XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP

Estudo do comportamento mecânico de solos dispersivos estabilizados com cal a partir de ensaios cíclicos

Rubén Alejandro Quiñónez Samaniego
Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, rquinonez@ing.una.py

Luis Santiago Portaluppi Diana
Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, tiagoporta86@gmail.com

Eduardo José Bittar Marin
Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, ebittar@ing.una.py

Rubén Alcides López Santacruz
Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, rlopez@ing.una.py

RESUMO: As argilas dispersivas, caracterizam-se por ser solos altamente erodíveis. A adição de cal nestes tipos de solos modifica a estrutura através da estabilização química que fornece o melhoramento de suas propriedades mecânicas. Neste sentido, a presente pesquisa pretende avaliar o melhoramento de solos com adição de cal das seguintes variáveis: densidade, teor de cal, temperatura de cura, a partir de ensaios de resistência à compressão simples, e ensaios triaxiais cíclicos para obtenção do módulo de resiliência. Os resultados mostraram que a relação vazios/cal é um parâmetro adequado para o comportamento mecânico de um solo dispersivo estabilizado com cal, o que também nos permite correlacionar o módulo resiliente (Mr), com as resistências à compressão simples (q_u). Por outra parte, o módulo resiliente possui o seguinte formato de equação $Mr = A * \sigma_d \wedge^{0,30}$, onde o valor da potência igual a 0,30 foi obtida empiricamente como resultado dos ensaios realizados. Dessa forma, para cada valor de "q_u" corresponde um determinado valor de "A", o qual determina a curva de previsão do Módulo Resiliente.

PALAVRAS-CHAVES: solo-cal, solos dispersivos, modulo de resiliência, relação vazios/cal.

ABSTRACT: Dispersive clays are known for being highly erosive soils. The addition of lime in these soils is a stabilization technique that produces improvement of the mechanical and physical properties. In this sense, the present research intends to evaluate the improvement of soils with lime addition of the following variables: density, lime content, curing temperature, from unconfined compression strength tests, and cyclic triaxial tests to obtain the resilient modulus. The results showed that the porosity/lime (η/Liv) ratio is an adequate parameter for the mechanical behavior of a dispersive soil stabilized with lime, which also allows us to correlate the resilient modulus (Mr), with the unconfined compressive strength (qu). On the other hand, the resilient modulus presents the following equation format Mr = A * σd0.30, where the power value equal to 0.30 was obtained as a result of the tests performed. In this way, each value of qu corresponds to a certain value of A, which defines the curve of the resilient modulus.

KEYWORDS: lime stabilized soils; Dispersive soil; Resilient modulus, porosity lime ratio

1 Introdução

O solo é um material complexo, variável e de enorme aplicação na engenharia rodoviária devido a sua abundância na superfície terrestre. Muitas vezes a sua complexidade e variabilidade fazem que o engenheiro tenha que se confrontar com comportamentos e propriedades que não satisfazem condições técnicas ou econômicas para sua utilização na construção de pavimentos.

Um exemplo claro se tem no caso da utilização em pavimentação de materiais granulares como camadas de base e sub-base, onde a restrição geralmente está associada à escassez do material pétreo na região da obra como no caso do Chaco Paraguaio, gerando assim altos custos de transporte, tornando inviável a sua utilização. Nesses casos uma das alternativas é o melhoramento das propriedades do solo local com a adição de estabilizantes. Os estabilizantes mais empregados com sucesso na construção de pavimentos são o cimento Portland e a cal, bem como cinzas volantes, escoria granulada de alto forno e materiais betuminosos.
Quando o solo contém sais de sódio como sulfatos de sódio, este se torna dispersivo pelo aporte do sódio. Segundo Mitchell (2005), a floculação se obtém quando são incorporados à estrutura da argila elementos carregados positivamente chamados cátions, que neutralizam as cargas negativas. Os mesmos provêm da solução à que se encontra a partícula de argila (água intersticial). Os cátions comuns são o cálcio, magnésio, sódio e potássio. Em torno de cada cátion forma-se uma esfera de solvatação formada por moléculas de água, isto é, o conjunto adere-se à partícula de argila devido ao campo elétrico gerado pelos cátions e pelas características de dipolo das moléculas de água. O tamanho da esfera de solvatação diminui com o aumento da concentração de cátions na solução e vice-versa. Trabalhos recentes em solos dispersivos da região do chaco paraguaio demostraram que a dispersão desses solos é controlada mediante a adição de cal hidratada (de 1% a 4%).
O objetivo geral deste trabalho é o estudo do comportamento mecânico de solos argilosos do chaco estabilizados com cal a partir de ensaios cíclicos para sua aplicação em obras rodoviárias.

2. Programa Experimental

2.1 Materiais

2.1.1 Solo

As amostras de solo foram coletadas de uma jazida próxima à Subestação da ANDE da Cidade de Villa Hayes, estado de Presidente Hayes, Bajo Chaco – Paraguai. Estes solos são semelhantes aos solos empregados nas pesquisas realizadas por Consoli et. Al (2016). (Figura 1)



Figura 1. Localização do sítio de extração das amostras de solo.

A partir dos ensaios de caracteriação são presentado na Tabela 1, os resultados das propriedades físicas e químicas do solo.

Tabela 1. Propriedades Físicas e Quimicas do Solo Dispersivo

Propriedades	Valores	Norma
Limite Líquido (LL)	44	(ABNT NBR 6459, 1984)
Limite Plástico (LP)	22	(ABNT NBR 7180/84)

Índice de Plasticidade (IP)	22	
Peso Específico Real dos Grãos (G)	27.3 kN/m^3	(ABNT NBR 6508, 1984)
% Passante #200	91	
% Passante #40	96	
% Passante #10	100	
Classificação AASHTO	A-7-5	(AASHTO (ASTM D-3282), 2004)
CBR do solo natural (Energia T-99)	3%	AASHTO
Peso Específico Aparente Máximo (T-180)	19.7 kN/m^3	AASHTO T-180
Umidade ótima (T -180)	15%	AASHTO T-180
Peso Específico Aparente Máximo (T-99)	16.2 kN/m^3	AASHTO T-99
Umidade ótima (T -99)	16.2%	AASHTO T-99
Classificação SUCS	CL*	(ASTM D 2487, 2011)
SAR (Sodium Absorption Ratio)	20	ICOLD BULLETIN 77
Grau de Dispersão (Pinhole test.)	ND4*	(ABNT NBR 14114 .. , 1998)

* CL (Argila de baixa compressibilidade)
* ND4 (Grau de dispersão intermediária)

2.1.2. Cal Hidratada

A cal utilizada foi cal hidratada calcítica produzida no Paraguai. A massa específica obtida seguindo as recomendações da (ASTM D854, 2014) foi de 24,13 kN/m³ e as propriedades químicas foram fornecidas pelo fabricante (Tabela 2).

Tabela 2. Propriedades químicas da cal.

CaO	**MgO**	**SiO_2**	**R_2O_3**
68,36%	0,61%	1,24%	1,92%

2.1.3. Água

Para a realização de todos os experimentos foi utilizada água desmineralizada com condutividade elétrica menor ou igual a 2 uS/cm.

2.2 Moldagem e Cura dos Corpos-de-Prova em Laboratório.

A moldagem dos corpos-de-prova para os ensaios de resistência a compressão simples e para ensaios triaxiais cíclicos foram realizadas em moldes cilíndricos tripartidos de aço e de dimensões internas de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Se procedeu a compactar estaticamente em cinco camadas no interior dos moldes de aço. Por fim os corpos de provas eram armazenados e curados a uma temperatura de 20° ±2°C, e 40° ±2°C.

2.3 Definição de pontos de moldagens.

A partir das curvas de compactação do solo-cal com teores de 5, 8 e 11%, com duas energias de compactação T-99 e T-180 das normativas AASHTO. Foram determinados os pontos de moldagens, com 3 diferentes pesos específicos aparentes secos, mantendo fixa a umidade de compactação com uma escolha próxima às umidades ótimas de todas as curvas. (Figura 2)

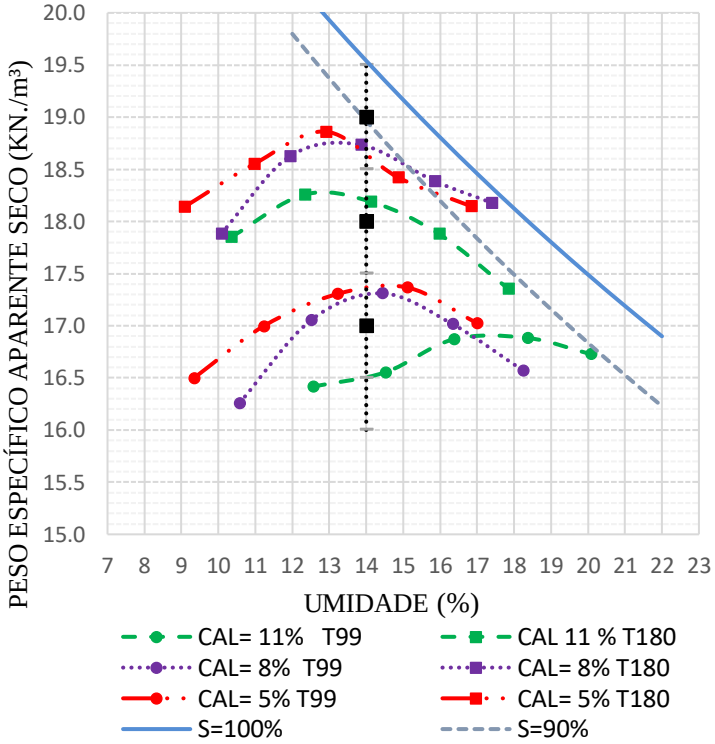


Figura 2. Ensaios de compactação Proctor T-99 e T-180. Definição de Pontos de Moldagens.

2.4. Ensaios de Resistência à compressão simples.

Os experimentos seguiram a norma (ASTM D5102, 1996). A prensa utilizada para os ensaios tem uma capacidade de 100 kN. Para evitar o efeito da sucção os corpos-de-prova eram colocados em imersão em água pelo menos 24 horas antes da realização do ensaio, a água era mantida a uma temperatura de 20 ± 2 °C.
As variáveis selecionadas para o estudo em relação ao ensaio à resistência à compressão simples foram:

- Peso específico aparente seco: 17 kN/m³, 18 kN/m³ e 19 kN/m³
- Teor de Cal: 5%, 8% e 11%
- Umidade: 14 %
- Tempo de cura: 7 dias
- Temperatura de cura: 20º e 40º C

2.5. Ensaios de Módulo de Resiliência.

Os experimentos seguiram a norma (AASHTO T307/99,2012). O equipamento utilizado foi da marca GDS *Instrument* Modelo 5Hz 5kN Eldyn. Todos os experimentos foram realizados com a umidade de moldagem.
As variáveis selecionadas para o estudo em relação ao ensaio à resistência à compressão simples foram:

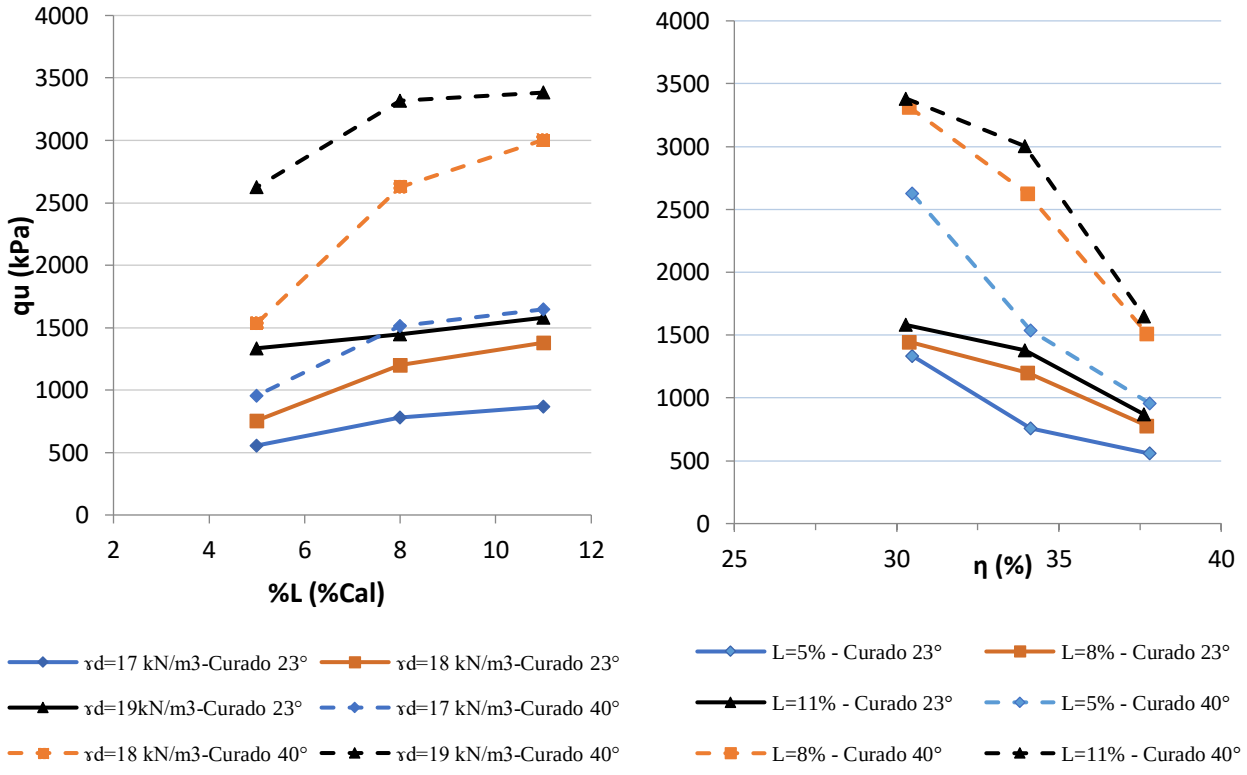
- Peso específico aparente seco: 17 kN/m³, 18 kN/m³ e 19 kN/m³
- Teor de Cal: 5%, 8% e 11%
- Umidade: 14 %

• Tempo de cura: 7 dias
• Temperatura de cura: 20º

3. Resultados

3.1. Ensaios de Resistência à compressão Simples.

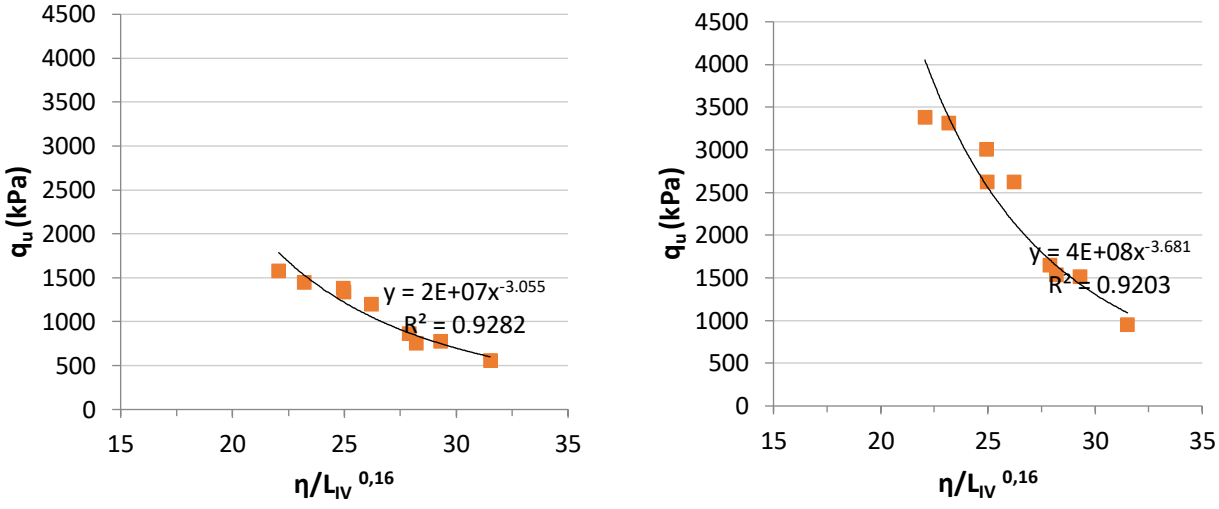
Na Figura 3, se apresentam os resultados das resistências à compressão simples, se observa um aumento significativo das resistências respeito à temperatura de cura, de 20 para 40ºC. Com isto, pode-se concluir que modificando a cura de 20 para 40ºC, existe um aumento de resistência: para 5% de cal um aumento na ordem de 80%, para 8% e 11% de cal um aumento de 100%.
Isto tem relação com a literatura que estabelece Bell (1996), onde explica que para curas com temperaturas maiores, estas aceleram a cura e ganho de resistências, enquanto as temperaturas mais baixas retardam o progresso das reações de solo-cal.



a) b)

Figura 3. a) Resistência q_u vs porcentagem de cal a 20°C e 40°C, b) Resistência q_u vs porosidade Cura 7 dias a 20°C e 40°C.

A partir da interpretação do parâmetro de controle de resistência desenvolvido pelo grupo de pesquisa do Professor Nilo Consoli, através de trabalhos como Foppa (2005) e Lopes Junior (2007). Foi definido que nestes tipos de solos o parâmetro de controle das resistências mecânicas de misturas de solo-cal, estão dadas pelo formato da curva $q_u(kPa) = A\left[\eta / L_{iv}^{0.16}\right]^B$, sendo o parâmetro $\left[\eta / L_{iv}^{0.16}\right]$ (Consoli et al., 2016).
Portanto, na Figura 4, se apresentam as resistências à compressão simples em função ao parâmetro de relação vazios/cal, notando-se que existe uma boa correlação em função a dito parâmetro.

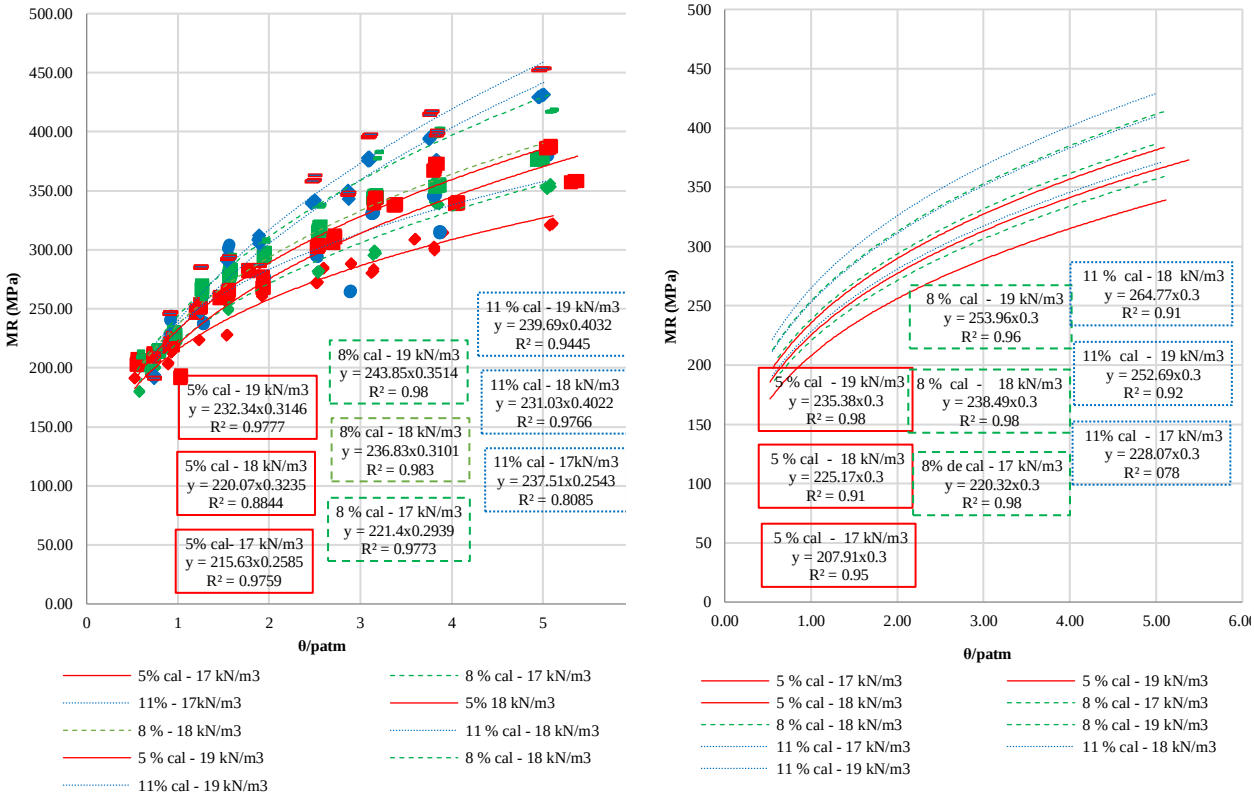


a) b)

Figura 4. Resistências à compressão simples para 7 dias de cura. a) Resistência q_u vs relação vazios/cal a 20°C, b) Resistência q_u vs relação vazios/cal a 40°C.

3.2. Ensaios triaxiais para determinação do Módulo de Resiliência.

Na Figura 5, se apresentam os resultados dos módulos de resiliência respeito ao primer invariante de tensões principais normalizada pela pressão atmosférica. Todas as curvas obtidas apresentam o formato $Mr= A^* (\theta/p_{atm})^B$. A partir da análise da curva pode-se ter que o fator "B" da formulação varía de 0.25 a um valor de 0.4. Aplicando uma simplificação pode-se assumir que a média é de B = 0,30. Neste sentido, reformulando todas as equações para o formato da curva onde B=0,30 temos que $Mr= A^* (\theta/p_{atm})^{0,30}$ (Figura 5b).



a) b)

Figura 5. a) Ensaios de módulo resiliente vs primeiro invariante de tensões normalizado pela pressão atmosférica θ/p_{atm} para pesos específicos secos de 17 kN/m^3, 18 kN/m^3 y 19 kN/m^3 e para porcentagens de cal de 5%, 8% y 11%., b) Gráfico de ajuste das curvas de Módulo resiliente vs primeiro invariante de tensões normalizado pela pressão atmosférica θ/p_{atm}

Feita uma análise de todas as curvas obtidas correspondentes para cada mistura de solo-cal, teremos um valor do parâmetro A para um determinado valor de $\left[\eta/L_{iv}^{0.16}\right]$. Os valores se apresentam na Tabela 3.

Tabela 3. Valores de A com respeito à $\left[\eta/L_{iv}^{0.16}\right]$ para os pesos específicos de 17, 18 e 19 kN/m^3 e para porcentagens de cal de 5, 8, e 11%.

AMOSTRA	CAL (%)	γ_d(kN/m^3)	$\eta/L_{IV}^{0,16}$	A
1	11.00	19	22.06	264.77
2	8.00	19	23.19	253.96
3	5.00	19	24.97	235.38
4	11.00	18	24.95	252.69
5	8.00	18	26.21	238.49
6	5.00	18	28.21	225.17
7	11.00	17	27.90	228.08
8	8.00	17	29.30	220.32
9	5.00	17	31.52	207.91

Neste sentido, temos que:
Pode-se ser realizada a Figura 6., onde se apresentam os parâmetros A em função à $\left[\eta/L_{iv}^{0.16}\right]$. Desta forma, obtendo valores de $\left[\eta/L_{iv}^{0.16}\right]$, pode-se escolher na Figura 6, um valor do parâmetro A, e uma vez determinado este parâmetro podemos obter a curva do modulo resiliente.

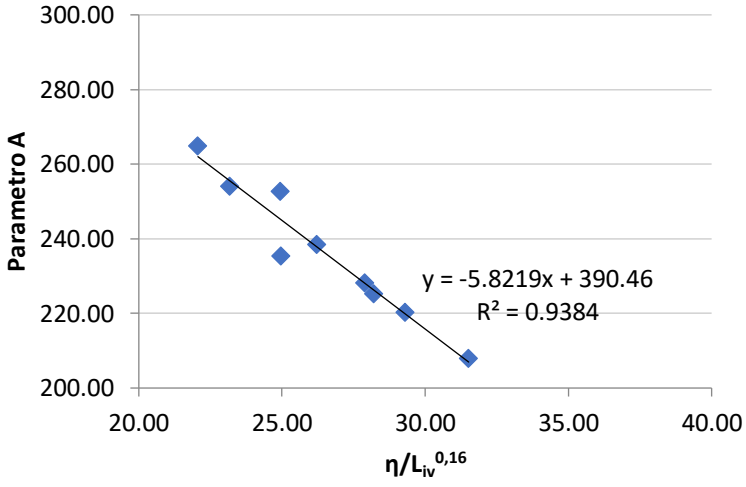


Figura 6. Parâmetro A vs $\left[\eta/L_{iv}^{0.16}\right]$.

4. Conclusões

Com esta pesquisa, correlações empíricas em solos dispersivos estabilizados com cal foram obtidas a partir de Ensaios do Módulo Resiliente e ensaios de resistências à compressão simples. O fator $\left[\eta/L_{iv}^{0.16}\right]$ mostra-se um parâmetro relevante para a determinação de módulos resilientes em solos estabilizados com cal, envolvendo variáveis como: quantidade de cal e porosidade da amostra.
Essas correlações podem ser de grande importância para sua implementação e uso na determinação dos módulos resilientes de solos dispersivos do Chaco Inferior estabilizados com cal.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sua gratidão ao CONACYT pelo suporte e fomento à pesquisa, à FIUNA pelo uso das infraestruturas e ao Professor Nilo Consoli pela sua contribuição ao nosso grupo de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D854. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

CONSOLI, N. C.; SILVA LOPES, L. DA; HEINECK, K. S. Key Parameters for the Strength Control of Lime Stabilized Soils. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 21, n. 5, p. 210–216, 2009.

FOPPA, D. Análise de Variáveis-chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados, 2005. *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*.

LOPES JR., L. DA S. Metodologia De Previsão Do Comportamento Mecânico De Solos Tratados Com Cal, 2011. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LOPES JUNIOR, L. DA S. Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada., 2007. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SAMANIEGO, R. AL. Q. Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal, 2015. Universidade federal do Rio Grande do Sul.

Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials, American Association of State and Highway Transportation Officials, 2017.