

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA DA CAL NA PERMEABILIDADE DO SOLO LATERÍTICO E SUPERFICIAL DE CASCAVEL/PR

FERRONATTO, Lucas¹
ALMEIDA, Maycon André de²

RESUMO: Com o constante crescimento das cidades, torna-se inevitável a implantação de rodovias e construções sobre solos cujas características não atendem aos requisitos mínimos exigidos por norma, sendo assim, surge a necessidade de melhoramento dele por meio de natureza química, física ou mecânica, visando alcançar as propriedades desejadas. O presente estudo teve como objetivo analisar a influência do tempo de cura da cal adicionada em diversos teores na permeabilidade do solo laterítico e superficial de Cascavel-PR. As amostras de solos utilizadas foram coletadas no Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEF), e os ensaios foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos do Centro Universitário FAG. O processo de preparação da amostra consistiu em destorroamento, peneiramento e secagem em estufa. Em seguida, foi realizada a moldagem dos corpos de prova utilizando o ensaio de *Proctor*, sendo moldados 12 corpos de prova, variando a porcentagem de cal, a energia de compactação (Normal e Modificada) e o tempo de cura. Para determinação do coeficiente de permeabilidade, realizou-se o ensaio de permeabilidade à carga variável pelo Método B da NBR 14545/2000. Os resultados obtidos de coeficiente de permeabilidade foram da ordem de 10^{-5} e 10^{-6} , sendo estes considerados satisfatórios por classificarem como grau de permeabilidade baixa. As amostras com tempo de cura de 28 dias apresentaram uma menor condutividade hidráulica em relação às amostras com tempo de cura de 7 dias, afirmando que o tempo de cura tem sim influência na permeabilidade do solo.

Palavras-chave: Permeabilidade, Compactação, Tempo de cura.

1. INTRODUÇÃO

Com diversos fatores envolvidos em uma obra de Engenharia Civil, o solo deve ser um dos principais em termos de análises e cuidados. Pinto (2006) já ressaltava sua importância quando dizia que todas as obras da Engenharia Civil se assentam sobre o solo, sendo essencial possuir todo tipo de conhecimento de suas características, propriedades e comportamento para fins de cálculos e dimensionamentos, garantindo, assim, a qualidade e eficiência da obra.

O constante crescimento das cidades acaba criando a necessidade de implantação de novas rodovias e duplicação das já existentes, e torna-se inevitável que a rodovia passe por áreas onde o solo não atende as características especificadas em projeto, sendo necessário

¹ Acadêmico do Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel - PR. E-mail: ferronato80@gmail.com.

² Professor orientador, Mestre, Engenheiro Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel – PR.

executar a substituição deste, ou então realizar um melhoramento das propriedades com aditivos químicos.

Segundo Azevêdo (2010), a utilização da cal como aditivo possibilita a utilização do solo encontrado na própria obra, acarretando, assim, em uma redução de custo e, principalmente, de tempo de execução da obra, pois não há a necessidade de transportar solo de jazidas para utilizar na camada de estabilização.

Guimarães (2002) *apud* Thomas (2016) explica que a adição de determinados teores de cal no solo altera a rigidez, a resistência e o seu comportamento, de acordo com ensaios em campo e em laboratório. Assim, percebe-se a importância dos estudos de melhoramento de solos, pois trazem maior confiabilidade e segurança para as obras e redução de custos.

Segundo Thomas (2016), na resistência à compressão simples, misturas de solo-cal apresentam ganho de resistência ao longo do tempo de cura. Com isto, o presente trabalho visa analisar a influência do tempo de cura da cal adicionada em diversos teores na permeabilidade do solo superficial laterítico de Cascavel-PR.

Com essas informações, a justificativa para a realização deste trabalho vem do constante crescimento urbano, tornando-se inevitável a ocupação em solos cujas propriedades e características não apresentam compatibilidade com os exigidos em projetos. Há, então, a necessidade de encontrar alternativas para o melhoramento da resistência e menor permeabilidade, sendo o melhoramento com aditivos químicos o melhor no ponto de vista econômico.

Para tanto, a pergunta a ser respondida com a realização dessa pesquisa foi a seguinte: O tempo de cura da cal aplicado ao solo tem grande influência na permeabilidade e no ganho de resistência deste solo?

Este estudo está limitado a comparar os resultados obtidos por meio de ensaios de permeabilidade realizados em laboratórios para a mistura de solo-cal, com resultados de estudos anteriores realizados com diferentes teores e tempos de cura. As amostras de solo foram extraídas do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEF), no município de Cascavel-PR. O procedimento para o ensaio de determinação da permeabilidade do solo foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos do Centro Universitário Assis Gurgacz seguindo as especificações contidas no Método B da ABNT NBR 14545 (2000).

De acordo com as informações expostas anteriormente, este trabalho teve como objetivo geral analisar a influência do tempo de cura da cal adicionada em diversos teores na permeabilidade do solo superficial laterítico de Cascavel-PR.

Para que o trabalho tenha êxito foi necessário alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Determinar os coeficientes de permeabilidade das amostras da mistura de solo-cal nos teores de 2%, 5% e 8%, com tempos de cura de 7 e 28 dias;
- Comparar os resultados obtidos entre os tempos de cura;
- Comparar os resultados obtidos com estudo anterior realizado por Costa (2018).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tipos de solos

Segundo Costa (2018), para a classificação do solo, deve-se levar em consideração diversos parâmetros, como origem e formação do solo e granulometria das partículas que o constituem. Pela granulometria, os solos podem ser classificados em grossos e finos, entendem-se por solos grossos aqueles que apresentam maiores porcentagens de pedregulhos e areias em sua composição, já os solos finos apresentam maiores porções de silte e argila.

Quanto à origem e formação, podem ser divididos em residuais, transportados e orgânicos. Solos residuais são aqueles que apresentam as características da rocha mãe, ou seja, não sofreram nenhum tipo de transporte, e estão ainda depositados no local de origem.

Já os solos transportados são aqueles que sofreram deslocamento por agentes geológicos, do local de origem até onde se encontram depositados. Tais transportes ocorrem por meios como: mar, rio, vento, gelo e gravidade. Este solo apresenta grande quantidade de matéria orgânica em sua composição e não possui ligação com a rocha original (VARGAS, 1977 *apud* CASAGRANDE, 2017).

E, por fim, os solos orgânicos que são aqueles que apresentam materiais de origem vegetal ou animal, sendo de fácil identificação por apresentar uma coloração escura e forte odor, geralmente são encontrados em regiões litorâneas e próximos a rios e córregos. Segundo Pinto (2006), este solo geralmente se torna problemático para a construção civil, pois apresenta um elevado índice de vazios e alta taxa de permeabilidade, fazendo com que este se torne muito compressível e apresente baixa capacidade de suporte.

2.2 Permeabilidade

A permeabilidade é uma propriedade do solo que permite que a água escoe por meio dele. Tal propriedade é expressa numericamente através do coeficiente de permeabilidade (k) expresso em m/s (CAPUTO, 1988).

Na Engenharia Civil, ter conhecimento sobre a permeabilidade de um solo é um fator de suma importância em diversas obras, tais como: barragens de terra, obras de drenagem, rebaixamento do nível d'água, adensamento, entre outras, uma vez que tem influência sobre a vazão e o recalque do solo, pois, quanto maior o coeficiente de permeabilidade de um solo, maior se torna sua instabilidade.

Diversos fatores estão diretamente e indiretamente ligados à permeabilidade de um solo, sendo o índice de vazios que é diretamente proporcional à permeabilidade do solo, quanto maior for este índice do solo maior será a permeabilidade dele e quanto mais compacto estiver o solo menor é a permeabilidade. Temperatura da água que quanto maior, menor se torna a viscosidade do solo, com isso a água flui com mais facilidade por entre o solo, aumentando o coeficiente de permeabilidade (FALKOWSKI, 2016). Por fim o tipo do solo, sendo os solos com grãos maiores apresentam maior permeabilidade, o contrário ocorre nos solos finos, pois seus grãos estão mais juntos, diminuindo os espaços de passagem da água.

2.2.1 Determinação do coeficiente de permeabilidade (k)

A água pode percorrer livremente através de uma massa de um solo permeável sob a ação da gravidade. Com alguns experimentos, Darcy, em 1850, percebeu que os diversos fatores geométricos influenciavam a vazão da água, expressando a equação que ficou conhecida pelo seu nome e é apresentada na Equação 1 (PINTO, 2006).

$$Q = \frac{k \cdot h \cdot A}{L} \quad (1)$$

Em que:

Q = vazão;

A = área do permeâmetro;

k = uma constante para cada solo, que recebe o nome de coeficiente de permeabilidade;

h = carga que se dissipa na percolação;

L = distância ao longo a qual a carga se dissipa.

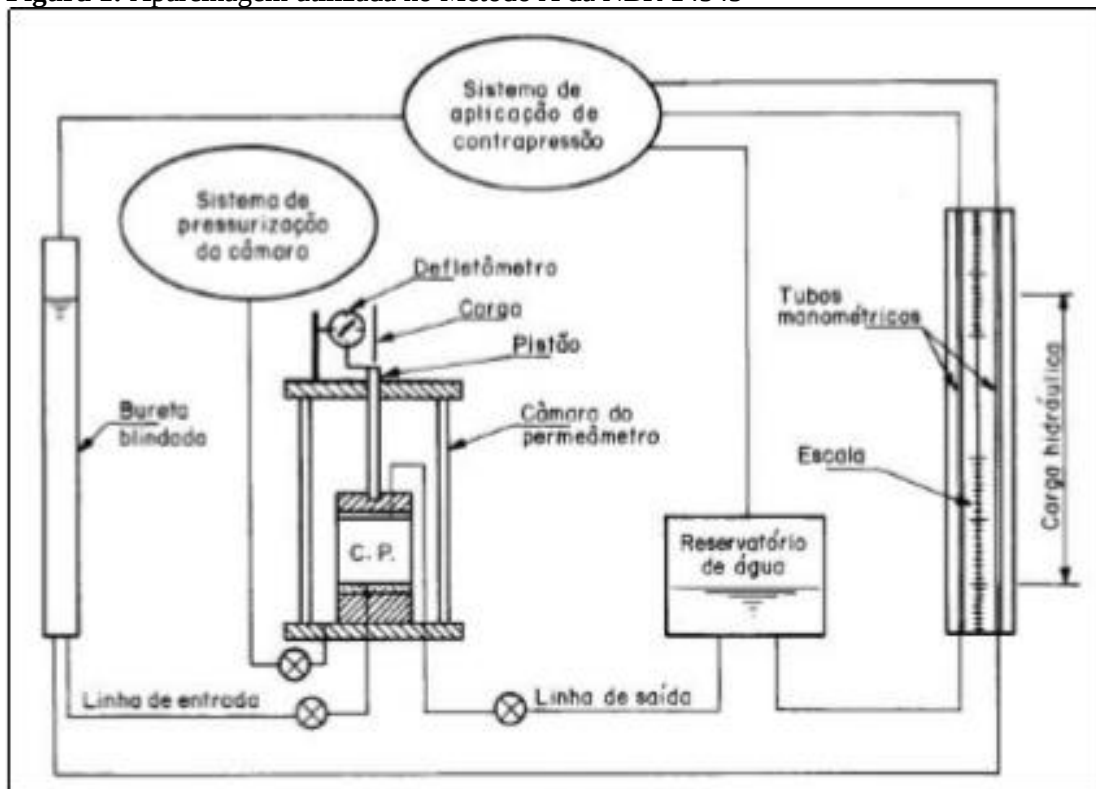
O coeficiente de permeabilidade também pode ser obtido através de ensaios laboratoriais, tendo dois métodos diretos de obtenção, o ensaio de permeabilidade de carga constante e o ensaio de permeabilidade de carga variável, no presente estudo foram realizados ensaios de permeabilidade de carga variável.

2.2.1.1 Permeabilidade de carga variável

Regida pela ABNT NBR 14545 (2000), a obtenção do coeficiente de permeabilidade por meio do ensaio de carga variável é recomendada para solos finos, como argila e silte. A norma prescreve dois métodos diferentes para a realização deste ensaio, o Método A e o Método B.

O Método A utiliza contrapressão, garantindo uma efetiva saturação do corpo de prova, sendo o mais recomendável, pois o coeficiente de permeabilidade decresce com o aumento de ar presente no material, bem como, assegura-se maior controle dos dados obtidos. A Figura 1 apresenta a aparelhagem utilizada no Método A.

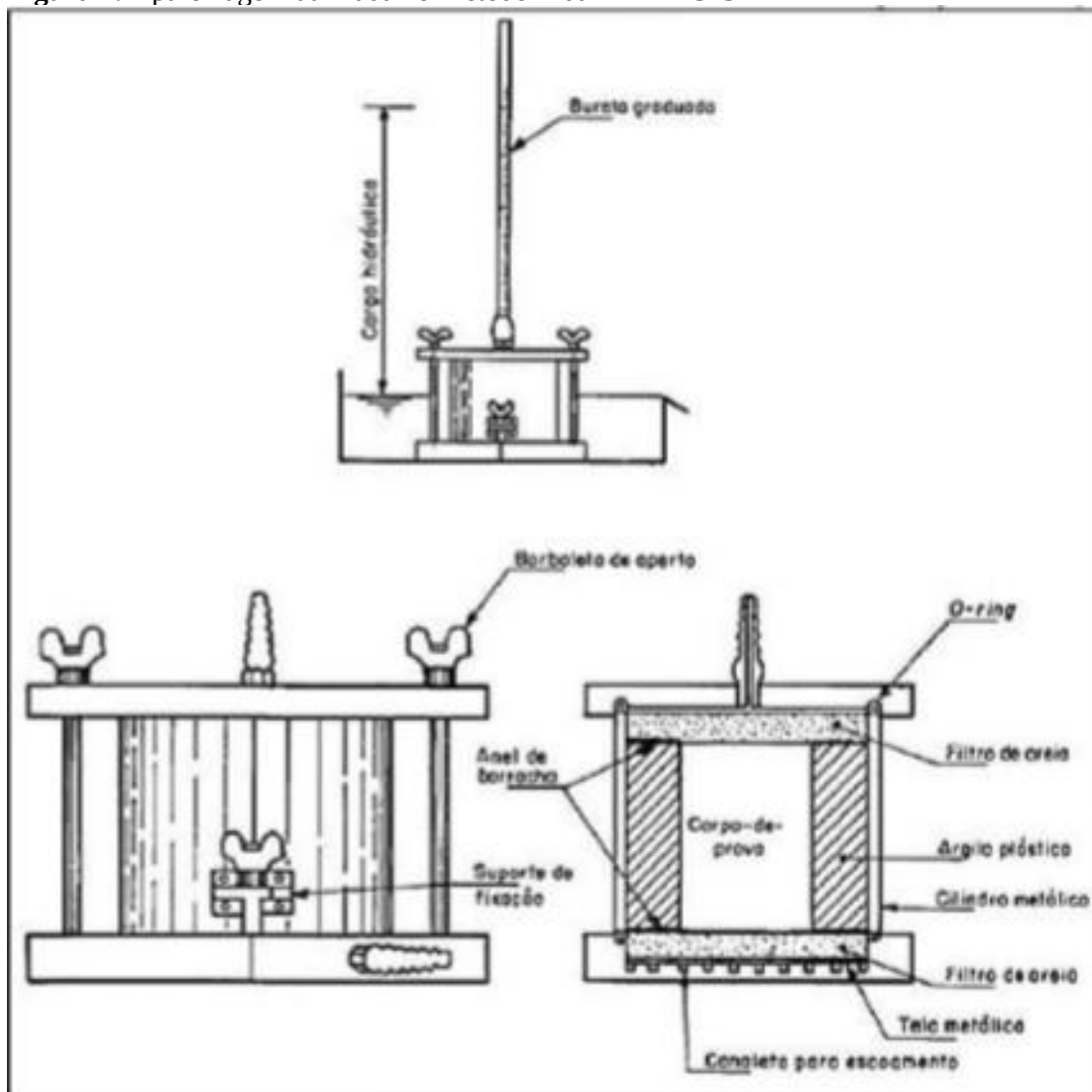
Figura 1: Aparelhagem utilizada no Método A da NBR 14545



Fonte: ABNT (2000).

Já o Método B é realizado em condições sensivelmente menos controladas, sendo este utilizado quando não se tem à disposição a aparelhagem necessária para se realizar o Método A. O ensaio consiste em medir a carga hidráulica do sistema com variações de tempo, dados que serão relacionados em equação para determinar o coeficiente de permeabilidade. A Figura 2 demonstra a aparelhagem utilizada no Método B.

Figura 2: Aparelhagem utilizada no Método B da NBR 14545



Fonte: ABNT (2000).

2.3 Cal

A cal é um produto obtido pela calcinação de rochas calcárias em grandes temperaturas, e é constituída, principalmente, por óxido de cálcio. São encontrados três tipos de cales: cal virgem, cal hidratada e cal hidráulica (COSTA, 2018).

A cal virgem origina-se da calcinação de rochas de calcário em temperatura inferior à de fusão, sendo constituída, principalmente, por óxido de cálcio em associação com o óxido de magnésio. Já a cal hidratada é apresentada em forma de um pó branco, seco e fino, sendo obtida por meio da hidratação adequada da cal virgem. Por fim, a cal hidráulica é obtida em temperaturas próximas a do ponto de fusão, formando silicatos, aluminatos e ferritas de cálcio. Tais características dão a este tipo de cal um certo grau de hidraulicidade, ou seja, ela endurece pela ação da água. Sendo a cal hidratada a mais utilizada na construção civil, pois não precisa ser extinta antes do uso, oferecendo maior facilidade no transposto e armazenamento.

2.3.1 Melhoramento do solo com adição de cal

O processo de estabilização do solo com a cal é utilizado a cerca de dois mil anos, sendo, principalmente, utilizado na construção de rodovias. Segundo Nogueira *et al.* (2016), a estabilização de solo com cal ocorre com as reações químicas da interação da cal com os argilominerais, a água e a atmosfera, podendo se observar dois tipos de reações: as reações rápidas ou imediatas e as reações lentas ou cimentantes, segundo os mesmos autores, o teor de cal ideal é entre 3% e 10%, pois abaixo de 3% não é possível obter em campo os mesmos resultados obtidos em laboratório devido as condições climáticas e acima de 10% se torna antieconômico.

Já foram realizados diversos estudos sobre estabilização do solo com cal já realizados, como Souza (2014) e Corte (2013), em solos areia-siltosa e silte-argiloso respectivamente.

3. METODOLOGIA

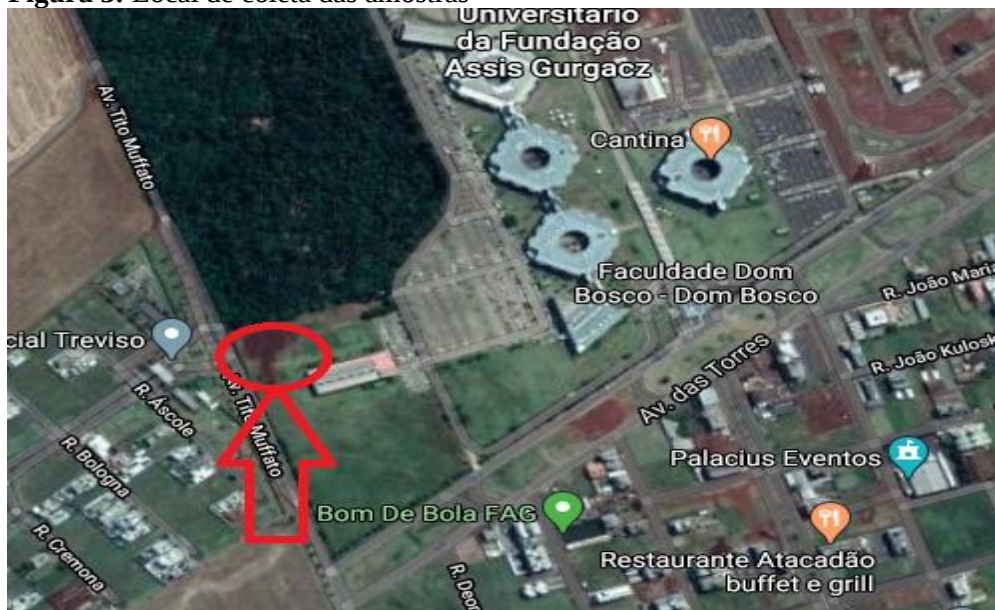
3.1 Tipo de estudo e local da pesquisa

Trata-se de uma pesquisa quantitativa, pois é apresentado resultado numéricos que comprovam a relação entre à influência do tempo de cura e a dosagem da cal sobre a permeabilidade do solo superficial e laterítico de Cascavel-PR, adicionado ao solo nos teores de 2%, 5% e 8%, com tempos de cura de 7 e 28 dias. Para este estudo, foram utilizados corpos de prova compactados na energia de *Proctor* normal e modificada, obedecendo a umidade

ótima de compactação para cada uma delas e seguindo as especificações da ABNR NBR 7182 (2016).

A coleta de dados foi realizada por meio de ensaios de permeabilidade conduzidos no Laboratório de Mecânica dos Solos do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz, respeitando as diretrizes do método B da ABNT NBR 14545 (2000). As amostras de solo foram coletadas no Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEF), localizado conforme a Figura 3.

Figura 3: Local de coleta das amostras



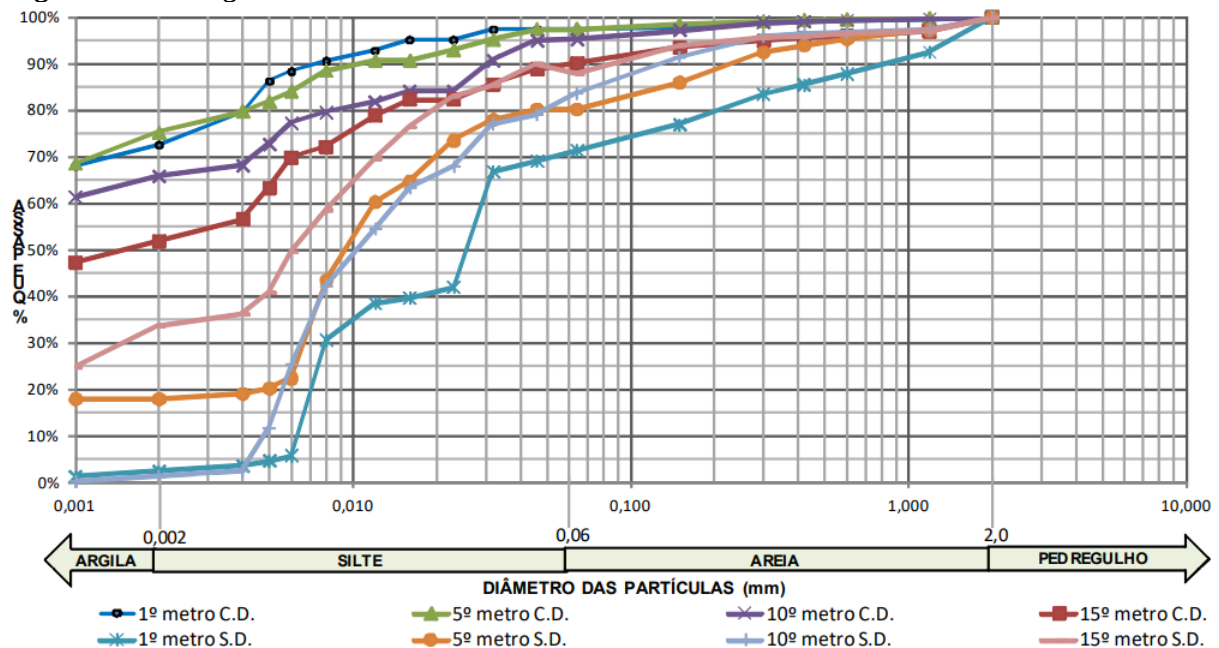
Fonte: Google Maps (2020).

3.2 Caracterização do solo local

Cascavel é um município brasileiro localizado na região Oeste do estado do Paraná, no terceiro Planalto, com altitude média de 781 metros. Sendo, atualmente, o quinto município mais populoso do Estado, com população estimada em 328.454 habitantes (IBGE, 2019), e conta com uma área de 2.101,074 km². O solo de Cascavel é formado a partir do intemperismo do basalto.

Estudos realizados por Zen e Almeida (2018) apresentam as curvas granulométricas ao longo da profundidade para o solo do Campo Experimental de Engenharia da FAG (CEEF), avaliando ainda a influência da floculação das partículas na granulometria, a partir de ensaios conduzidos com (C.D.) e sem (S.D.) o uso de defloculante. A Figura 4 apresenta estas curvas granulométricas.

Figura 4: Curvas granulométricas do solo do CEEF conduzidos C.D. e S.D.



Fonte: Zen e Almeida (2018).

Para o primeiro metro de solo, foi verificado que 70,53% das partículas eram de solos finos (argilas e siltes), portanto, o nome do solo foi determinado como argila siltosa marrom avermelhada, sendo um solo muito poroso e flocculado. Assim, pode-se constatar que o solo de Cascavel-PR é laterítico. Nota-se que há cimentação entre as partículas que o compõem, e que estas são rompidas quando utilizado o defloculante durante o ensaio de sedimentação.

Os autores ainda determinaram os principais índices físicos entre outras características do CEEF, tais índices e características são apresentados na Tabela 1.

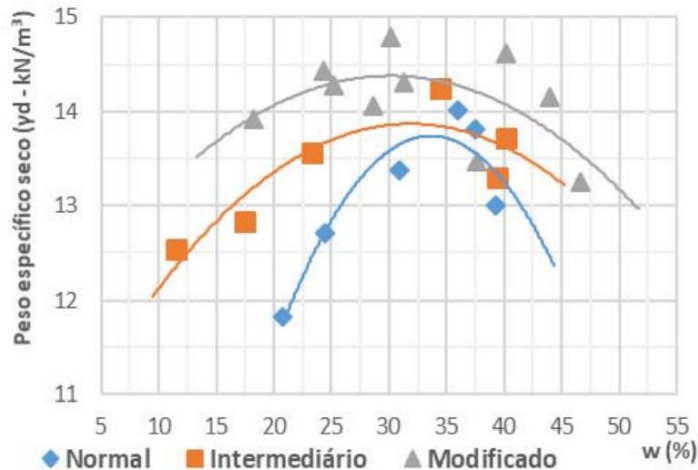
Tabela 1: Valores médios

VALORES MÉDIOS	CAMADA 1 1m a 9m	CAMADA 2 10m a 15m
W (%)	34	53
LL (%)	53	59
LP (%)	38	42
IP (%)	15	17
Peso específico seco (kN/m ²)	12	12
Peso específico dos sólidos (kN/m ²)	27	27
Peso específico saturado (kN/m ²)	17	16
Sr (%)	55	60
Argila (%)	70	56
Silte (%)	25	35
Areia (%)	5	9
Consistência	Muito mole a média	Rija a dura
Índice de Vazios	1,22	1,55

Fonte: Zen e Almeida (2018).

Os teores de umidade ótimos de compactação do solo também foram obtidos por Zen e Almeida (2018), por meio de estudo realizado com amostras de solo laterítico do CEEF, onde foi obtido umidade ótima de 33% para energia Normal e 26% para energia Modificada. As curvas de compactação obtidas por eles para os três níveis de energia são apresentadas na Figura 5.

Figura 5: Curvas de compactação



Fonte: Zen e Almeida (2018).

3.3 Coleta e preparação das amostras

As amostras utilizadas foram do tipo deformada, do solo superficial do 1º e 2º metro de profundidade. Para a realização da escavação, foram utilizados equipamentos simples, como pá e enxada, sendo coletados, aproximadamente, 50 kg de solo para a realização dos ensaios. Após a coleta, foi realizada uma secagem prévia de no mínimo 24 horas, na sequência, a amostra foi levada para o destorroador mecânico, e, por fim, o solo foi passado na peneira 40, conforme ABNT NBR NM-ISO 3310-1 (1997), para que houvesse homogeneização da amostra. A Figura 6 apresenta a preparação da amostra.

Figura 6: Preparação da amostra



Fonte: Autor (2020).

3.3.1 Moldagem dos corpos de provas

A moldagem dos corpos de prova foi realizada por meio do ensaio de *Proctor* regido pela ABNT NBR 7182 (2016), utilizando níveis de energia de compactação normal e modificada. A umidade ótima de compactação utilizada foi a encontrada por Zen e Almeida (2018), sendo 33% para a compactação normal e 26% para a modificada.

Para a realização dos ensaios, foram moldados doze corpos de prova, que levaram em consideração as combinações das condições: dois tempos de cura, três diferentes teores de aditivo e dois diferentes níveis de energia de compactação. Foram moldados quatro corpos de prova por dia, tendo em vista a disponibilidade de apenas dois permeâmetros para a realização dos ensaios e o período de cura necessário.

Para a moldagem dos corpos de provas, o solo já peneirado foi levado à estufa por um período de 24 horas a fim de garantir a umidade ótima de compactação. A cal utilizada foi do tipo CH-III, da marca Votorantim, e a água utilizada foi água de torneira. Na sequência, os materiais foram pesados com auxílio de uma balança de precisão, e a água foi medida em uma proveta, conforme Figura 7.

Figura 7: Materiais dosados



Fonte: Autor (2020).

O aditivo foi então misturado ao solo e a água foi adicionada gradativamente. Com o material completamente homogeneizado, preparou-se o molde cilíndrico, passando óleo mineral nas paredes do cilindro, e foi colocada, em sua base, uma folha de papel filtro para evitar aderência do material compactado à superfície metálica, e iniciou-se o processo de compactação, respeitando as especificações da norma ABNT NBR 7182 (2016) quanto ao número de camadas e quantidade de golpes por camada, sendo utilizado o cilindro pequeno para todos os corpos de prova, soquete pequeno para energia Normal e soquete grande para energia Modificada, conforme demonstrado na Figura 8.

Figura 8: Moldagem do corpo de prova



Fonte: Autor (2020).

Com o auxílio do extrator, o corpo de prova foi extraído do molde cilíndrico e colocado em um saco plástico devidamente identificado, de acordo com a Figura 9, onde permaneceram em processo de cura durante 7 e 28 dias.

Figura 9: Extração e isolados para cura



Fonte: Autor (2020).

A tabela 2 apresenta as especificações de cada corpo de prova moldado.

Tabela 2: Amostras de solo

Aditivo	Energia	Temp o de cura	% Aditivo	Solo (g)	Aditivo (g)	Água (ml)	Camadas	Golpes Por camada
Cal	Normal	7 Dias	2	1500	30	495	3	26
			5	1500	75	495	3	26
			8	1500	120	495	3	26
		28 Dias	2	1500	30	495	3	26
			5	1500	75	495	3	26
			8	1500	120	495	3	26
	Modificada	7 Dias	2	1500	30	390	5	27
			5	1500	75	390	5	27
			8	1500	120	390	5	27
		28 Dias	2	1500	30	390	5	27
			5	1500	75	390	5	27
			8	1500	120	390	5	27

Fonte: Autor (2020).

3.1.3.2. Ensaio de permeabilidade

Para dar início ao ensaio, primeiramente, foi realizada uma regularização da superfície do corpo de prova com o auxílio de uma faca. Na sequência, aferiu-se as medidas utilizando um paquímetro digital, garantindo diâmetro e altura da ordem de 10cm, como exigido por norma, e, por fim, aplicou-se uma fina camada de parafina nas laterais e na borda superior do corpo de prova com o auxílio de um pincel para garantir a integridade física dele durante o ensaio, conforme Figura 10.

Figura 10: Preparação do corpo de prova



Fonte: Autor (2020).

O ensaio de permeabilidade em carga variável é feito com base na NBR NBR 14545 (2000), que determina os procedimentos para determinação do coeficiente de permeabilidade para solos finos, como argilas e siltes.

Para dar início ao procedimento do ensaio, de acordo com método B, a base do Permeâmetro foi preparada colocando na tampa inferior uma tela de arame com malha de abertura 2mm. Sobre ela, foi colocada uma camada de areia grossa com espessura da ordem de 1cm, seguida por uma manta geotêxtil de diâmetro igual ao da câmara, tendo como finalidade a retenção de passagem de finos que pudessem ocasionar problemas durante a percolação de água. Por fim, o corpo de prova foi posicionado no centro da base, a preparação da base é representada na Figura 11.

Figura 11: Preparação da base do Permeâmetro



Fonte: Autor (2020).

Em seguida, foi acoplado o cilindro metálico à base preparada e o corpo de prova foi envolvido com argila plástica. A argila utilizada foi do tipo bentonita, que possui baixa permeabilidade, garantindo que esta não interferisse nos resultados. Ela foi colocada em camadas da ordem de 2cm de altura, compactando os bastões de forma a evitar o aparecimento de caminhos preferenciais entre as paredes do cilindro e do corpo de prova. Em seguida, foi colocada mais uma manta geotêxtil, o restante da altura do cilindro foi preenchido com areia grossa, por fim, o conjunto foi fechado com a tampa superior. Estas etapas são apresentadas na Figura 12.

Figura 12: Aplicação da argila e montagem do Permeâmetro



Fonte: Autor (2020).

Na sequência, o corpo de prova foi saturado por meio de percolação no sentido ascendente, efetuada pelo orifício localizado na tampa inferior. O processo só é satisfatório quando ocorre o surgimento de água no orifício localizado na tampa superior e a percolação se processa sem a presença de bolhas de ar, permanecendo assim por cerca de 24 horas para assegurar a completa saturação do corpo de prova. Este processo é apresentado na Figura 13.

Figura 13: Sistema montado



Fonte: Autor (2020).

O sistema de aplicação e medição de cargas hidráulicas deve ser colocado no orifício localizado na tampa superior. Assim por meio de um cronômetro, iniciou-se a contagem de seis tempos, sendo três tempos de 5 minutos e três tempos de 10 minutos, até o acumulado de 45 minutos, anotando-se, para cada um os tempos decorridos, t_1 e t_2 ; e as respectivas cargas hidráulicas, h_1 e h_2 (em centímetros), medidas a partir da bureta graduada acoplada ao

sistema. Durante toda a realização do ensaio, um termômetro permaneceu imerso em uma proveta com água, anotando-se a temperatura marcada a cada medição.

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade (k), fez-se o uso das informações obtidas no ensaio de permeabilidade, bem como propriedades geométricas do corpo de prova, e então foi calculado utilizando a Equação 2.

$$k = \frac{a.H}{A.\Delta t} \cdot \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right) \quad (2)$$

Em que:

k= é o coeficiente de permeabilidade, expresso de forma exponencial (base 10) com dois algarismos significativos, (cm/s);

Δt = Dado pela diferença entre os instantes t2 e t1, (s);

H1= carga hidráulica no instante t1, (cm);

H2= carga hidráulica no instante t2, (cm);

a= área interna da bureta de vidro, (cm²);

A= área inicial do corpo de prova, (cm²);

H= altura inicial do corpo de prova, (cm)

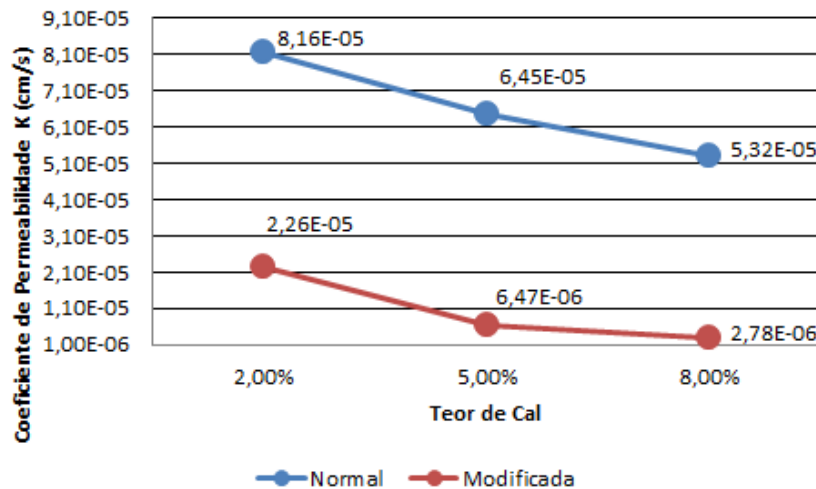
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio dos ensaios realizados em laboratório, foi possível encontrar os coeficientes de permeabilidade do solo analisado, considerando as variações de teores de cal adicionados, as energias de compactação Normal e Modificada aplicadas, e os tempos de cura de 7 e 28 dias. Os resultados obtidos são expressos nos itens 4.1 e 4.2.

4.1 TEMPO DE CURA DE 7 DIAS

Para o tempo de cura de 7 dias, foram encontrados coeficientes de permeabilidade entre 10⁻⁵ e 10⁻⁶, podendo este ser classificado como grau de permeabilidade baixa. Os resultados obtidos são apresentados no Gráfico 1.

Gráfico 1: Resultados obtidos para o tempo de cura de 7 dias



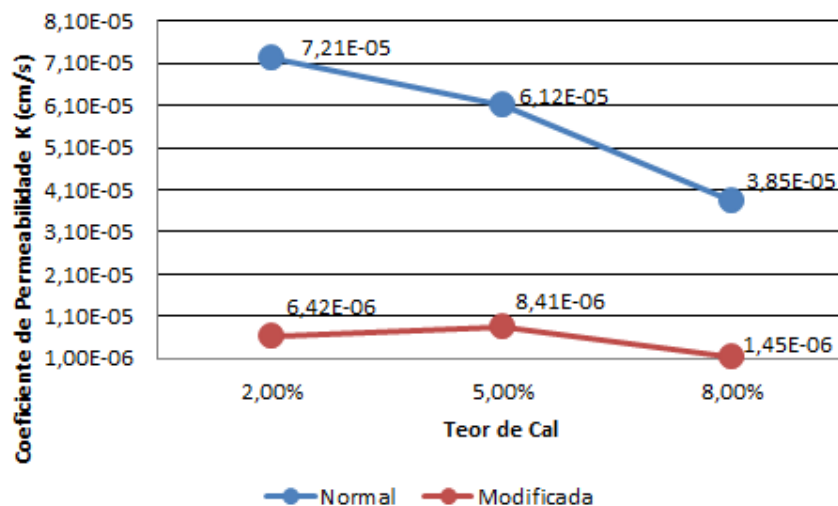
Fonte: Autor (2020).

Ao analisar a Figura 14, observa-se que o coeficiente de permeabilidade decresce com o aumento do teor de cal, com os menores valores na compactação com energia modificada, tendo em vista que esta diminui os vazios entre os grãos do solo, garantindo uma menor permeabilidade.

4.2 TEMPO DE CURA DE 28 DIAS

Para o tempo de cura de 28 dias, foram encontrados coeficientes de permeabilidade entre 10^{-5} e 10^{-6} , que também pode ser classificado como grau de permeabilidade baixa. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 15.

Figura 15: Resultados obtidos para o tempo de cura de 28 dias



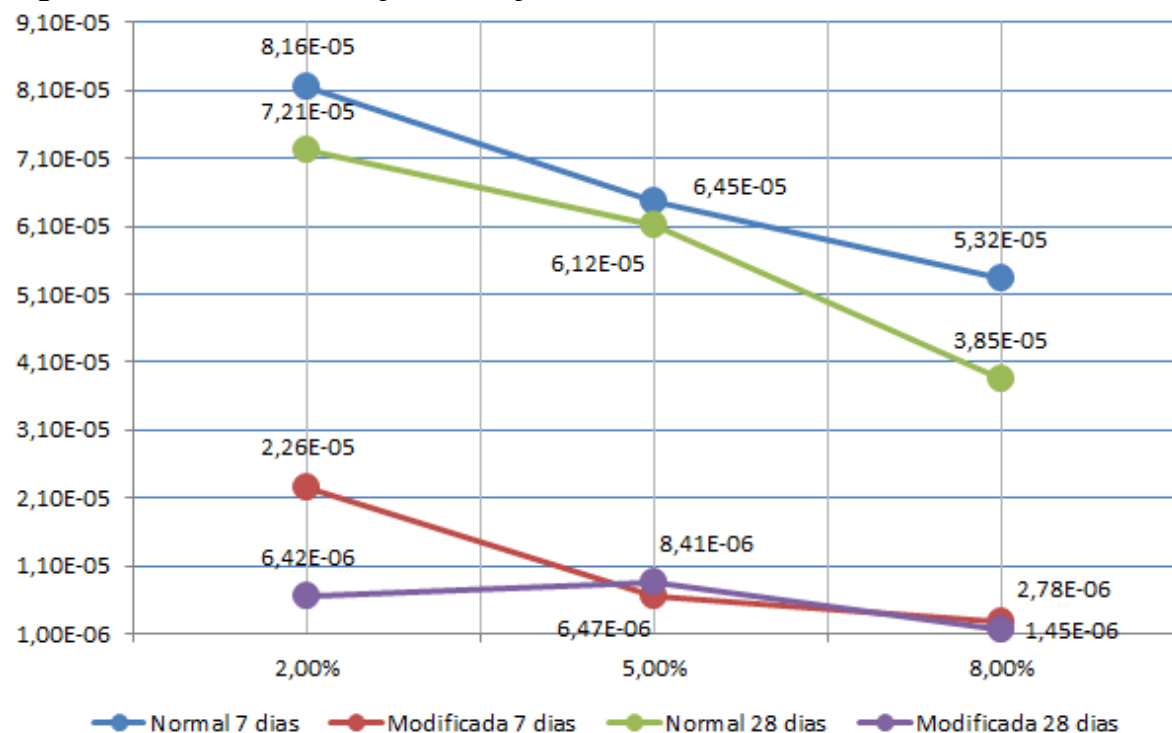
Fonte: Autor (2020).

Observa-se, na Figura 15, que a permeabilidade diminui nos teores mais altos. Porém, a maior influência na permeabilidade vem da energia de compactação, sendo a energia modificada que apresenta os menores valores de k , confirmando, assim, a influência da compactação nas propriedades do solo, devido à redução de vazios entre os grãos. Os valores encontrados são considerados satisfatórios. Apenas o corpo de prova de 5% na energia modificada apresentou uma descontinuidade dos valores, isso pode ter ocorrido devido a falhas na montagem do permeâmetro e aplicação da argila plástica.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS TEMPOS DE CURA

A Figura 16 apresenta todos os resultados obtidos para melhor visualização da influência do tempo de cura da cal na permeabilidade do solo.

Figura 16: Resultados obtidos para os tempos de cura de 7 e 28 dias.



Fonte: Autor (2020).

Ao analisar a Figura 16 é possível observar que as amostras que ficaram em cura por 28 dias apresentam coeficientes de permeabilidade inferiores aos de 7 dias. Nogueira *et al.* (2016) explica que à medida que os grãos de argila do solo reagem com a cal, dá-se início às reações cimentantes, causadas pela interação entre as partículas reativas do solo,

principalmente, a sílica (SiO_2) e a alumina (Al_2O_3), formando compostos cimentantes, que consequentemente reduz o coeficiente de permeabilidade. Campello *et al.* (2000) *apud* Lovato (2004) afirma que as reações pozolânicas são responsáveis pelo contínuo aumento da resistência nas misturas de solo cal, por meio da reação da cal e da água com as fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo, formando agentes cimentantes.

Também se observa que tanto na cura de 7 dias quanto na cura de 28 dias, a maior influência na permeabilidade do solo é a energia de compactação aplicada, onde a energia Modificada apresenta os menores coeficientes de permeabilidade, afirmando que a redução do índice de vazios é de suma importância na redução da condutividade hidráulica do solo.

4.4 COMPARAÇÃO COM ESTUDOS JÁ REALIZADOS

Um estudo realizado por Costa (2018), por meio de ensaios de permeabilidade a carga variável, obteve coeficientes de permeabilidade entre $5,12 \times 10^{-5}$ cm/s e $1,98 \times 10^{-5}$ cm/s para a mistura solo-cimento. Já Silva (2016), a partir de ensaios de infiltração conduzidos em campo, encontrou um coeficiente de permeabilidade médio de $5,25 \times 10^{-5}$ cm/s para a cota -2 m do solo de Cascavel.

Comparando tais resultados aos obtidos pela presente pesquisa, as amostras de mistura solo-cal apresentaram, em geral, uma menor condutividade hidráulica do solo, principalmente, as amostras de 28 dias compactadas com energia modificada, que obtiveram um coeficiente de permeabilidade médio de $5,4 \times 10^{-6}$ cm/s.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização do presente estudo buscou analisar a real influência do tempo de cura na permeabilidade do solo superficial e laterítico da cidade de Cascavel-PR por meio da realização de ensaios de permeabilidade à carga variável, conduzidos no laboratório de Mecânica dos Solos do Centro Universitário Assis Gurgacz.

Para a obtenção dos resultados, foram moldados 12 corpos de prova variando os teores de cal adicionados (2%, 5% e 8%), as duas energias de compactação aplicadas (Normal e Modificada) e os dois tempos de cura (7 e 28 dias), sendo moldados seguindo as especificações da ABNT NBR 7182 (2016). O coeficiente de permeabilidade foi obtido

através do método B do ensaio de permeabilidade de carga variável, regido pela ABNT NBR 14545 (2000).

Os resultados obtidos constataam a influência do tempo de cura na condutividade hidráulica do solo, já que as amostras de solo com 28 dias de cura apresentaram uma redução média de 28% no coeficiente de permeabilidade em relação às amostras com 7 dias de cura. Entretanto, o fator que mais propiciou queda de permeabilidade foi a compactação, em especial, a compactação na energia modificada, pois reduz os vazios entre os grãos do solo, dificultando a passagem da água.

O tempo de cura de 28 dias se mostrou satisfatório na redução do coeficiente de permeabilidade do solo superficial e laterítico de Cascavel-PR, respondendo, assim, a pergunta que originou este trabalho, pois o tempo de cura da cal adicionada ao solo tem sim influência na permeabilidade dele.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. **NBR NM-ISO 3310-01:** Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. **NBR 6457:** Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. **NBR 6502:** Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. **NBR 7182:** Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. **NBR 14545:** Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

AZEVEDO, A. L. C. **Estabilização de solos com adição de cal.** Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal. 2010. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações:** fundamentos. Volume 1. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 1988.

CASAGRANDE, R. L. **Influência da compactação na permeabilidade do solo superficial laterítico de Cascavel/PR, através da infiltração de chorume.** 2017. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel, 2017.

CORTE, M. B. **Misturas solo-cal-fibra: comportamento mecânico à compressão e tração.** 2013. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

COSTA, T. S. **Análise da permeabilidade de solo superficial e laterítico de Cascavel-PR devido ao melhoramento com adição de cal e cimento.** 2018. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel, 2018.

FALKOWSKI, T. J. **Análise da permeabilidade de solo argiloso e poroso, do campo experimental de engenharia da FAG, através de ensaios de carga variável.** 2016. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel, 2016.

LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação.** 2004. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

NOGUEIRA, J. C. A.; SILVA, V. R.; ALMEIDA, T. S.; FEITOSA, A. O.; JÚNIOR, A. S. S. Construções com solo-cal: considerações sobre transferência de tecnologia a uma comunidade na cidade de João Pessoa. João Pessoa. In: **InterScientia**, v. 4, n. 2, 14 out. 2016.

PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 242p.

SOUZA, A. N. S. **Estudo de mistura solo-cal para base de pavimento rodoviário.** 2014. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Brasília, 2014.

SOUZA, A. C. L.; REIS, G. da C. dos. **Aplicação de cal hidratada em suspensão em um solo laterítico para mitigação de processos erosivos.** 2016. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

THOMAS, M. **Avaliação da influência do tempo de cura na estabilização de solos lateríticos com adição de cal e cimento.** 2016. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

ZEN, B. A. B.; ALMEIDA, M. A. Implantação e caracterização geotécnica do campo experimental de engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz em Cascavel/PR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 2018, Salvador. **Anais...** Salvador: Abms, 2018.