) por Poncio (2017) e Pessotto (2017). Os valores obtidos por eles foram adotados neste trabalho devido ao solo utilizado ser o mesmo.

3.2.4 Análise química do solo

O ensaio de análise química do solo teve como finalidade principal a obtenção da Capacidade de Troca Catiônica (CTC) do solo. Com os valores de CTC encontrados, pode-se analisar de forma indireta o argilomineral presente no solo. Para este ensaio, retirou-se uma amostra contendo 200g de solo, passante na peneira nº 10, de abertura 2,00 mm. O ensaio foi realizado no Campus II da URI de Frederico Westphalen. Na Tabela 1 estão representados alguns valores usuais para CTC em função do grupo de argilominerais.

Tabela 01. Valores usuais de CTC para diferentes argilominerais

Mineral	CTC (cmolc/kg) ¹
Caulinita	3-15
Ilita	10-40
Alofana	10-40
Esmectita	80-150
Vermiculita	100-210
Talco	<1

Fonte: CHESWORTH, 2008.

3.2.5 Compactação

Após a caracterização básica, foram realizados os ensaios de compactação do solo natural e das misturas de solo cimento. Este ensaio foi realizado afim de encontrar o peso específico aparente seco máximo do solo e o seu teor ótimo de umidade. O ensaio seguiu as diretrizes estabelecidas na NBR 7182 (ABNT, 2016) e NBR 12023 (ABNT, 2012), respectivamente.

Solo natural. Como o solo a ser utilizado não é 100% passante na peneira 4,8 mm, o cilindro utilizado para a compactação foi o de tamanho grande. O ensaio foi realizado com o reuso de material para as energias Proctor normal e intermediária, e, sem reuso para a energia Proctor modificada. Nesse ensaio foram realizados cinco pontos para cada energia de compactação, sendo dois pontos abaixo e dois pontos acima do teor ótimo de umidade do solo.

Após a compactação do solo nas três energias já citadas, realizou-se a construção dos gráficos, que relacionam o teor de umidade (no eixo das ordenadas) e o peso específico aparente seco do solo (no eixo das abcissas). De posse do teor ótimo de compactação, permitiu-se moldar os corpos de prova para os ensaios de ISC e Expansão e RCS do solo natural, descritos na sequência.

Misturas de solo-cimento. Para estabilização do solo foram adicionados quatro diferentes teores de cimento Portland CPV- ARI de cura rápida. Na Tabela 02 pode-se observar as

quatro misturas e suas respectivas adições de cimento ao solo.

Tabela 02. Misturas e teores de cimento

	Nome da Mistura	Teores de Cimento (%)
Solo	1	3%
Melhorado com Cimento	2	4%
Solo	3	7%
Estabilizado com Cimento	4	10%

Para essas misturas realizou-se 5 pontos na curva de compactação, sem reuso do material, sendo que dois destes pontos estão acima do teor ótimo de umidade e dois pontos abaixo. A compactação seguiu o método B da norma supracitada, devido ao solo utilizado não ser 100% passante na peneira de 4,75 mm. A energia de compactação utilizada foi a Proctor Normal, utilizando o cilindro pequeno, conforme previsto na NBR 12023 (ABNT, 2012). Com este ensaio foi possível obter o teor ótimo de umidade e a densidade máxima de cada mistura, possibilitando a moldagem dos corpos de prova para realizar o ensaio de RCS.

3.2.6 Índice de Suporte Califórnia e expansão

O ensaio se ISC e expansão permite verificar a possibilidade de aplicar o solo natural diretamente na camada de pavimentos, sem ser necessário estabilizá-lo. O Índice de Suporte Califórnia (ISC), é considerado como um dos principais parâmetros para o dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil. O ensaio de ISC foi realizado somente para o solo natural, nas três energias Proctor de compactação.

Após a compactação do solo natural no teor ótimo de umidade nas energias de compactação já citadas, o solo foi colocado em imersão por um período de quatro dias (96 horas). Durante este período de tempo foi realizado o ensaio de expansão do solo. O tempo de imersão adotado é de acordo com o

mínimo exigido pela NBR 9895 (ABNT, 2016).

3.2.7 Ensaio de resistência à compressão simples

Conforme a NBR 12023 (ABNT, 2012), efetuou-se a compactação do solo natural e das misturas de solo+cimento no molde com dimensões de 10x20 cm, considerando a energia Proctor normal de compactação. O solo natural e as misturas foram compactadas nos seus respectivos teores ótimos de umidade, encontrados nos ensaios de compactação. Para o solo natural e as misturas de solo+cimento, a compactação seguiu o método B da NBR 12024 (ABNT, 2012). Após a compactação do solo natural e misturas 1, 2, 3 e 4 efetuou-se a cura úmida dos corpos de prova por um período de sete dias.

Após o processo de cura dos corpos de prova realizou-se o ensaio de RCS onde os corpos de prova foram rompidos na prensa manual e mecânica. A taxa de velocidade aplicada na prensa mecânica foi de 0,06 MPa/s. Foram moldados no total 18 corpos de prova, sendo que dois corpos de prova foram de solo natural e mais quatro corpos de prova para cada teor da mistura solo-cimento. Sendo assim, dois corpos de provas de cada mistura foram rompidos na prensa manual e os dois corpos de prova restantes de cada mistura mais os dois corpos de prova do solo natural foram rompidos na prensa mecânica, com a finalidade de comparar se há diferença entre uma prensa e outra. Por fim, os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples foram comparados com os valores mínimos exigidos pela NBR 12253 (ABNT, 1992) e pelo DER/PR ES-P/11-05, permitindo avaliar a viabilidade ou não do emprego das misturas realizadas com solo+cimento, nas camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Caracterização físico-química do solo natural

A Tabela 3 sintetiza os resultados da caracterização físico-química do solo. Com a finalidade de conhecer a distribuição granulométrica do solo e as frações que o compõe, realizou-se o ensaio de granulometria. Na Figura 2 é possível identificar as dimensões dos grãos do solo e em quais faixas granulométricas eles se enquadram. Estão representadas duas curvas granulométricas, uma com a adição de defloculante (hexametáfosfato de sódio) e outra sem.

Tabela 3 - Síntese dos ensaios de caracterização físico-química do solo

Parâmetros	Solo VG
Argila	32/14*
Silte	18/25*
Areia Fina	7/15*
Areia Média	5/8*
Areia Grossa	4/4*
Pedr. Fino	9/9*
Pedr. Médio	13/13*
Pedr. Grosso	12/12*
Limite de liquidez (%)	54
Limite de plasticidade (%)	36
Índice de plasticidade (%)	18
Classificação SUCS	MH
Classificação AASHTO	A-7-5
Peso específico real dos grãos (g/cm ³)	3,01
CTC (cmol/l)	15
MO (%)	1,3
pH (H ₂ O)	5,0

* Solo sem defloculante

De acordo com a Tabela 3, o maior percentual de solo, encontra-se na faixa de silte e argila, o que permite classificá-lo como um solo fino. De acordo com Salomão e Antunes (1998), latossolos possuem pouca diferença entre os horizontes A, B e C. Entretanto,

apresentam um alto grau de flocculação, o que pode ser observado na curva granulométrica do solo em análise nesta pesquisa (SALOMÃO E ANTUNES, 1998).

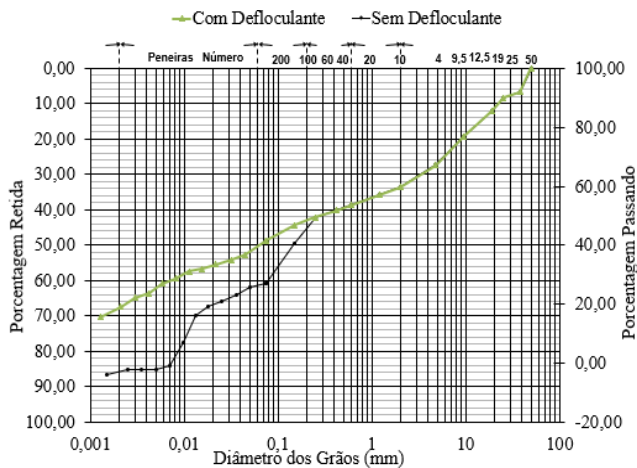


Figura 2 - Curva granulométrica.

Há uma significativa porcentagem de pedregulho presente neste solo, o que é devido ao ponto de coletado do solo estar no pé de um talude. Sua localização está no horizonte de transição BC (laterítico – saprolítico) do solo, onde há uma presença maior de pedregulho e as características do solo são mais próximas às da rocha mãe. A localização do ponto de coleta explica também a diferença obtida entre as curvas granulométricas com e sem a adição de defloculante, sendo esta uma característica típica de solos lateríticos.

Através dos ensaios de limites de liquidez e plasticidade se determinaram os limites de consistência do solo, analisando o seu comportamento na presença de água. No ensaio de limite de liquidez do solo, a umidade média, conforme ilustrada na Tabela 3, foi de 54% aos 25 golpes. Para o ensaio de limite de plasticidade foram realizadas três amostras, cuja a umidade média foi de 36%.

Por meio da diferença entre o valor de limite de liquidez e de plasticidade do solo obteve-se o Índice de Plasticidade (IP) do material. O valor de IP desse solo foi de 18%, o que classifica o material como altamente plástico, sendo compatível com sua granulometria argilosa.

De posse dos resultados de granulometria e Limites de Atterberg, realizou-se a classificação do solo. Segundo o sistema de classificação *Transportation Research Board* (TBR), o solo em análise se enquadra no grupo A-7-5, que são argilas plásticas de alta compressibilidade. O mesmo solo de acordo com o Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS), se enquadra como siltoso de média plasticidade e alta compressibilidade (MH).

Segundo Pinto (2006), o peso específico real dos grãos em solos varia em torno de 2,7 g/cm³. No caso de solos arenosos este valor fica um pouco menor, cerca de 2,65 g/cm³ e em argilas lateríticas, o peso específico real dos grãos pode chegar a valores de até 3,0 g/cm³. Sendo assim, o valor médio de 3,01 g/cm³ de peso específico real dos grãos, encontrado no solo em análise, é um valor plausível para solos lateríticos.

De acordo com os resultados alcançados na presente análise verificou-se que o valor de CTC foi de exatamente 15 cmolc/L, o que significa, de acordo com a Tabela 1, que há presença de caulinita no solo e possivelmente há também a presença de ilita, que é um argilomineral com tendência a ter média expansibilidade. Os valores de MO e pH do solo indicam pouca presença de matéria orgânica e que a acidez do solo é elevada, sendo estes resultados característicos de solos tropicais.

4.2 Curvas de compactação do solo natural e das misturas de solo+cimento

A compactação do solo natural foi realizada nas energias Proctor normal, intermediária e modificada. Na Figura 3 estão representadas as três curvas de compactação do solo natural, nas três energias citadas.

Analisando as curvas de compactação, foi possível observar que conforme aumentou-se a energia de compactação, o peso específico aparente seco aumentou e o teor de umidade ótima do solo reduziu. Esse comportamento já

era esperado, sendo compatível com o descrito na literatura (PINTO, 2006).

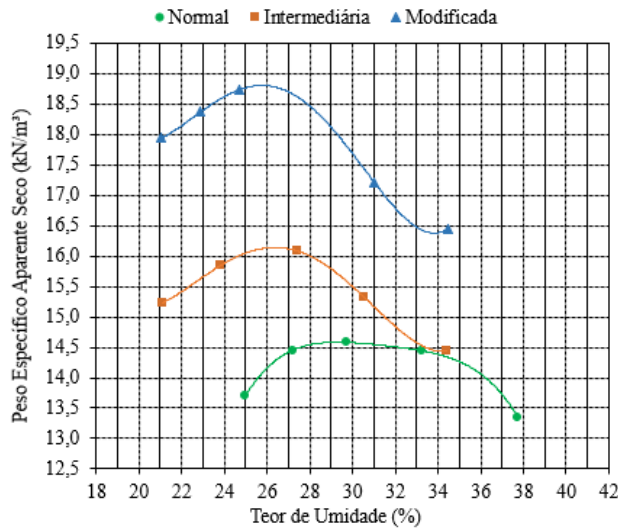


Figura 3 - Curvas de compactação do solo natural

Na Tabela 4 estão sintetizados os valores de peso específico aparente seco máximo e o teor de umidade ótima do solo nas três energias Proctor e das misturas 1, 2, 3 e 4 na energia Proctor normal.

Tabela 4 - Teores ótimos de compactação

Solo/ Mistura	Energia de compact.	Peso esp. seco máx. (kN/m³)	Umid. ótima (%)
Solo Natural	Norm	14,60	29,30
Solo Natural	Intermediária	16,20	26,10
Solo Natural	Modificada	18,60	25,50
Mistura 1	Normal	14,24	32,20
Mistura 2	Normal	14,37	31,00
Mistura 3	Normal	14,40	30,80
Mistura 4	Normal	14,30	30,80

Para as misturas de solo+cimento, a compactação foi realizada somente para a energia Proctor normal. Ressalta-se que este ensaio foi realizado seguindo o método B da norma, devido ao solo não ser 100% passante

na peneira 4,75 mm. Na Figura 4 estão ilustradas as curvas obtidas para cada mistura durante este ensaio.

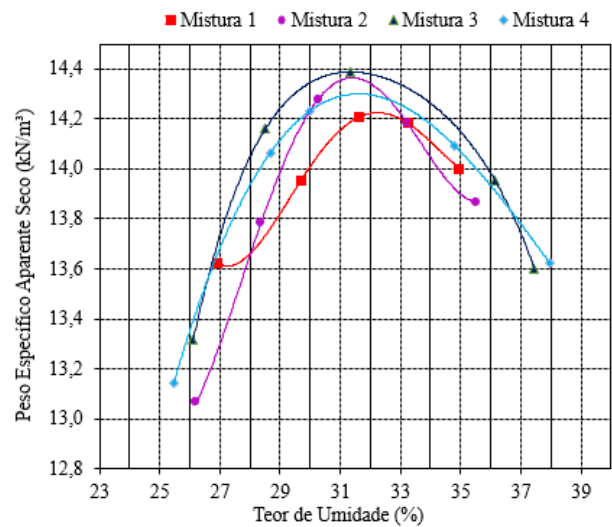


Figura 4 - Curvas de compactação das misturas

De acordo com os valores obtidos de peso específico aparente seco máximo e teor de umidade ótima de cada mistura, notou-se que as misturas de solo+cimento, obtiveram a mesma curva de tendência apresentada para o solo natural, em suas curvas de compactação. Conforme foi se adicionando mais cimento em cada mistura, a umidade ótima diminuiu. Entretanto, na mistura 4 a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo se mantiveram muito próximos aos valores alcançados na mistura 3.

4.3 Índice de Suporte Califórnia e expansão

Após realizada a compactação do solo natural e obtido a sua curva de compactação para as três energias já citadas, foi realizado o ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansão. Através deste ensaio, pode se verificar se é possível ou não aplicar o solo natural nas diversas camadas do pavimento sem necessitar estabilizá-lo. Vale ressaltar que os corpos de prova foram compactados no peso específico aparente seco máximo e no teor de umidade ótima de cada energia. Na Tabela 5

estão descritos os resultados encontrados durante o ensaio de expansão e ISC.

Tabela 5 - Resultados de ISC e Expansão

Energia de compactação	ISC (%)	Expansão (%)
Normal	6	1,12
Intermediária	10	0,45
Modificada	14	0,27

Com os resultados obtidos, pode-se observar que os valores de ISC para as três energias de compactação ficaram abaixo do requerido pelo DNIT (2006). O órgão requer o valor de ISC maior ou igual a 20% e expansão menor ou igual à 1% para permitir a aplicação do solo na camada de sub-base. Para base o ISC deve ser maior ou igual à 80% e expansão menor ou igual a 0,5%, sendo inviável a aplicação do solo natural diretamente em ambas camadas do pavimento. Se referindo às demais camadas da estrutura, como o caso do subleito e o reforço do subleito, este solo natural poderia ser empregue em ambas as camadas, pois o DNIT exige ISC maior ou igual à 2% e expansão menor ou igual à 2% para aplicação no subleito e expansão menor ou igual à 1% para o reforço ao subleito. Ressalta-se que apenas o solo compactado na energia normal não satisfaz a condição de expansão máxima e que o material empregue na camada do reforço ao subleito deve ter propriedades melhores que o utilizado na camada do subleito.

Analisando os resultados obtidos de expansão do solo, foi possível identificar que os valores, em geral foram significativamente baixos. De acordo com o ensaio de análise química do solo, foi encontrado a presença de caulinita. Este argilomineral, de acordo com Pereira (2004) tende a ser o responsável por baixos valores de expansão, o que ocorreu no solo em análise, onde os valores de expansão foram inferiores à 2%. Para a energia Proctor normal, achou-se um valor de expansão superior, quando comparado aos valores de expansão alcançados nas demais energias,

podendo estar relacionado à sua menor energia de compactação, resultando em uma menor densidade.

4.4 Resistência à compressão simples

Os valores de RCS foram obtidos através da média dos resultados de cada mistura. Na Tabela 6 estão ilustrados a média dos resultados deste ensaio para a prensa manual e mecânica.

Tabela 6 - Valores de resistência à compressão simples

	RCS - Prensa Manual (MPa)	RCS - Prensa Mecânica (MPa)
Solo natural	-	0,24
Mistura 1	0,07	0,23
Mistura 2	0,12	0,39
Mistura 3	0,37	0,72
Mistura 4	0,81	0,96

Nota-se que há uma diferença entre os valores de RCS nos corpos de prova rompidos na prensa manual e mecânica. Esta diferença pode ser devido à variabilidade da velocidade aplicada na prensa manual, o que pode influenciar diretamente nos resultados finais de RCS. Outro fator a ser considerado é que devido à dificuldade em deixar a superfície dos corpos de planas durante a moldagem do solo, os corpos de prova rompidos na prensa mecânica tiveram a pressão aplicada de forma mais homogênea. Sendo assim, os valores encontrados na prensa mecânica se tornam mais confiáveis e precisos.

Os valores de RCS tanto para o solo natural quanto para todas as misturas foram inferiores ao requerido por norma, no que tange a sua aplicação na camada de sub-base e base de pavimentos flexíveis (1,5 MPa e 2,1 MPa, respectivamente). Entretanto, observou-se que com a adição de cimento houve uma melhoria da resistência à compressão do solo, em geral. A adição de 3% de cimento ao solo natural foi insuficiente para melhorar esse parâmetro,

apresentando valor semelhante ao solo sem estabilização, entretanto com a adição superior à 4% de cimento, se torna perceptível a melhoria dos valores de RCS. Quando comparados os resultados obtidos no ensaio de RCS na prensa mecânica das misturas com o solo natural pode-se notar um aumento gradativo de resistência para as misturas 2, 3 e 4 sendo eles respectivamente de: 162,5%, 300% e 400% em relação ao solo natural.

De acordo com o estudo de Milani et al. (2006), quando se realiza a estabilização de solos argilosos, este apresenta um melhor comportamento e ganho de resistência quando estabilizados com cal e não cimento Portland. Para outros autores como Ingles e Metcalf (1972), quando o solo é estabilizado ou melhorado com adição de cimento, os teores adicionados na mistura devem ser superiores a 8%, gerando assim resultados significativos no aumento da resistência e melhoria das demais propriedades.

Outro fator que influencia na baixa resistência é o tipo de argilomineral presente no solo. A possível presença, neste caso de illita, pode ter influenciado nas reações de melhoria do solo, acarretando numa baixa resistência à compressão simples.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O solo analisado e estudado na presente pesquisa possui uma alta plasticidade, sua granulometria é de predominância fina, sendo classificado como argilo-siltoso de alta compressibilidade pelos sistemas SUCS e AASHTO/TBR.

Segundo os resultados obtidos no ensaio de ISC, pode-se confirmar que o solo natural não pode ser aplicado diretamente na camada de base e sub-base de pavimentos flexíveis, necessitando de melhoria. Por norma, os valores de ISC a serem alcançados devem ser superiores à 80% para aplicação na camada de base e 20% para a camada de sub-base. Entretanto, no solo em análise, o maior valor

encontrado de ISC foi de 14% para a energia Proctor modificada.

Analisando os resultados de expansão, para o caso da energia Proctor normal, a expansão foi superior ao máximo permitido. Para o emprego na camada de base e sub-base, a expansão máxima deve ser de 0,5% e 1%, respectivamente. Nas demais energias de compactação, a expansão ficou abaixo de 0,5%. Os valores de ISC e Expansão se enquadram de acordo com DNIT (2006) para aplicação na camada de subleito e reforço ao subleito.

Se tratando das misturas de solo+cimento e solo natural, os valores alcançados no ensaio de RCS foram inferiores ao esperado e o mínimo estabelecido por norma de 1,5 MPa para aplicação em sub-base e 2,1 MPa para camada de base de pavimentos flexíveis. Entretanto houve uma significativa melhora da resistência do solo+cimento quando comparado ao solo in natura. Os valores atingiram uma melhoria de 162,5%, 300% e 400% para as misturas 2, 3 e 4, respectivamente.

Conclui-se que o solo em análise, devido sua predominância argilosa, deveria ser estabilizado com valores superiores a 8% de cimento ou com cal de acordo com Ingles e Metcalf (1972). A presença de argilominerais como a caulinita e possivelmente illita no solo, também podem ser os responsáveis pelos baixos valores de resistência à compressão simples. Isso torna o solo presente na região de Frederico Westphalen/RS, ainda que melhorados com adições de até 10% de CPV-ARI, inaplicáveis nas camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.** NBR 6458. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **Solo-cimento- Dosagem para emprego como camada de pavimento.** NBR 12253, 1992.

_____. **Solo- cimento – Ensaio de compactação.** NBR 12023. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **Solo – Cimento- Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos-procedimento.** NBR 12024. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **Solo – Determinação do limite de liquidez.** NBR 6459. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **Solo – Determinação do limite de plasticidade.** NBR 7180. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **Solo – Ensaio de compactação.** NBR 7182. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **Solo – Índice de Suporte Califórnia.** NBR 9895. Rio de Janeiro, 2016.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração.** São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro - Rj: PETROBRAS: ABEDA, 2008. 504 p.

Brasil. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação geral de estudos e pesquisa. Instituto de pesquisas rodoviárias. **Manual de pavimentação.** 3ed. Rio de Janeiro. 2006. 274p.

BRITO, Laís Costa; PARANHOS, Haroldo da Silva. Estabilização de Solos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento.** Edição 06. Ano 02, Vol. 01. Pp 425-438, Setembro de 2017.

CHESWORTH. W. (Coord.) **Encyclopedia of Soil Science.** New York: Springer, 2008..

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE -CNT. Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?. 2017. **Confederação Nacional do Transporte.** Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Estudo/transporte-rodoviario-pavimento>>. Acesso em: 21 fev. 2018.)

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE -CNT. Transporte rodoviário: desempenho do setor, infraestrutura e investimentos. 2017. **Confederação Nacional do Transporte.** Disponível em:<<http://www.cnt.org.br/Estudo/transporte-rodoviario-desempenho>>. Acesso em 08 mar. 2018.

DE OLIVEIRA, Rodrigo Fidelis Viana. **Análise de dois solos modificados com cimento para dimensionamento de pavimentos.** 2011. 186 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Belo Horizonte - Mg, 2011.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO PARANÁ DER/PR ES-P 11/05. **Pavimentação: Solo-cimento e Solo Tratado com Cimento.** Paraná, 2005.

FRANÇA, Fabrício Carlos. **Estabilização química de solos para fins rodoviários: Estudo de caso com o produto “RBI Grade 81”.** 2003. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – Mg, 2003. Cap. 2.

LAUFER, Berthold. **Chinese clay figures, Part 1: Prolegomena on the history of defensive armor.** Kessinger Publishing: Whitefish, 1967.

INGLES, Owen Graeme; METCALF, John B. **Soil stabilization principles and practice.** 1972.

MEHTA, Povindar K.; MONTEIRO, Paulo JM; CARMONA FILHO, Antônio. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Pini, 1994.

Dagmar. Utilização de material fresado como camada de pavimento: estudo laboratorial e aplicação em campo. **42ª Reunião Anual de Pavimentação**. Rio de Janeiro: ABPv, 2013.

MILANI, Ana PS et al. **Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e casca de arroz**. Engenharia Agrícola, 2006.

NÚÑEZ, Washington Peres. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação**. 1991. 150f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – Rs, 1991.

PESSOTTO, Laura. **Estudo do efeito da granulometria do material fresado para estabilização de um solo para aplicação em sub-base de pavimentos**. 2017. 54f. Projeto de conclusão de curso. Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das missões, Frederico Westphalen-Rs, 2017.)

PINTO, Carlos de Souza. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.)

PONCIO, Tiago Onuczak. **Utilização de material fresado para estabilização de um solo com a finalidade de aplicação como camada de sub-base de pavimento**. 2017. 54f. Projeto de conclusão de curso. Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das missões, Frederico Westphalen-Rs, 2017;

SALOMÃO, FX de T.; ANTUNES, F. dos S. **Solos em pedologia**. Geologia de Engenharia. São Paulo, Oficina de Textos, 1998.

SPECHT, Luciano Pivoto; PIRES, Gustavo Menegusso; VITORELO Thiago; HIRSH, Fábio; CRONST, Fernando; BERGMANN, Eduardo Constante; TIEFENSEE, Marisa