

Adição de Cal ao Fosfogesso e Análise do Comportamento Mecânico em Função do Tempo de Cura e Energias de Compactação para Utilização na Pavimentação

Simone Cristina de Jesus

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Brasil, sicjesus22@yahoo.com.br

Luana Caetano Rocha de Andrade

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Brasil, luana.cra@gmail.com

Rejane Nascentes

Universidade Federal de Viçosa, Rio Paranaíba, Brasil, rejanenascentes@yahoo.com.br

Gabriela Ramos Eleutério

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Brasil,

RESUMO: Visando uma possível alternativa para o consumo do resíduo fosfogesso gerado em pelas indústrias de fertilizantes fosfatados na região do município de Uberaba (MG), este trabalho buscou avaliar o comportamento físico e mecânico do fosfogesso com adição de cal hidratada para aplicação em base ou sub-base de pavimentos rodoviários. A caracterização física do fosfogesso e fosfogesso-cal incluiu a determinação da massa específica dos grãos, dos limites de liquidez e limites de plasticidade e da granulometria e a caracterização mecânica do fosfogesso-cal inclui ensaios de compactação nas energias normal, intermediária e modificada e Índice de Suporte Califórnia, com 0 e 7 dias de cura da cal. Os resultados da caracterização física do fosfogesso e fosfogesso-cal não diferiram, apresentando 51% de silte e 49% de areia, massa específica dos grãos de 2,354 g/cm³ e limite de plasticidade indeterminado. A compactação do fosfogesso-cal sem tempo de cura mostrou que o aumento da energia normal para intermediária provocou uma diminuição da massa específica seca máxima e aumento do teor de umidade ótimo, diferentemente do que ocorre em solos. Já na compactação de energia intermediária para a modificada, nenhuma variação significativa ocorreu. Para o tempo de cura de 7 dias, não foi possível definir um perfil do comportamento da mistura, devido à dispersão dos valores. Os resultados do ensaio de CBR para a mistura sem o tempo de cura indicou um valor do CBR de 17% e expansão de 0,02% e que o tempo de cura de 7 dias favoreceu a redução do CBR para 14% sem ocorrência de expansão. Desse modo, as análises indicam que a mistura de fosfogesso-cal não alcançou características físicas e propriedades mecânicas suficientes para base e sub-base. No entanto, esta pode ser empregada como subleito ou reforço de subleito, na indústria da pavimentação, favorecendo o consumo de grande volume de resíduo gerado.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduo, Estabilização, Reaproveitamento, Pavimentação.

1 INTRODUÇÃO

Desde o momento que o homem aprendeu a manipular os materiais para produzir seus equipamentos e utilitários ele também começou

a gerar os chamados de resíduos. Toda atividade humana tem como consequência a geração de resíduos, sejam eles nocivos ou não aos seres humanos e ao meio ambiente.

Vivemos num mundo globalizado e nas

últimas décadas aumentou exponencialmente a velocidade com que o homem obtém e descarta todos os tipos de materiais. Esse consumismo generalizado e desenfreado tem acelerado a geração de resíduos e, é imprescindível que se invista em tecnologias para disposição e reaproveitamento ou reciclagem dos mesmos.

Apesar de no Brasil existirem legislações que preveem um plano de gestão dos resíduos sólidos industriais gerados, a ineficiência do processo de fiscalização e excessiva burocracia envolvida comprometem o cumprimento das leis pelos geradores de tais resíduos. Isso resulta na inadequação da disposição dos resíduos sólidos, sendo o mesmo muitas vezes dispostos de forma errônea e prejudicial ao meio ambiente.

Levando em conta resíduos industriais, o fosfogesso, que é um resíduo gerado pelas indústrias de fertilizantes fosfatados na produção do ácido fosfórico. Este resíduo industrial gera impacto ambiental, devido ao grande volume produzido e à difícil disposição (ARAÚJO, 2013).

Segundo Mazzilli e Saueia (1997), no Brasil o fosfogesso é utilizado na indústria agrícola como corretivo do solo e em indústrias cimenteiras como adição ao clínquer na produção de cimento Portland.

Buscando alternativa para o reaproveitamento do fosfogesso de forma que contribua para reduzir a exploração de recursos naturais e os impactos causados pela sua disposição, esse trabalho tem por objetivo conhecer, através de ensaios laboratoriais, o desempenho mecânico de misturas de fosfogesso-cal para utilização como base ou sub-base de pavimentos rodoviários.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

2.1.1 Fosfogesso

O fosfogesso utilizado é o Sulfato de Cálcio Dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Esse resíduo é gerado na fabricação do fertilizante ácido fosfórico produzido pela indústria Vale Fertilizantes S.A,

localizada no município de Uberaba, MG.

O material foi coletado em seu estado natural, conforme apresentado na Figura 1, acondicionado em sacos de 50 kg e encaminhado ao Laboratório Didático B1 – Mecânica dos Solos e Geologia; Materiais de Construção Civil; e Estruturas e Transporte da Universidade Federal do Triângulo Mineiro para início das análises.



Figura 1. Fosfogesso no momento da coleta.

3.1.2 Cal

Foi utilizada para a pesquisa a cal cálcica hidratada CH-III, comercializada pela Votorantim sob a marca ITAU. O produto é composto de hidróxidos de cálcio e magnésio, sendo de origem dolomítica, que é um mineral básico das rochas sedimentares de origem carbonática.

Segundo o fabricante, o produto em questão atende os requisitos da norma ABNT NBR 7175/1992.

2.1.2 Mistura de fosfogesso-cal

A proporção de cal acrescentada ao fosfogesso teve como objetivo melhorar as características desse resíduo para sua aplicação como base e sub-base de pavimentos. Com base na pesquisa realizada por Oliveira (2005), utilizando o mesmo resíduo, a mistura, de fosfogesso e cal, que apresentou característica favorável para base e sub-base de pavimentos encontrou-se na faixa de 3 a 5% de cal em relação ao total do fosfogesso. Deste modo, com o intuito de verificar o comportamento da mistura em relação à energia de compactação e para

diferentes tempos de cura, utilizou-se uma proporção de 4% de cal em relação à massa de fosfogesso, dentro da faixa considerada ideal por Oliveira (2005).

2.2 Métodos

Para a execução dos ensaios propostos, as atividades foram divididas em duas etapas. A primeira consistiu em realizar os ensaios de caracterização física do resíduo coletado e da mistura de fosfogesso e cal. Já na segunda etapa realizou-se a preparação da mistura de fosfogesso e cal, na proporção escolhida e as recomendações da norma brasileira NBR 6457 (ABNT, 1986).

Em seguida, iniciou-se o processo de compactação sem tempo de cura e com tempo de cura de sete dias, para diferentes energias de compactação.

Os corpos de prova moldados para o ensaio de CBR e consequentemente determinação do Índice de Suporte Califórnia, foram realizados através dos resultados para os teores de umidade ótima obtidos no ensaio de compactação na energia intermediária, uma vez que a NBR 9895 (ABNT, 1987) determina que esta deve ser a energia de compactação para a realização do ensaio de CBR.

2.2.1 Coleta e preparação das amostras

O resíduo foi doado pela empresa geradora e as amostras foram dispostas em quatro sacos de 50 kg de capacidade e encaminhadas ao Laboratório Didático B1 da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM). As amostras foram homogeneizadas a fim de obter a melhor mistura possível das alíquotas do resíduo.

2.2.2 Caracterização Física

Os ensaios de caracterização física foram realizados para determinar a massa específica dos grãos do resíduo, o limite de liquidez, o limite de plasticidade e a granulometria, seguindo os procedimentos descritos pelas normas citadas na Tabela 1.

Tabela 1. Ensaio laboratoriais realizados no resíduo e suas respectivas normas.

Ensaio laboratoriais	
Material	Ensaio e Norma
Fosfogesso	Massa específica EMBRAPA (1997)
	Análise granulométrica EMBRAPA (1997)
	Limite de liquidez NBR 6459 (ABNT, 1984)
	Limite de plasticidade NBR 7180 (ABNT, 1984)
Fosfogesso + cal	Análise granulométrica EMBRAPA (1997)
	Limite de liquidez NBR 6459 (ABNT, 1984)
	Limite de plasticidade NBR 7180 (ABNT, 1984)

2.2.3 Ensaio de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados para a mistura de fosfogesso e cal, em tempos de cura variados (0 dias e 7 dias de cura), conforme as especificações da norma ABNT NBR 7182/1986.

2.2.4 Índice de Suporte Califórnia

O índice de suporte Califórnia determina o quanto de suporte um solo compactado pode aguentar, e este é determinado através do ensaio de CBR.

Foram empregadas as recomendações da norma NBR 9895 (ABNT, 1987), que especifica o procedimento laboratorial para determinar o índice de suporte Califórnia e a expansão de solos, utilizando amostras deformadas, não recusadas, de material que passa na peneira de 19 mm.

O ensaio foi realizado no laboratório da empresa Contempro Engenharia Ltda.

Antes do ensaio de CBR foi necessário separar duas amostras do resíduo acrescido de 4% de cal, compactadas no cilindro de Proctor de volume correspondente a 2000 m³ na energia intermediária e na umidade ótima definida anteriormente nos ensaios de compactação. Das duas amostras separadas, uma foi compactada sem tempo de cura da cal e a outra com um tempo de cura de 7 dias.

A compactação foi realizada no Laboratório Didático B1 da Universidade Federal do

Triângulo Mineiro e seguindo as recomendações da NBR 7182 (ABNT, 1986).

Após a compactação, os corpos de prova foram levados para o laboratório da empresa Contempro Engenharia Ltda, onde foram submetidos à imersão em água durante 96 horas e posteriormente ao rompimento, como previsto na NBR 9895 (ABNT, 1987).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização Física

A massa específica dos grãos foi determinada somente para a amostra de fosfogesso, uma vez que o resultado adquirido foi bastante semelhante à massa específica da cal, informação fornecida pelo fabricante do material. As demais caracterizações foram determinadas tanto para a amostra de fosfogesso e fosfogesso mais cal.

Não houve variações nos resultados da caracterização física da amostra de fosfogesso e fosfogesso mais cal.

3.1.1 Massa Específica dos Grãos

A massa específica dos grãos de fosfogesso obtida foi de $2,354 \text{ g/cm}^3$. Este resultado encontra-se dentro da faixa de valores esperados, uma vez que a Vale Fertilizantes fornece uma ficha de identificação do resíduo produzido por suas fábricas, onde o este valor varia entre $2,300$ e $2,400 \text{ g/cm}^3$.

No entanto, Oliveira (2005) apresentou em seus trabalhos práticos, para o mesmo resíduo, a massa específica dos grãos com valor de $2,526 \text{ g/cm}^3$. Essa divergência de valores foi justificada por Oliveira (2005) pelo fato do fosfogesso conter diversas impurezas e sua composição variar conforme a rocha fosfática utilizada na produção de ácido fosfórico.

3.1.2 Limites de Consistência

O ensaio para limite de liquidez para caracterização física, tanto do resíduo quanto da mistura, foi considerado irrealizável, visto que à medida que a água ia sendo acrescentada ao

fosfogesso, o material adquiria comportamento semelhante aos chamados fluidos não-newtonianos, visto que para fazer a abertura na amostra havia dificuldade de deslizamento do cinzel, provavelmente em função da viscosidade ou atrito interno, que é uma medida de resistência ao fluxo. Sendo assim, o comportamento do sólido e do líquido não contribuiu para concretizar o experimento, como demonstrado na Figura 2. A norma NBR 6459 (ABNT, 1984) declara que, em situações assim, o material deve ser considerado como não apresentando limite de liquidez (NL). O mesmo comportamento ocorreu para o fosfogesso com 4% de cal.



Figura 2. Ensaio de limite de liquidez.

No ensaio do limite de plasticidade ocorreu o mesmo que no ensaio de limite de liquidez, à medida que a água ia sendo acrescentada tanto ao fosfogesso quanto a mistura, estes adquiriram comportamento não-newtoniano. Sendo assim, o material foi considerado como não apresentando limite de plasticidade (NP), como recomenda a norma NBR 7180 (ABNT, 1984).

Embora esse comportamento possa suscitar em explicações através de teorias que requerem conhecimentos avançados, conseguimos ter uma compreensão dos mecanismos envolvidos.

3.1.3 Análise granulométrica

O resultado do ensaio de análise granulométrica para o fosfogesso e para o fosfogesso com 4% de cal não apresentou variação, sendo sua granulometria composta por 51% de silte e 49% de areia.

O fosfogesso é composto, em proporções semelhantes, pela fração silte e areia. A ausência de material fino ($<0,002\text{mm}$), como argila, pode estar relacionada a eficiência do método usado para determinar a granulometria, ou o processo que gera o resíduo não favorece a desintegração da rocha fosfática em tamanhos menores. Para maiores discussões é necessária a aplicação de outros métodos de determinação granulométrica e uma análise mineralógica da fração silte e areia para conhecimento dos minerais existentes.

Oliveira (2005) já havia classificado o mesmo resíduo como pertencente à classe dos siltes.

3.2 Ensaios de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados para a mistura de fosfogesso e cal, em tempos de cura de 0 (zero) e 7 (sete) dias, e energia de compactação normal, intermediária e modificada.

Os resultados da mistura sem tempo de cura, compactada na energia normal indicou massa específica seca máxima de $1,24 \text{ g/cm}^3$ e teor de umidade ótimo de 28,5%. Analisando curvas de compactação para solos apresentada por Caputo et al., (2015), nota-se uma semelhança ao comportamento da curva de compactação de argila siltosa, já que teores de umidades e massa específica seca dessa magnitude estão associados a solos argilosos, que tem a capacidade de reter água por troca iônica. No entanto, a mistura apresentou granulometria de silte arenoso, o que não justificaria o teor de umidade ótimo, a não ser que a cal tenha favorecido alguma reação química.

Diferentemente do esperado, para a compactação da amostra sem tempo de cura na energia intermediária, o aumento da energia de compactação não favoreceu o aumento da massa específica seca máxima e a redução do teor de umidade ótimo. Os valores encontrados foram de $1,135 \text{ g/cm}^3$ e de 39,5%. Mesquita e Rezende (2011) encontraram para a umidade ótima o valor de 44% para a compactação na energia intermediária para o fosfogesso puro, valor próximo ao dessa pesquisa.

A cal deve ter favorecido o processo de

floculação das partículas, o que pode ter contribuindo, também, para aumentar o teor de umidade ótimo e diminuir a massa específica seca máxima.

A curva de compactação na energia modificada não ocorreu variação no valor de massa específica seca máxima e pouca variação no teor de umidade ótimo, em relação à energia intermediária. A massa específica seca máxima foi de $1,135 \text{ g/cm}^3$ e o foi de 42,5%. Isso indica que, mesmo com o aumento da energia aplicada, não é possível aproximar as partículas sólidas.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos nas compactações da mistura fosfogesso e cal, sem tempo de cura, e a Figura 3 o gráfico comparando as 3 curvas obtidas pelas compactações sem tempo de cura nas energias normal, intermediária e modificada.

Tabela 2. Resultados das compactações do fosfogesso-cal sem tempo de cura.

Energia	w (%)	ρ_d (g/cm^3)
Normal	28,5	1,240
Intermediária	39,5	1,135
Modificada	42,5	1,135

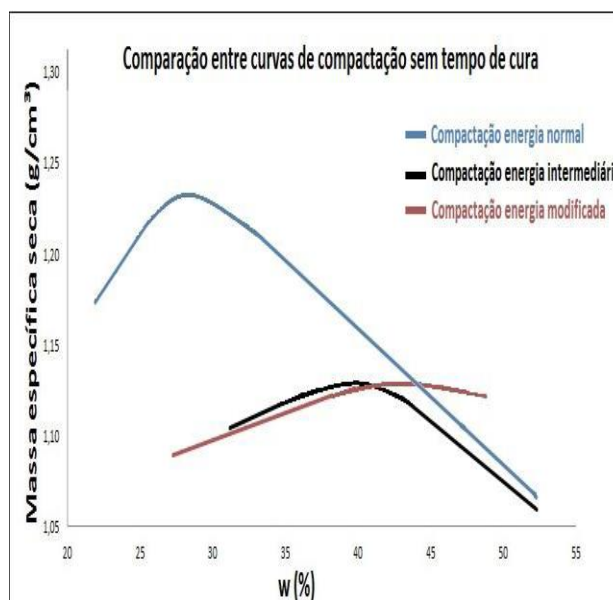


Figura 3. Compactação do fosfogesso-cal sem tempo de cura nas energias normal, intermediária e modificada.

As compactações com tempo de cura de 7 dias mostraram comportamento adverso, não sendo possível traçar as curvas de compactação com os valores obtidos no ensaio.

Apesar dos resultados obtidos para as compactações com tempo de cura de 7 dias apresentarem grande dispersão, não podemos desconsiderá-los, uma vez que a metodologia aplicada foi a mesma para os ensaios de compactação sem tempo de cura e estes alcançaram o comportamento semelhantes a trabalhos anteriores

Os valores obtidos podem ser explicados pelo processo de estabilização que a cal proporciona aos solos. Esse processo pode ser dividido em duas fases: uma fase rápida, que se inicia após poucos minutos a mistura da cal ao solo e dura alguns dias; e a fase lenta, que dura de semanas a anos (OLIVEIRA, 2005). Dessa forma, com o tempo de cura de apenas 7 dias o solo ainda pode estar presenciando a fase rápida do processo, não atingindo uma estabilização com o meio, que findariam com a fase lenta.

Para a melhor compreensão do comportamento de misturas de fosfogesso e cal compactadas com tempo de cura, seria necessário uma análise química, físico-química e mineralógica, bem como, realizar compactações para tempos de cura de 14, 21 e 28 dias, uma vez que após 28 dias os efeitos da estabilização da cal em solos já podem ser considerados como estáveis, de forma a ser presenciada a fase lenta do processo.

Em função do prazo para a apresentação dessa pesquisa, não foi possível realizar a compactação da mistura para outros tempos de cura e nem as análises químicas, físico-químicas e mineralógicas.

3.3 Ensaios de CBR

O ensaio de CBR ofereceu subsídios necessários para realizar o cálculo do CBR para as amostras com misturas de fosfogesso e cal, sem tempo de cura e com tempo de cura de 7 dias, e a expansão ocorrida nos corpos de prova. Para a mistura do resíduo com a cal sem o tempo de cura, o CBR encontrado foi de 17% e com expansão de 0,02%. O gráfico na Figura 4 apresenta a curva do CBR, que relaciona a penetração que o corpo de prova sofre em relação à pressão aplicada pelo pistão no mesmo.

Analisando a Figura 4 percebe-se que a curva

obtida possui comportamento linear, o que explica o valor baixo para o CBR encontrado.

Para a mistura de fosfogesso e cal com tempo de cura de 7 dias o CBR adquirido foi de 14% e no entanto não houve expansão do material. O gráfico do CBR está demonstrado na Figura 5.

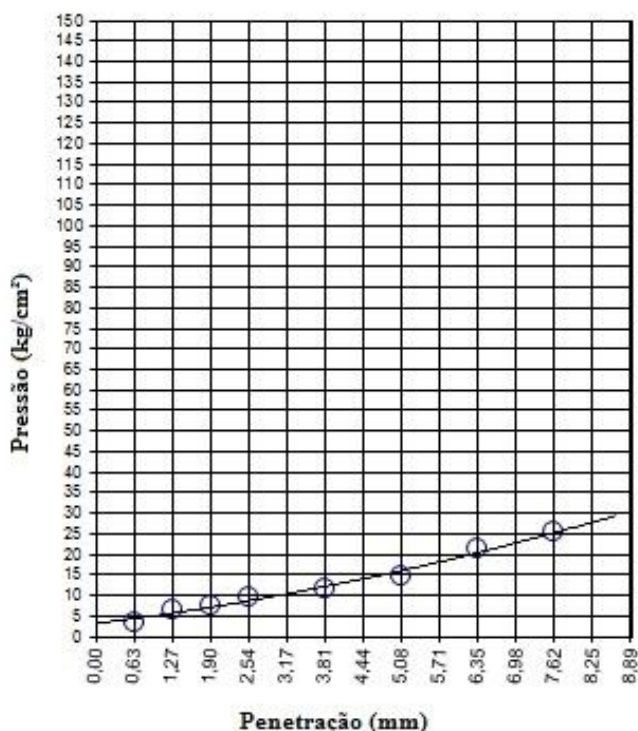


Figura 4. Gráfico do CBR para a mistura sem cura.

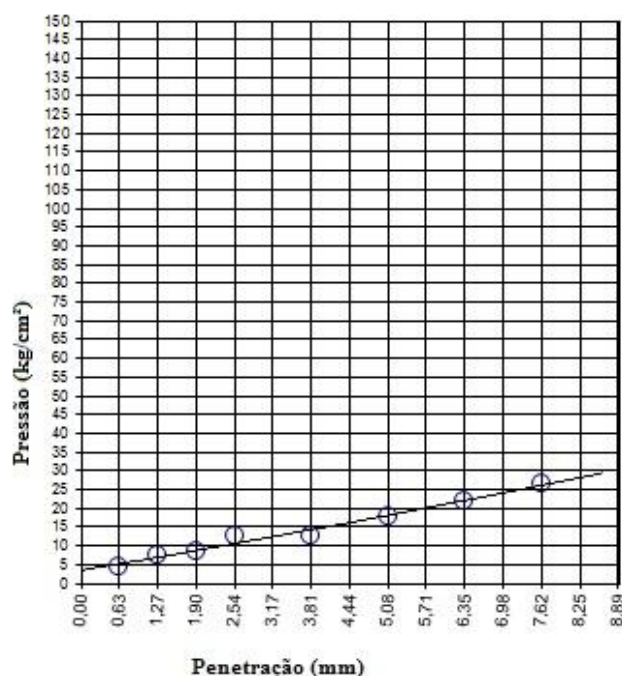


Figura 5. Gráfico do CBR para a mistura com 7 dias de cura.

O gráfico da Figura 5 é bastante semelhante ao fornecido na Figura 4, já que ambos apresentaram comportamento linear e resultado de CBR próximos e baixos.

Nota-se que com o tempo de cura de 7 dias da cal favoreceu a redução da capacidade de suporte do material. No entanto, era esperado que com o maior tempo de contato do fosfogesso com a cal, o CBR aumentasse, devido ao início da fase lenta do processo de estabilização da cal.

Dessa forma, uma análise do ensaio de CBR com maiores variações do tempo de cura da cal poderia melhor representar o comportamento efetivo que o tempo de cura proporcionaria as características mecânicas do material.

Comparando os resultados obtidos com as recomendações do DNIT para os valores de CBR e expansão que cada camada do pavimento deve ter, constata-se que para a mistura de fosfogesso 96% e cal 4%, que poderia desempenhar funções adequadas para subleito ou reforço do subleito, uma vez que para sub-base de pavimentos, o CBR deveria ser superior a 20%.

4 CONCLUSÕES

Com os resultados apresentados nos ensaios laboratoriais realizados neste trabalho, pôde-se constatar que a mistura fosfogesso 96% e cal 4%, tanto sem tempo de cura e com tempo de cura de 7 dias, podem ser utilizadas na construção de pavimentos desde que tenha função de subleito ou reforço do subleito, conforme as recomendações do DNIT (2006).

Dessa forma, a aplicação do fosfogesso em obras de pavimentação, como subleito e reforço de subleito, implicaria em benefícios ao meio ambiente, em função do aproveitamento de grandes volumes de fosfogesso, diminuição na exploração de recursos naturais e no impacto visual e menores áreas impactadas pela sua disposição.

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro, 1986.
- _____. NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.
- _____. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.
- _____. NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.
- _____. NBR 9895: Solos – Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. NBR 10.004: Classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. NBR 10.007: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- ARAÚJO, Ana Paula Borges de; FERNADEZ, André Luís Teixeira. O passivo ambiental do fosfogesso gerado nas indústrias de fertilizantes fosfatados e as possibilidades de aproveitamento. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.9, N.16; p. 29-52, 2013.
- DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2010) *ES 141 - Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço*. Rio de Janeiro, 9p.
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (1997) *Manual de métodos de análise de solo*. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro, 212p.
- MAZZILLI, Barbara; SAUREIA, Cátia Heloisa R. Implicações radiológicas da utilização de fosfogesso como material de construção. Ambiente Construção, São Paulo, v.1, n.2, p. 17-22, jul/dez, 1997.
- MESQUITA, Glaucia Machado; REZENDE, Lilian Ribeiro de. Avaliação Ambiental Da Aplicação De Fosfogesso Em Pavimentação. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2011. 10 p
- OLIVEIRA, Shirley Minnell Ferreira de. Estudo do comportamento mecânico de misturas de fosfogesso e cal para utilização na construção rodoviária. 2005. 210 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.