

## ARTIGO

# AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO NA EXPANSIBILIDADE DAS MISTURAS DE FOSFOGESSO E CIMENTO

**Andréa Regina Kaneko Kobayashi**

**Alexandre Benetti Parreira**

Departamento de Transportes

Escola de Engenharia de São Carlos

Universidade de São Paulo

## RESUMO

Fosfogesso é um resíduo sólido da produção de ácido fosfórico pelas indústrias de fertilizantes. Geram-se cerca de 180 milhões de toneladas deste resíduo por ano no mundo, causando problemas com a sua armazenagem. Este trabalho apresenta um resumo dos resultados de ensaios laboratoriais para avaliar a influência do tipo de cimento Portland na expansibilidade das misturas de fosfogesso e cimento para uso como material de construção de bases e sub-bases de pavimentos. A expansão foi medida em corpos de prova, compostos com diferentes proporções de fosfogesso e cimento, variando-se o tipo de cimento, a energia de compactação e o período de cura. Para todas as misturas investigadas, considerando-se o período de 84 dias de cura, a maior parte da expansão ocorreu nos primeiros 28 dias. Concluiu-se que a influência do tipo de cimento é significativa na expansão destas misturas.

## ABSTRACT

Phosphogypsum is a solid by-product of the manufacture of phosphate fertilizers. The annual worldwide production of this material is approximately 180 million de tons and it causes problems with its disposal. This paper presents a summary of the results obtained from the laboratory testing program to evaluate the

influence of the Portland cement type on the expansion of cement-stabilized phosphogypsum mixtures for use as pavement base and subbase materials. The expansion was measured through specimens composed by different phosphogypsum and cement proportions, varying the cement type, compaction energy and curing period. For all mixtures investigated, most of expansion occurred within the first 28 days in relation to the 84 days of curing. It was concluded that the influence of cement type is significant on the expansion of these mixtures.

## 1. INTRODUÇÃO

O fosfogesso é um resíduo sólido da produção do ácido fosfórico, principal componente dos fertilizantes fosfatados. O ácido fosfórico é obtido através da reação entre a rocha fosfática e o ácido sulfúrico. O fosfogesso contém elementos radioativos e alguns traços de metais pesados em concentrações que poderiam causar um potencial risco à saúde humana e ao meio ambiente.

Aproximadamente 180 milhões de toneladas de fosfogesso são geradas anualmente no mundo (Smadi *et al.*, 1999). No Brasil, apenas a empresa FOSFERTIL, localizada no município de Uberaba/MG, gera 2 milhões de toneladas de fosfogesso anualmente, já possuindo cerca de 25 milhões de toneladas em sua área de depósito (Takeda, 1998). Problemas semelhantes de armazenagem deste material ocorrem na Europa, Canadá, Japão, Índia, Austrália, dentre outras regiões.

O fosfogesso e o gesso têm como componente principal o sulfato de cálcio. Entretanto, o fosfogesso contém impurezas e os métodos para a sua purificação são onerosos, fazendo com que a substituição do gesso natural por fosfogesso se torne, muitas vezes, inviável economicamente. Por isto, a maior parte do fosfogesso é estocada em campo aberto, originando problemas de uso de espaço para sua armazenagem e podendo causar riscos ao meio ambiente através da lixiviação dos metais pesados e elementos radioativos presentes em sua composição. Somente 14% do fosfogesso gerado na produção de fertilizantes é utilizado, tendo suas principais aplicações na agricultura como corretor de pH de solos alcalinos e redutor de

salinidade, na obtenção de ácido sulfúrico e na produção de cimento Portland (Carmichael, 1988).

Grandes volumes de fosfogesso poderiam ser utilizados como material de construção de bases ou sub-bases de pavimentos, surgindo daí a necessidade de se avaliar a sua resistência, deformabilidade e o seu comportamento expansivo para se comprovar a viabilidade técnica desta aplicação. Diversos estudos têm sido desenvolvidos neste sentido, sendo que a maior parte das pesquisas têm sido conduzidas pelo LCPC ("*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*") na França, pelo IRM ("*Institute for Recyclable Materials*") e pelo FIPR ("*Florida Institute of Phosphate Research*"), sendo estes dois últimos institutos localizados nos Estados Unidos. No Brasil, foi analisado o comportamento mecânico das misturas contendo fosfogesso anidro por Maccarini (1991) e Ortiz (1997) e das misturas de fosfogesso di-hidratado e cimento por Takeda (1998).

O fosfogesso tem características de permeabilidade baixa, resistência à compressão simples baixa e pouca durabilidade quando sujeito somente à estabilização mecânica (Gutti *et al.*, 1996). Assim, o fosfogesso necessita também da estabilização química. As misturas de fosfogesso estabilizadas com cimento Portland têm sido objeto de estudo de diversos pesquisadores, uma vez que estas misturas demonstram resultados satisfatórios em termos de ganho de resistência e estabilidade frente à ação da água. Segundo Tittlebaum *et al.* (1995), o fosfogesso estabilizado com cimento forma uma laje monolítica contendo compostos insolúveis que ajudam a reter os metais pesados dentro da mistura, que poderiam contaminar o lençol freático.

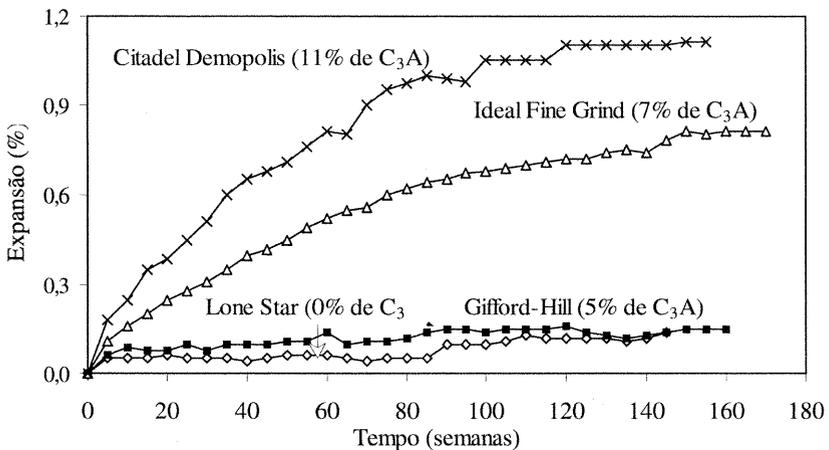
Em misturas de fosfogesso e cimento, a reação química entre o aluminato tricálcico ( $C_3A$ :  $3CaO \cdot Al_2O_3$ ) contido no cimento e os íons de sulfato presentes no fosfogesso é denominada ataque por sulfatos e tem como resultado a formação de cristais de etringita. A etringita poderia causar aumento de volume que conduziria à perda de resistência e ruptura das misturas contendo cimento (Taha e Seals, 1991; Ouyang *et al.*, 1988). Em alguns estudos sobre concreto, concluiu-se que o  $C_3A$  não é o único composto do cimento responsável pela expansão das misturas contendo cimento, podendo

outros compostos e componentes deste material, tais como o silicato tricálcico, o ferro-aluminato tetracálcico, a cal livre e o óxido de magnésio, cumprirem este papel (Odler e Colán-Subauste, 1999; González e Irassar, 1997).

Na Figura 1, apresentam-se os resultados de expansão das misturas de fosfogesso e diferentes tipos de cimento investigadas por Taha e Seals (1991). O teor de  $C_3A$  varia conforme o tipo de cimento. Consta-se que, à medida em que se aumenta o teor de  $C_3A$ , obtêm-se maiores expansões no decorrer do tempo de cura.

## 2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência do tipo de cimento Portland na expansibilidade das misturas de fosfogesso estabilizado com cimento para uso como material de base e sub-base de pavimentos.



**Figura 1:** Expansão das misturas de fosfogesso e cimento para diferentes teores de aluminato tricálcico (Taha e Seals, 1991)

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram: fosfogesso, cimento Portland e solo.

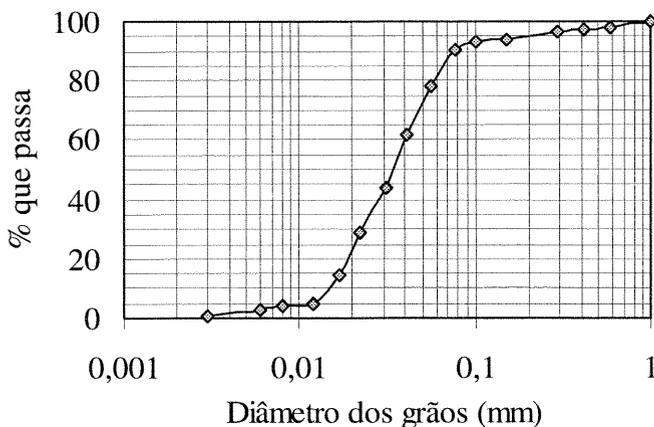
O fosfogesso é do tipo di-hidratado e foi coletado na empresa FOSFERTIL, localizada em Uberaba/MG. O fosfogesso foi submetido aos ensaios de caracterização para a determinação da granulometria, da massa específica dos sólidos e dos limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) na sua forma di-hidratada, conforme normas específicas para solos. O pH deste material também foi medido.

Na Figura 2, observa-se que o fosfogesso apresenta características granulométricas semelhantes ao silte, com 90% de partículas passando na peneira n. 200. Na determinação da massa específica dos sólidos obteve-se o valor de 2,262 g/cm<sup>3</sup>. O pH foi 4,25. Não foi possível a determinação do LL, pois a pasta de fosfogesso não apresentou a trabalhabilidade necessária para a realização do ensaio. Não se obteve êxito também na moldagem dos bastonetes para se determinar o LP, levando a classificar o material como não-plástico.

Os resultados de caracterização do fosfogesso em questão assemelham-se aos resultados encontrados na bibliografia pesquisada (Taha e Seals, 1991; Taha *et al.*, 1995; Takeda, 1998).

A escolha dos cimentos utilizados neste estudo teve como critério o teor de C<sub>3</sub>A presente em suas composições. Após o levantamento de alguns cimentos disponíveis no mercado brasileiro, escolheram-se quatro tipos de cimento, conforme os teores de C<sub>3</sub>A fornecidos pelos fabricantes: o CP III-40 (2,4% de C<sub>3</sub>A), o CP II-E32 (5,0% de C<sub>3</sub>A), o CP V-ARI-RS (5,7% de C<sub>3</sub>A) e o CP V-ARI (7,5% de C<sub>3</sub>A).

Neste trabalho, para conferir os teores de C<sub>3</sub>A fornecidos pelos fabricantes, foi utilizada a técnica de difração raio-X (XRD) de amostras dos quatros tipos de cimentos na forma em que são comercializados. A ordem determinada através deste método confirma a ordem estabelecida a partir dos dados dos fabricantes, ou seja: CP III-40, CP II-E32, CP V-ARI-RS e CP V-ARI, considerando-se valores crescentes de aluminato tricálcico.



**Figura 2:** Distribuição granulométrica do fosfogesso

Para a composição das misturas, o fosfogesso foi misturado com 5%, 10% e 15 % de cada tipo de cimento, em relação à massa seca de fosfogesso, levando-se em conta a umidade higroscópica dos dois materiais.

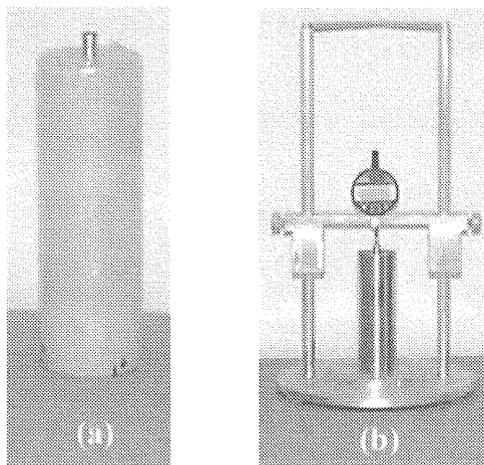
Preliminarmente, realizaram-se ensaios de compactação das misturas de fosfogesso e cimento, em duas energias: normal e modificada. Em cada nível de energia, obtiveram-se a massa específica seca máxima ( $\rho_{dm\acute{a}x}$ ) e o teor ótimo de umidade ( $w_o$ ). Em seguida, procedeu-se a moldagem dos corpos de prova para a medida da expansão, através de compactação estática, em 5 camadas, nas condições de  $\rho_{dm\acute{a}x}$  e  $w_o$  determinadas na etapa anterior. Estes corpos de prova foram confeccionados com as dimensões de 5 cm de diâmetro e 15 cm de altura, envolvidos por filme plástico e devidamente identificados. Moldaram-se quatro corpos de prova para representar cada uma das condições em que foram analisadas as misturas.

Para garantir a precisão das medidas de expansão e manter a integridade dos corpos de prova durante a sua manipulação, fixou-se uma chapa circular dotada de um pino de medida saliente (pino liso) e outro de ancoragem (com ranhuras), embutido, no topo do corpo de prova (vide Figura 3a). O pino de medida foi utilizado como

referência fixa para as leituras de expansão, sendo que o pino de ancoragem impedia o desprendimento da chapa ou o seu deslocamento em relação ao corpo de prova. Para também proteger a base do corpo de prova, fixou-se uma chapa circular dotada apenas de um pino de ancoragem na sua extremidade inferior. O eixo dos pinos foi posicionado de modo a coincidi-lo com o eixo longitudinal do corpo de prova.

A cura dos corpos de prova foi feita em câmara úmida, com aproximadamente 100% de umidade relativa. A altura dos corpos de prova foi registrada após a moldagem e decorridos 3, 7, 17, 23, 28, 42, 56, 70 e 84 dias de cura, sem imersão em água. Para efeito de continuidade desta pesquisa, estes mesmos corpos de prova terão suas alturas também registradas após 112, 140, 168, 196 e 210 dias de cura.

A expansão foi medida pela variação da altura do corpo de prova através do comparador, utilizando-se como padrão de referência um cilindro de 5 cm de diâmetro e 15,9 cm de altura, confeccionado em aço (vide Figura 3b).



**Figura 3:** (a) Corpo de prova, (b) Comparador e cilindro de referência

Para comparar o comportamento expansivo das misturas de fosfogesso e cimento com o de um material já conhecido na

construção de pavimentos, moldaram-se também corpos de prova de solo-cimento nas condições de  $\rho_{d\max}$  e  $w_o$ , definidas a partir do ensaio de compactação na energia normal. O solo para a composição desta mistura foi escolhido pelo fato de ser predominantemente fino (83% de material passando na peneira n. 200), além de ter sido coletado na região próxima à realização dos ensaios (estrada SP-333 – km 320 + 150 m – margem esquerda). A massa específica dos sólidos para este material é de 3,222 g/cm<sup>3</sup>. Os limites de liquidez e de plasticidade deste solo são, 42% e 32%, respectivamente.

A microscopia eletrônica por varredura (MEV) foi usada para identificar morfológicamente as partículas de fosfogesso e os cristais de etringita nas misturas de fosfogesso e cimento. Para esta análise, foram considerados três tipos de cimento: CP II-E32, CP III-40 e CP V-ARI. Misturas de fosfogesso com 10% de cimento foram compactadas especificamente para a MEV e, obtiveram-se microfotografias após os períodos de cura de 3, 7, 28 e 84 dias. Compactaram-se também misturas de fosfogesso com 5%, 10% e 15% de cimento nas energias normal e modificada, para se realizar a MEV depois de decorridos 84 dias de cura. Observou-se que para uma boa visualização das partículas de fosfogesso, é necessário aumento de 500 a 1000X, enquanto que para os cristais de etringita, necessita-se aumento de 4000 a 10000 X.

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1. Relação $w_o - \rho_{d\max}$

A Tabela 1 apresenta o resumo dos valores de  $w_o$  e  $\rho_{d\max}$ , obtidos para as misturas de fosfogesso e diferentes tipos e porcentagens de cimento, segundo as energias de compactação usadas neste estudo. Verifica-se que os valores de massa específica seca máxima das misturas de fosfogesso e cimento compactadas na energia modificada são, em média, 16% maiores que os obtidos na energia normal, enquanto os valores de teor ótimo de umidade destas misturas na energia modificada são, em média, 28% menores que os obtidos na energia normal.

Para a mistura de solo estabilizado com 10% de CP II-E32, compactada na energia normal, obtiveram-se os seguintes valores:  $w_o = 27\%$  e  $\rho_{dmax} = 1,495 \text{ g/cm}^3$ . Comparando-se estes valores com os obtidos para as misturas de fosfogesso e cimento na energia normal, observa-se que os teores ótimos de umidade apresentam valores muito próximos, enquanto que a massa específica seca máxima do solo-cimento é 26% maior que a das misturas contendo fosfogesso.

**Tabela 1:** Valores de teor ótimo de umidade( $w_o$ ) e massa específica seca máxima ( $\rho_{dmax}$ ) obtidos para misturas de fosfogesso e cimento, nas energias normal e modificada

Energia	Normal			Modificada		
Teor de cimento	5%	10%	15%	5%	10%	15%
Tipo de cimento	CP II-E32					
$w_o$ (%)	26,1	27,5	27,0	18,5	17,7	16,9
$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,160	1,183	1,180	1,345	1,366	1,375
Tipo de cimento	CP III-40					
$w_o$ (%)	27,9	28,0	28,3	20,3	19,1	18,9
$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,144	1,187	1,186	1,339	1,354	1,353
Tipo de cimento	CP V-ARI					
$w_o$ (%)	26,2	27,5	26,5	17,7	17,3	17,2
$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,168	1,177	1,193	1,347	1,367	1,379
Tipo de cimento	CP V-ARI-RS					
$w_o$ (%)	27,3	27,2	27,7	18,8	16,8	18,7
$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,136	1,167	1,182	1,330	1,354	1,377

## 4.2. Análise do comportamento expansivo das misturas de fosfogesso e cimento

Nas Figuras 4 e 5, são mostradas as curvas de expansão das misturas de fosfogesso e diferentes tipos de cimento em função do teor de cimento e do tempo de cura, nas energias normal e modificada, respectivamente.

### 4.2.1. Influência do teor de cimento

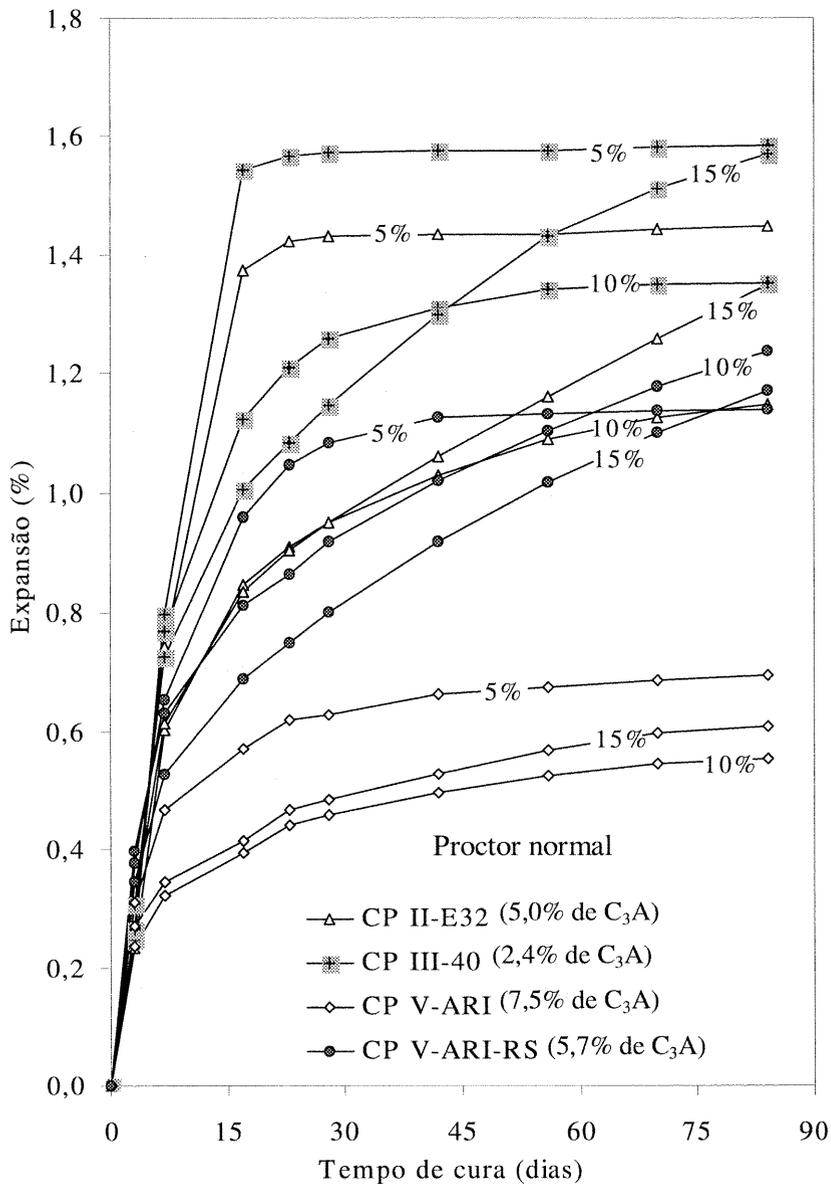
Ao se analisar as Figuras 4 e 5, observa-se que a expansão de misturas com 5% de cimento é expressivamente maior que as de 10%

e 15% de cimento até o período de 28 dias de cura. Neste período inicial, as expansões das misturas com 10% e 15% de cimento são muito parecidas. Após o período de 28 dias, as misturas com 5% de cimento têm as suas expansões praticamente estabilizadas e as outras (10% e 15%) continuam a apresentar expansões crescentes. Para os cimentos CP II-E32, CP III-40 e CP V-ARI, as misturas com 10% de cimento mostram uma tendência de estabilização que se confirma aos 84 dias. A exceção é a mistura com 10% de CP V-ARI-RS que aos 84 dias ainda continua apresentando uma nítida tendência de crescimento da expansão. Aos 84 dias de cura, com exceção do cimento CP V-ARI, todas as outras misturas com 15% de cimento ainda apresentam uma tendência marcante de crescimento da expansão, de modo que, após este período, espera-se que a expansão destas misturas ultrapasse a das misturas contendo 5% de cimento.

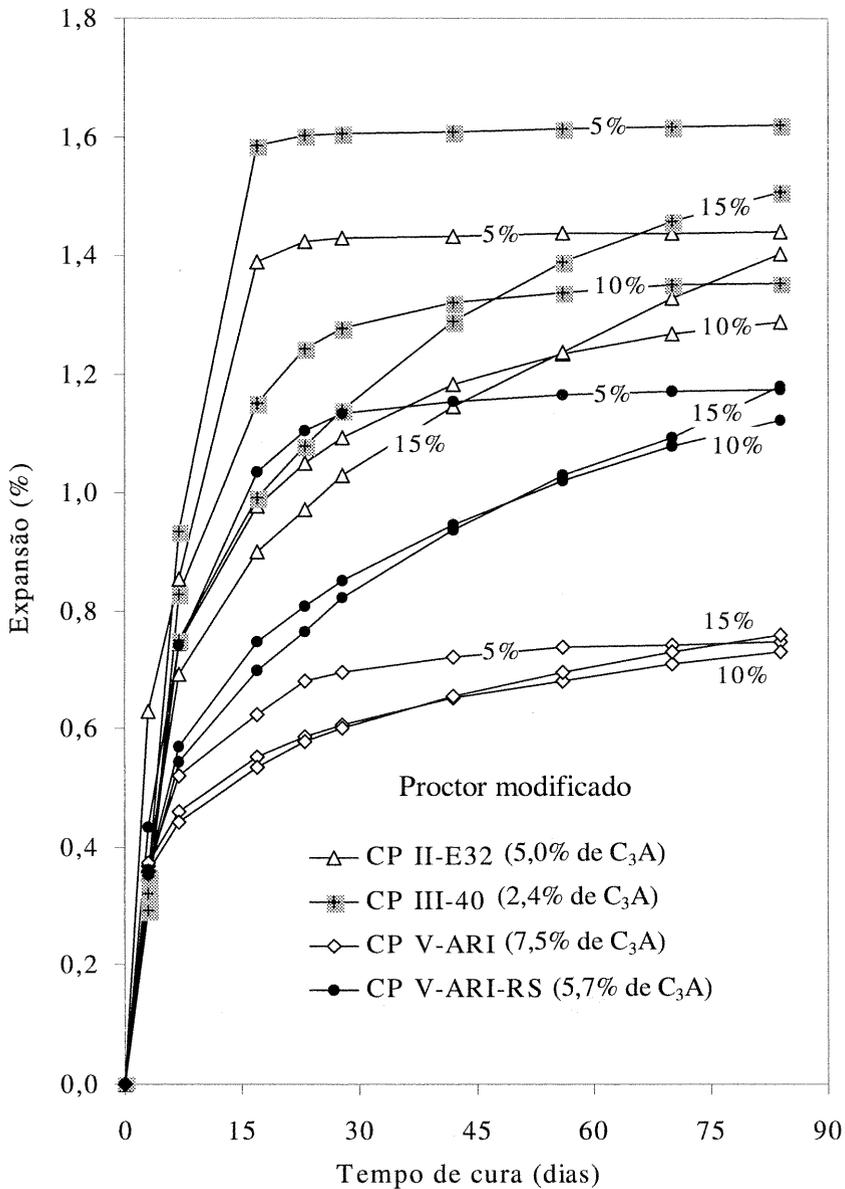
Segundo Ouyang et al.(1988) o aumento no teor de cimento nas misturas de fosfogesso e cimento resulta em acréscimo de expansão, desde o início do período de cura, ao contrário do que foi observado nas misturas investigadas neste estudo durante os 50 dias iniciais de cura.

#### 4.2.2. *Influência da energia de compactação*

Ao se analisar as Figuras 4 e 5, verifica-se ser muito pequena a influência da energia de compactação na expansão das misturas de fosfogesso e cimento, apesar dos ensaios de compactação nas energias normal e modificada conduzirem a valores significativamente diversos de massa específica seca máxima e teor ótimo de umidade.



**Figura 4:** Expansão das misturas de fosfogesso e cimento compactadas na energia normal



**Figura 5:** Expansão das misturas de fosfogesso e cimento compactadas na energia modificada

As misturas de fosfogesso e 5% de CP II-E32 tiveram coincidência nas curvas de expansão ao se considerar as duas energias de compactação, fato também observado para as misturas com 10% de CP III-40 e com 15% de CP V-ARI-RS. Para as demais misturas, constata-se que os valores de expansão na energia modificada são ligeiramente maiores do que os observados na energia normal. Entretanto, houve duas exceções: (a) os valores de expansão da mistura com 15% de CP III-40 nas duas energias de compactação coincidiram até aos 42 dias de cura e depois, para a energia normal, tornaram-se ligeiramente maiores que para a energia modificada; (b) a mistura com 10% de CP V-ARI-RS apresentou, sistematicamente, maior expansão para a energia normal do que para a energia modificada.

#### 4.2.3. *Influência do tempo de cura*

Para todas as misturas de fosfogesso e cimento, considerando-se o período de 84 dias de cura, a maior parte da expansão ocorreu nos primeiros 28 dias (vide Figuras 4 e 5), assim como foi observado no estudo de Gutti et al. (1996). O ataque por sulfatos poderia ser responsável pelo comportamento expansivo, pois a quantidade de íons de sulfato diminui com o processo de reação química, e o ataque tende a diminuir com a idade da mistura, acarretando no decréscimo da taxa de crescimento da expansão.

Observa-se ainda que, no período inicial de cura, baixos teores de cimento conduziram às maiores expansões. Após este período, à medida em que se aumenta o teor de cimento, obtém-se as maiores taxas de crescimento da expansão. Este fato seria explicado tendo-se em vista que o cimento é responsável por 2 processos opostos que acontecem simultaneamente: uma ação aglutinante e uma ação expansiva. No início do período de cura, o crescimento da ação aglutinante é muito rápido, sobrepondo-se à ação expansiva, que aconteceria mais lentamente. Assim, constata-se as menores expansões para teores mais elevados de cimento. Com o decorrer do período de cura, já alcançado o máximo efeito da ação aglutinante, enquanto o efeito expansivo ainda se apresenta ativo, chega-se à situação em que as misturas com maiores quantidades de cimento

disponível para as reações químicas expansivas com o fosfogesso passam a apresentar as maiores expansões.

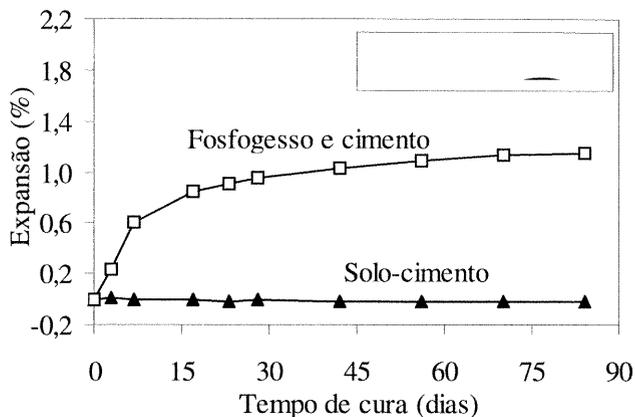
#### 4.2.4. *Influência do tipo de cimento*

Analisando-se as Figuras 4 e 5, constata-se que para o CP III-40 (2,4% de  $C_3A$ ) e o CP V-ARI (7,5% de  $C_3A$ ) as misturas apresentaram, respectivamente, os maiores e os menores valores de expansão. Verifica-se que para os cimentos CP V-ARI-RS (5,7% de  $C_3A$ ) e CP II-E32 (5% de  $C_3A$ ) as misturas apresentaram valores de expansão intermediários aos obtidos para o CP III-40 e o CP V-ARI.

Na revisão bibliográfica, os resultados de pesquisas realizadas com misturas de fosfogesso e cimento para a aplicação rodoviária indicam que ao se aumentar a quantidade de  $C_3A$  contido no cimento, obtêm-se valores crescentes de expansão (Ouyang *et al.*, 1988; Taha e Seals, 1991). Ao contrário disto, os resultados desta pesquisa indicam que teores mais baixos de  $C_3A$  conduzem a maiores valores de expansão. Este fato poderia ser explicado através dos resultados de estudos recentes (González e Irassar, 1997; Odler & Colán-Subauste, 1999) sobre mecanismos de expansão do concreto, pelos quais concluiu-se que não apenas o  $C_3A$  contribui para a expansão das misturas contendo cimento, mas também a outros compostos do cimento, como o ferro-aluminato tetracálcico e o silicato tricálcico. Assim, supõe-se que para os cimentos analisados, a contribuição do  $C_3A$  não tenha tido preponderância frente à ação expansiva dos referidos compostos.

#### 4.2.5. *Comparação com a expansão do solo-cimento*

Na Figura 6, ilustram-se as curvas de expansão de misturas de fosfogesso e cimento e de solo-cimento. Ambas as misturas foram compactadas na energia normal e estabilizadas com 10% de CP II-E32. Verifica-se nenhuma expansão dos corpos de prova de solo-cimento ao longo do período de cura, enquanto que a mistura de fosfogesso e cimento expandiu de forma continuada e com alta taxa de crescimento de expansão que se reduz no decorrer do tempo de cura.



**Figura 6:** Curvas de expansão das misturas de fosfogesso e cimento e de solo-cimento

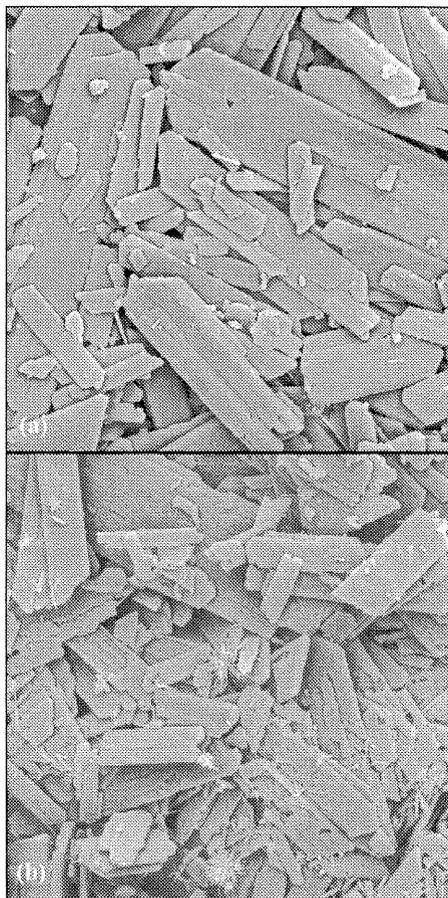
#### 4.3. Análise das microfotografias

As partículas de fosfogesso encontram-se ilustradas na Figura 7a. Através das microfotografias obtidas pela MEV, observa-se que as partículas do fosfogesso usado nesta pesquisa são tabulares e de tamanho variando entre 10 a 100  $\mu\text{m}$  de comprimento, assim como foi observado por Taha e Seals (1991).

Cristais resultantes da reação entre fosfogesso, cimento e água podem apresentar a mesma morfologia da etringita e suas composições químicas serem diferentes. Entretanto, pela semelhança entre a morfologia dos cristais observados nas microfotografias deste estudo e a da etringita verificada na revisão bibliográfica, supõe-se que os cristais aciculares sejam etringita. Não foi possível relacionar a variação da forma, do tamanho e da quantidade de etringita com o tipo e teor de cimento, a energia de compactação ou o tempo de cura.

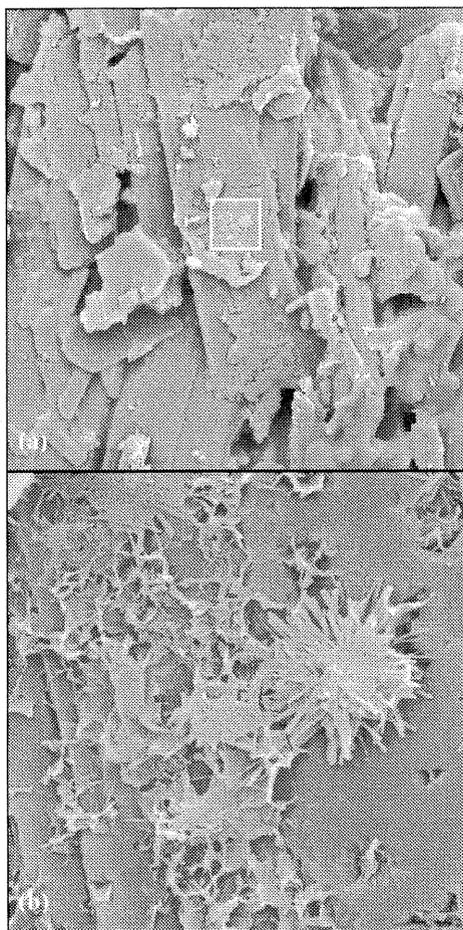
As Figuras 7b e 8 mostram os cristais provenientes da reação entre fosfogesso e cimento e o comportamento da integridade das partículas de fosfogesso ao longo do tempo de cura. Na Figura 7b, ilustram-se cristais aciculares presentes aos 7 dias de cura na mistura de fosfogesso e 10% de CP III-40, compactada na energia normal.

Observa-se que estas agulhas de cristal se encontram espalhadas aleatoriamente ao redor das partículas de fosfogesso ou agrupadas em formas de esferas com agulhas se projetando radialmente, com tamanho variando entre 5 a 10  $\mu\text{m}$  de comprimento. As microfotografias da Figura 8 ilustram a dissolução das partículas de fosfogesso e, no detalhe, o crescimento de cristais aciculares na superfície destas partículas, em mistura de fosfogesso e 10% de CP II-E32 aos 84 dias de cura, compactada na energia modificada.



**Figura 7:** (a) Partículas tabulares de fosfogesso – aumento de 500X (b) Mistura de fosfogesso e 10% de CP III-40, compactada na energia normal, aos 7 dias de cura – aumento de 500X

Ao se analisarem as microfotografias obtidas nesta pesquisa, constata-se uma crescente dissolução das partículas de fosfogesso em misturas de fosfogesso e cimento com o decorrer do tempo de cura, assim como foi observado por Gutti *et al.* (1996).



**Figura 8:** Dissolução das partículas de fosfogesso em mistura de fosfogesso e 10% de CP II-E32, compactada na energia modificada, aos 84 dias de cura (a) aumento de 500X (b) detalhe com *zoom* de 10X

## 5. CONCLUSÕES

Para todas as misturas de fosfogesso e cimento, considerando-se o período de 84 dias de cura, a maior parte da expansão ocorreu nos primeiros 28 dias. Durante o primeiro mês de cura, as misturas com altos teores de cimento conduziram às menores expansões. Em seguida, as misturas com 5% de cimento tiveram as suas expansões estabilizadas e as outras (10% e 15%) continuaram a apresentar expansões crescentes. Aos 84 dias de cura, as misturas com 15% de cimento ainda apresentam uma tendência marcante de crescimento da expansão, de modo que, após este período, as expansões destas misturas poderão ultrapassar as das misturas contendo 5% de cimento. Constatou-se pouca influência da energia de compactação no comportamento expansivo das misturas investigadas.

Através da análise das microfotografias, observou-se uma crescente dissolução das partículas de fosfogesso em misturas de fosfogesso e cimento com o decorrer do tempo de cura. Entretanto, não foi possível relacionar a variação da forma, do tamanho e da quantidade de etringita com o tipo e teor de cimento, a energia de compactação ou o tempo de cura.

O tipo de cimento está diretamente relacionado com a sua composição química e tem influência significativa na expansibilidade das misturas de fosfogesso e cimento. Diferentes tipos de cimento conduzem a variados níveis de expansão, visto que os resultados experimentais indicam que ao se aumentar a quantidade de aluminato tricálcico presente no cimento, obtém-se menores expansões, fato que contraria a expectativa inicial da pesquisa.

## AGRADECIMENTOS

À FAPESP e ao CNPq pelo apoio financeiro dispensado para a realização desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carmichael, J. B. (1988) Worldwide production and utilization of phosphogypsum. *Proceedings of the Second International Symposium on Phosphogypsum*, v. 1, Florida Institute of Phosphate Research, Miami, Florida, p. 105-110.
- González, M. A. e E. F. Irassar (1997) Ettringite formation in low C<sub>3</sub>A Portland cement exposed to sodium sulfate solution. *Cement and Concrete Research*, v. 27, n. 7, p. 1072-1072.
- Gutti, C. S.; A. Roy; J. B. Metcalf e R. K. Seals (1996) The Influence of Admixtures on the Strength and Linear Expansion of Cement-stabilized Phosphogypsum. *Cement and Concrete Research*, v. 26, n. 7, p. 1083-1094.
- Maccarini, M. (1991) Propriedades física, química e mecânica do fosfogesso da indústria carboquímica catarinense. *Simpósio sobre barragens de rejeitos e disposição de resíduos*, Rio de Janeiro, p. 147-157.
- Odler, I. e J. Colán-Subauste (1999) Investigations on cement expansion associated with ettringite formation. *Cement and Concrete Research*, v. 29, p. 731-735.
- Ortiz, J. A. (1997) *Estudo de Misturas de Solo e Fosfogesso com a sua Utilização em Rodovias*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 179 p.
- Ouyang, C.; A. Nanni e W. F. Chang (1988) Durability of Portland Cement Mortar Containing Phosphogypsum. *Proceedings of the Second International Symposium on Phosphogypsum*, v. 2, Florida Institute of Phosphate Research, Bartow, Florida, p. 239-253.
- Smadi, M. M.; R. H. Haddad e A. M. Akour (1999) Potential use of phosphogypsum in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 29, p. 1419-1425.
- Taha, R. e R. K. Seals (1991) *Expansion Test Specimens – Results and Recommendations*. Report 1-91-4D. Institute for Recyclable Materials, College of Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge.
- Taha, R.; R. K. Seals; M. Tittlebaum e D. Saylak (1995) Environmental Characteristics of By-product Gypsum. *Transportation Research Record*, 1486, p. 21-26.

- Takeda, M. C. (1998) *Avaliação das Propriedades Mecânicas de Misturas de Fosfogesso e Cimento para Uso na Construção Rodoviária*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 164 p.
- Tittlebaum, M. E.; H. Thimmegowda; R. K. Seals e S. C. Jones (1995) Leachate generation from raw and cement stabilized phosphogypsum. *Transportation Research Record*, n. 1486, p. 27-34.

**Endereço dos autores:**

Andréa Regina Kaneko Kobayashi  
Alexandre Benetti Parreira  
Departamento de Transportes  
Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo  
Av. Trabalhador São-carlense, 400  
Cep 13.566-590 – São Carlos/SP  
E-mail: arkaneko@sc.usp.br  
parreira@usp.br