



MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA  
DEPARTAMENTO NACIONAL DE  
INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

DIRETORIA-GERAL

DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E  
PESQUISA

INSTITUTO DE PESQUISAS  
RODOVIÁRIAS  
Setor de Autarquias Norte  
Quadra 03 Lote A  
Ed. Núcleo dos Transportes  
Brasília – DF – CEP 70040-902  
Tel/fax: (61) 3315-4831

OUTUBRO/2019

NORMA DNIT 419/2019 - ME

## Pavimentação – Solo-Cal – Estimativa do teor mínimo de cal para estabilização química de solo – Método de ensaio

**Autor:** Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR

**Processo:** 50606.001896/2019-11

**Aprovação pela Diretoria Colegiada do DNIT na reunião de 07/10/2019 .**

*Direitos autorais exclusivos do DNIT, sendo permitida reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte (DNIT), mantido o texto original e não acrescentado nenhum tipo de propaganda comercial.*

### Palavras-chave:

Solo, Cal, dosagem físico-química, Eades e Grim

### Nº total de páginas

8

### Resumo

Esta norma especifica o método de ensaio para determinar o teor mínimo de cal para a estabilização físico-química de um solo (Solo-cal). Baseia-se no método proposto por Eades e Grim que mensura o pH do solo com vários teores de cal, com o objetivo de atingir o pH de 12,4. Este método é uma estimativa que facilita a determinação do teor mínimo de cal para realização dos ensaios mecânicos.

### Abstract

This standard specifies the test method for determining the minimum lime content for the physical-chemical stabilization of a soil (Soil-lime). It is based on the method proposed by Eades and Grim that measures soil pH with various lime contents, with the objective of reaching the pH of 12.4. This method is an estimate which facilitates the determination of the minimum lime content for mechanical testing.

### Sumário

Prefácio .....	1
1 Objetivo.....	1
2 Referências normativas .....	2
3 Definição.....	2
4 Mecanismos de reação Solo-Cal .....	2
5 Aparelhagem .....	2

6 Amostra .....	2
7 Descrição do método .....	2
8 Resultados.....	3
Anexo A (Informativo).....	4
Anexo B (Informativo) Figura 1, 2 e 3 .....	6
Anexo C (Informativo) Bibliografia.....	7
Índice geral.....	8

### Prefácio

A presente Norma foi preparada pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR/DPP, para servir como documento base, visando estabelecer os procedimentos para a realização do ensaio de dosagem físico-química de solo-cal. Sua criação teve origem a partir do apoio técnico da empresa LHOIST e desenvolvimento no Termo de Execução Descentralizada -TED nº 682/2014 firmado com a COPPE/UFRJ. Está formatada de acordo com a Norma DNIT 001/2009 – PRO.

Está formatada de acordo com a Norma DNIT 001/2009-PRO.

### 1 Objetivo

O objetivo deste método é determinar o teor mínimo de cal calcítica necessário para estabilizar o solo, visando seu emprego em obras rodoviárias e ferroviárias.

## 2 Referências normativas

Os documentos relacionados a seguir são indispensáveis à aplicação desta Norma. Para referências datadas, aplicam-se somente as edições citadas. Para referências não datadas, aplicam-se as edições mais recentes do referido documento (incluindo emendas).

- a) DNIT 418/2019-EM: Pavimentação – Cal Virgem e Cal Hidratada – Especificação de material. Brasília: IPR.
- b) DNER-ME 213: Solos – Determinação do teor de umidade – Método de Ensaio. Brasília: IPR.
- c) ASTM D 6276-99a: Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization. Philadelphia, 2006.

## 3 Definição

Para efeito desta norma aplicam-se as seguintes definições:

### 3.1 Cal

Produto resultante da calcinação do calcário, que consiste em óxido de cálcio ou hidróxido de cálcio.

### 3.2 Teor de cal

Porcentagem que representa a massa de cal em relação à massa de solo seco.

### 3.3 Estabilização de solos com cal (Solo-Cal):

Processo físico-químico resultante da adição da quantidade mínima de cal que promove o aumento permanente das propriedades mecânicas dos solos.

### 3.4 pH

Escala logarítmica que mede o grau de acidez, neutralidade ou alcalinidade de uma determinada solução.

## 4 Mecanismos de reação Solo-Cal

Quando a cal é adicionada a uma suspensão aquosa de um solo, uma série de reações químicas imediatas começam a ocorrer: (i) reações de troca catiônica, (ii) reações de neutralização ácido-base e (iii) adsorção pelas superfícies dos argilominerais. A adição de cal leva o solo a uma nova condição de equilíbrio químico e termodinâmico. A acidez do solo é neutralizada, os cátions trocáveis são substituídos pelo íon cálcio. No Anexo A mostram-se equações destas reações.

## 5 Aparelhagem

Para este procedimento de ensaio é necessária a seguinte aparelhagem:

- a) Recipientes plásticos de 150 a 250 ml. No mínimo seis frascos;
- b) Peneira nº 40 (abertura de 0,42 mm);
- c) Balança de precisão com capacidade de 1kg e acurácia de  $\pm 0,2\%$ ;
- d) Bastão de baquelite ou similar;
- e) Equipamento medidor de pH. O pHmetro é um aparelho usado para medir o pH, constituído basicamente por um eletrodo e um potenciômetro.

## 6 Amostras

### 6.1 Solo

A amostra de solo usada no ensaio é seca ao ar, totalmente destorroada e passante na peneira nº40 (abertura de 0,42 mm). A quantidade de amostra necessária é aproximadamente 500 g por ensaio, representativa do solo.

### 6.2 Cal

A amostra de cal deve atender as especificações da norma DNIT 418/2019-EM. A quantidade necessária é de cerca de 200 g por ensaio.

### 6.3 Água

A água utilizada para a realização do ensaio deve ser destilada.

## 7 Descrição do método

Para a realização do ensaio deve-se seguir o procedimento, baseado na norma ASTM 6276, que tem os seguintes passos:

- a) Determine o teor de umidade (W %) de uma amostra representativa de solo seco ao ar (DNER-ME 213/94);
- b) A partir da amostra de solo seco ao ar, obtenha 5 amostras equivalentes de solo seco em estufa, conforme item 3;
- c) Determine a massa de cada amostra de solo seco ao ar equivalente 25 g de solo seco em estufa, como segue:

$$M_s \text{ ar} = 25 \times (1,0 + W/100)$$

Onde:

Ms ar: massa de solo seco ao ar (g);

W: teor de umidade (%) da amostra seca ao ar

- d) Coloque cada amostra de solo em frascos de 150 a 250 ml com tampa;
- e) Obtenha 6 amostras representativas de cal, onde cinco amostras serão adicionadas ao solo com teores variando de 2 a 10% em relação ao peso de 25 g de solo seco, e a sexta amostra de cal será de 2 g colocada em um frasco;
- f) Em seguida, adicione cada uma das cinco amostras de cal ao solo em cada frasco separadamente, misture, tampe e marque a sua respectiva porcentagem no frasco;
- g) Acrescente em cada frasco a quantidade de 100 ml de água destilada em cada mistura de solo-cal e ao frasco contendo 2 g de cal;
- h) Tampe os frascos e agite-os vigorosamente durante 30 segundos a fim de garantir a homogeneização completa da solução;
- i) Continue agitando os frascos por 30 segundos a cada 10 minutos durante 1 hora;
- j) Determine os valores de pH em um equipamento próprio nos últimos 15 minutos de agitação;
- k) Registre os valores de pH de cada solução de solo-cal e cal-água.

## 8 Resultados

A menor porcentagem de cal adicionada ao solo que alcança o valor de pH de 12,4 é o teor mínimo de cal que proporciona a estabilização do solo. Caso este valor não seja alcançado, deve ser realizado um novo ensaio com maiores porcentagens de cal.

Após a repetição dos ensaios, se o maior valor de pH alcançado é de 12,3 e o resultado se mostra constante em duas porcentagens sucessivas de cal, considera-se o menor percentual como teor mínimo de cal para estabilização do solo. Se o valor de pH medido é menor que 12,3, o ensaio é inválido e deve-se verificar a existência de erros no equipamento, amostras e/ou repetir o ensaio com maiores porcentagens de cal.

Ao final do ensaio, deve-se apresentar um relatório com as seguintes informações:

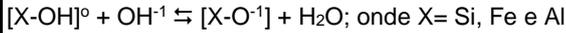
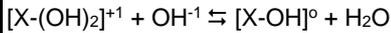
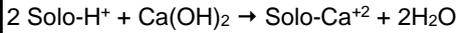
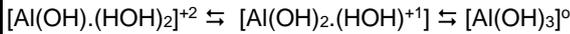
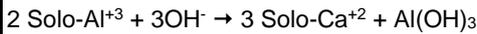
- a) Tabela com os valores de percentual de cal e pH obtidos e gráfico [% Cal x pH], como mostrado no Anexo B;
- b) Valor de pH obtido para a solução de cal e água;
- c) Teor mínimo de cal indicado para estabilizar o solo;
- d) Identificação, caracterização e procedência da amostra de cal.

Nota 1: Em certos solos tropicais residuais, ricos em óxi-hidróxidos de ferro (goetita e hematita) e alumínio (gibbsita), o valor de pH de 12,4 pode não ser atingido devido ao início precoce do ataque químico à paragênese de óxidos livres, onde o hidróxido de cálcio é consumido muito rapidamente pelas reações pozolânicas, simultaneamente às reações de superfície.

\_\_\_\_\_/Anexo A

Anexo A (Informativo)

Equações de reação do solo com cal



Vê-se que o se o solo estiver abaixo do seu PCZ (ponto de carga zero), a cal é neutralizada até que esse ponto seja atingido e continua a sê-lo até que o pH seja igual a 12,4; o valor de saturação de uma solução saturada de Ca(OH)<sub>2</sub>.

A figura 1 mostra faixas de pH de acordo com as reações químicas que ocorrem, quando cal é progressivamente adicionada a um solo até o pH=12,4.

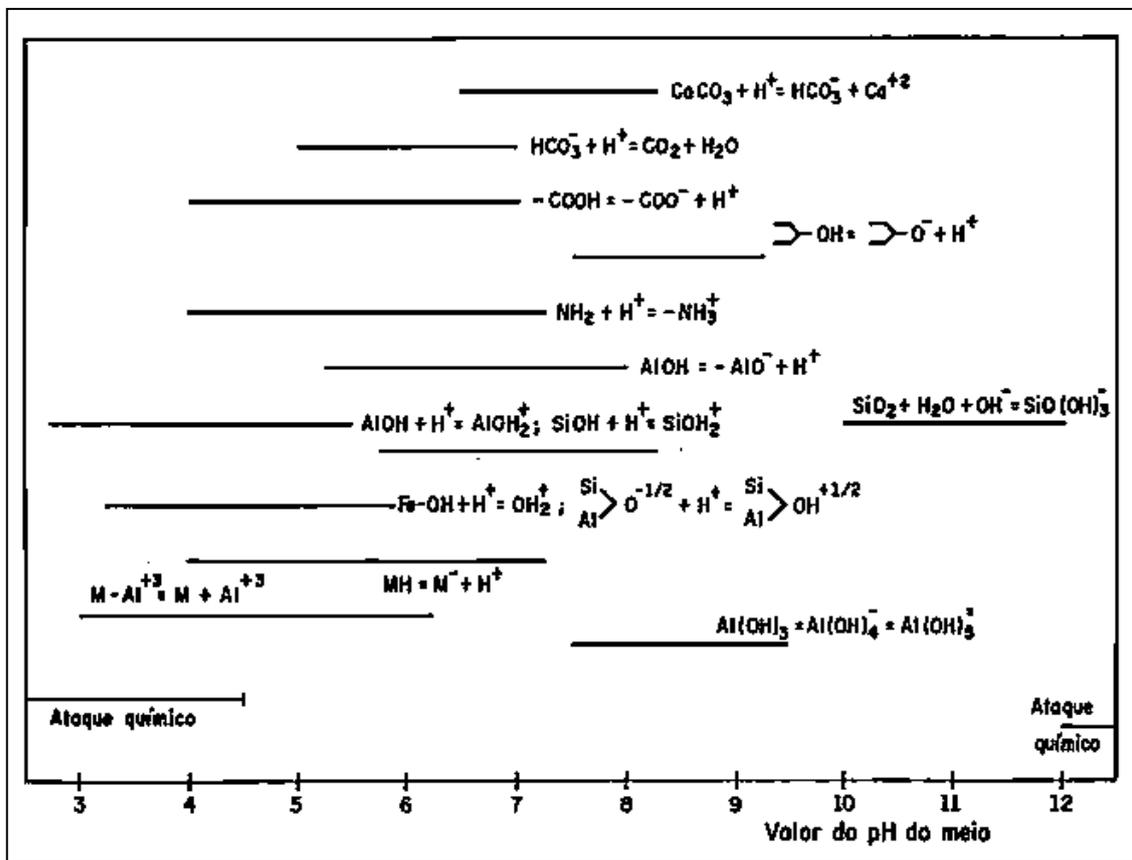
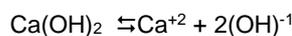
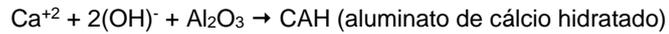


Figura 1 – Esquema das reações solo-cal

Após todas essas reações químicas de superfície terem ocorrido, o pH tende a estacionar no valor pH-12,4 - que é o valor do pH de uma solução saturada de Ca(OH)<sub>2</sub>. A pH =10, a argila já começa reagir quimicamente devido a alcalinidade e uma vez que o valor do pH na saturação seja atingido, as reações pozolânicas entre o solo e a cal, se estabelecem em definitivo. Toda a cal adicionada à suspensão de um solo, primeiramente é utilizada nas reações de troca catiônica e de neutralização, anteriormente mostradas e depois se iniciam as reações químicas com a argila, que resultam na formação de compostos cimentantes.

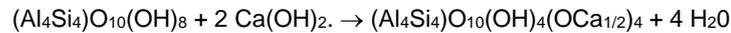




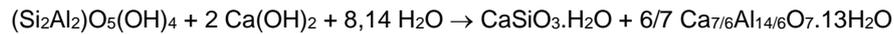
onde C = CaO; S = SiO<sub>2</sub>; A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; H=H<sub>2</sub>O

É então possível escrever equações químicas que descrevem os dois grandes estágios do processo de cimentação pozolânica, a saber:

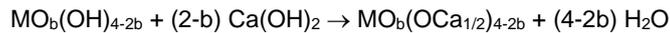
(1<sup>ª</sup>) Uma rápida adsorção de moléculas de Ca(OH)<sub>2</sub> por sítios de elevada reatividade:



(2<sup>ª</sup>) A interação pozolânica propriamente dita que se segue, como por exemplo:

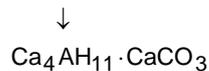
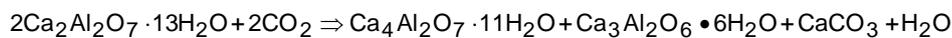
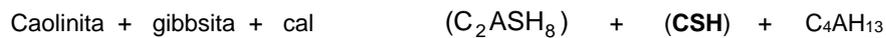
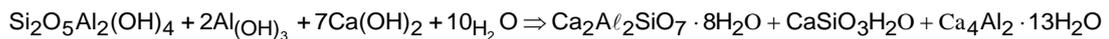


Para os óxi-hidróxidos de Fe e Al, a equação geral pode ser escrita como a seguinte:



onde, M = Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Ti<sup>4+</sup>, etc, e [b = 0, 1, 1/2 e 3/2].

A título de exemplo, algumas das reações químicas que originam a formação desses compostos são apresentadas a seguir, de modo mais explícito. No sistema solo-cal tem-se:



\_\_\_\_\_/Anexo B

Anexo B (Informativo)

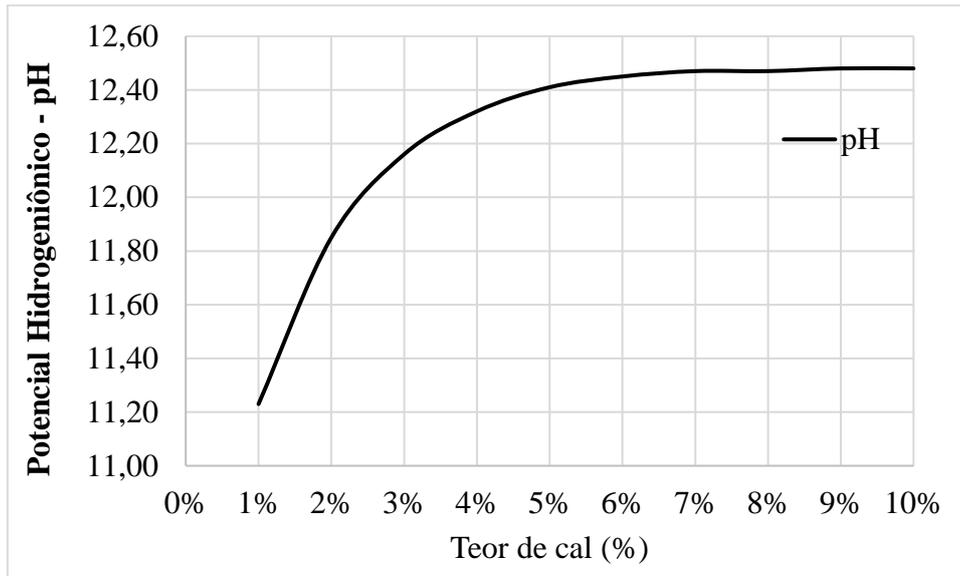


Figura 1: Exemplo de resultado do método para um solo

Teor provável: 5%



Figura 2: Potes com amostras de solo e cal para realização do ensaio do método do pH



Figura 3: Exemplo de Leitura do pH de solo + cal

**Anexo C (Informativo) - Bibliografia**

- American Society for Testing And Materials. (2006). ASTM D 6276-99a: Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization. Philadelphia, 2006.
- Behak, L. Estabilização de um Solo Sedimentar Arenoso do Uruguai com Cinza de Casca de Arroz e Cal. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFRGS.
- Borges, H. F. "Estabilização de um solo argiloso com cal de carbureto". Tese de mestrado COPPE/UFRJ. 1979.
- Budny, J. "Verificação do Potencial de Estabilização de um Solo Laterítico com uso de Ácido Fosfórico, Ácido Cítrico e Cinza de Casca de Arroz". 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – UFRJ.
- Castro, F. J. C. O. Um estudo físico-químico – matemático de estabilização alcalina de solos argilosos, Tese de mestrado COPPE/UFRJ, 1981.
- Castro, F. J. C. O - Contribuição ao conhecimento e a determinação da reatividade de solos sesquioxídicos utilizando o hidróxido de cálcio: aplicação ao processo de geopolimerização. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – UFRJ. 1995.
- Delgado, J. V. C. "Avaliação da aplicação do lodo ETA na pavimentação como disposição final ambientalmente adequada". 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFRJ.
- Eades, J.L., and Grim, R.E., A Quick Test to Determine Lime Requirements for Lime Stabilization, Highway Research Board, National Research Council, Washington DC, No. 139, pp. 61-72, 1966.
- Eades, J.L., e Grim, R.E., Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization, Highway Research Record Bulletin, N° 262, 1960.
- Kelm. T. A. "Avaliação do uso de lodo de estação de tratamento de esgoto na estabilização de materiais para pavimentação". 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFRJ.
- Little, D.N., (1995). Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime. 1. ed. Austin, US: Lime Association of Texas, 1995.
- Lovato, R. S. "Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Estabilizado com Cal, aplicado à pavimentação". 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFRGS.
- Marcon, A. F., "Durabilidade e módulos de elasticidade de misturas areia-cal-cinzas volantes". Tese de mestrado COPPE/UFRJ/1977.
- Medina, J. Apontamentos de estabilização de solos. IPR. 2018.
- Menéndez G, J. J. "Solos expansivos; sua estabilização com cal". Tese de mestrado COPPE/UFRJ.1973.
- Metogo, D. A. N. "Trecho de Pavimento Asfáltico executado com Misturas de Solo Tropical, Fosfogesso e Cal". 2010. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Construção) - UFG.
- Nardi, J. V. "Estabilização de areia com cal e cinzas volantes; estudo do efeito da adição de cimento e de brita". Tese de mestrado COPPE/UFRJ,1975.
- Oliveira, E. "Emprego da Cal na Estabilização de Solos Finos de Baixa Resistência e Alta Expansão: Estudo de Caso no Município de Ribeirão das Neves/MG". 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFSC.
- Silveira, J. Estudo da permeabilidade e estrutura de solo-cal, Tese de mestrado COPPE/UFRJ.1979.
- Taborda, L. F. "Análise de um Pavimento Semirrígido com Base em Solo, Cal e Cinza Volante". 2012. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) - UFRGS.

**Índice geral**

Abstract.....	1	Objetivo .....	1.....	1	
Água.....	6.3.....	2	pH.....	3.4.....	2
Amostras.....	6.....	2	Prefácio .....	1	
Anexo A (Informativo).....	4	Referências Normativas.....	2.....	2	
Anexo B (Informativo).....	6	Resultados .....	8.....	3	
Anexo C (Informativo) - Bibliografia .....	7	Referências normativas.....	2.....	3	
Aparelhagem.....	5.....	2	Resumo.....	1	
Cal.....	3.1/6.2.....	2	Solo.....	6.1.....	2
Definição .....	3.....	2	Sumário.....	1	
Descrição do método .....	7.....	2	Teor de cal .....	3.2.....	2
Estabilização de Solo com Cal .....	3.3.....	2			
Mecanismo de reação Solo Cal .....	4.....	2			

---