



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**  
**UNIDADE ARAXÁ**  
**DEPARTAMENTO DE MINAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**  
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS**

**APLICABILIDADE DE *SHOTCRETE* EM MINAS SUBTERRÂNEAS : UM  
ESTUDO BIBLIOGRÁFICO E CARACTERIZAÇÃO DO FOSFOGESSO**

**PATRICK TEIXEIRA OLIVEIRA**

**ARAXÁ**  
**2016**



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**

**UNIDADE ARAXÁ**

**DEPARTAMENTO DE MINAS E CONSTRUÇÃO CÍVIL**

**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS**

**APLICABILIDADE DE *SHOTCRETE* EM MINAS SUBTERRÂNEAS: UM  
ESTUDO BIBLIOGRÁFICO E CARACTERIZAÇÃO DO FOSFOGESSO**

**PATRICK TEIXEIRA OLIVEIRA**

**MICHEL MELO OLIVEIRA**

**ARAXÁ**

**2016**

O48a Oliveira, Patrick Teixeira

Aplicabilidade De *Shotcrete* Em Minas Subterrâneas: Um Estudo Bibliográfico E Caracterização Do Fosfogesso / Patrick Teixeira Oliveira. - 2016.

64 f.: il.

Orientador: Prof. Me: Michel Melo de Oliveira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) -- Centro Federal de Educação Tecnológica, 2016.

1. Minas e Mineração. 2. Minas-Exploração. I. Oliveira, Michel Melo de. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDU: 622.2

PATRICK TEIXEIRA OLIVEIRA

APLICABILIDADE DE *SHOTCRETE* EM MINAS SUBTERRÂNEAS: UM ESTUDO BIBLIOGRÁFICO E CARACTERIZAÇÃO DO FOSFOGESSO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus IV Araxá, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Data de aprovação: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

Banca Examinadora:

*Michel Melo Oliveira*

---

Prof. MSc. Michel Melo de Oliveira - CEFET-MG

*[Signature]*

---

Prof. Dr. Maurício Antonio Carneiro - CEFET-MG

*[Signature]*

---

Prof. Dr. Natal Junio Pires - CEFET-MG

Dedico este trabalho aos meus pais, minha irmã, meus professores e colegas, que sempre estiveram ao meu lado dando suporte e apoio.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido forças e motivação para sempre seguir em frente. Aos meus pais Luiz e Maria, e minha irmã Patricia, por terem sempre me apoiado, incentivado e por sempre acreditarem em mim.

Aos professores do CEFET-MG e da Universidade de Alberta, que tive a prazerosa oportunidade de aprender um pouco de seus conhecimentos, e que me mostraram que a busca pelo conhecimento é muito importante e nunca termina. E também, a todos os meus professores dos níveis de ensino fundamental e médio que de certa forma contribuíram para a conclusão de mais esta etapa.

Ao meu orientador Michel Melo Oliveira, e os professores Augusto Bezerra, Natal Pires, José Fernando Ganime, e Michelly dos Santos Oliveira, que de certa forma contribuíram e sempre me deram inspiração e apoio para os estudos. Ao professor Mauricio Antônio Carneiro pela imensa contribuição para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos e familiares pelo apoio contínuo.

*Dream what you want to dream, go where  
you want to go, be what you want to be.*

## RESUMO

As operações de lavra em minas subterrâneas são realizadas em profundidades cada vez maiores, com o aumento da distância em relação a superfície, além da preocupação com os métodos de suporte surge outro fator importante que é a alta temperatura no subsolo. Assim empresas são obrigadas a fazer altos investimentos com sistemas de resfriamento. *Shotcrete* é um tipo de revestimento que é utilizado na superfície das escavações para aumentar sua resistência às tensões provocadas pelas rochas encaixantes. É importante o estudo de materiais que adicionados em sua composição resulte em um *shotcrete* que além de atender as propriedades mecânicas, também possa fornecer boas propriedades térmicas. De tal modo que se obtenha um isolamento térmico entre a rocha encaixante e a galeria. Este trabalho traz o estudo de um experimento que adiciona agregado de perlita expandido (EPA) em *shotcrete* para obter melhores propriedades térmicas. E recomenda um estudo das propriedades térmicas do fosfogesso, para ser adicionado a *shotcrete*.

**Palavras-chaves:** *Shotcrete*, isolamento térmico, mina subterrânea, agregado de perlita expandido, fosfogesso.

## ABSTRACT

Operations in underground mines are performed at increasing depths, and with the higher distance from the surface, besides the concern with support methods there is also another important factor that is the high temperature in the underground. In order to keep a workable environment, companies are required to make large investments in cooling systems. Shotcrete is a support method used in underground mines, and it is sprayed on the rock surface in order to increase their resistance against the stresses caused by surrounding rocks. It is important the study of materials that added to the shotcrete will result in a product with decent mechanical properties, and also provides good thermal properties. In order to acquire a thermal insulation between the host rock and the gallery. This work studies a research adding expanded perlite aggregate (EPA) in shotcrete in order to obtain better thermal properties. It also suggests, based on a study of the thermal properties of phosphogypsum, an analysis work of a shotcrete added with this material.

**Keywords:** Shotcrete, thermal insulation, underground mining, expanded perlite aggregate, phosphogypsum.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Deformação Axial por Tensão Axial .....	7
Figura 2.2 - Deformação Axial por Deformação Volumétrica .....	7
Figura 2.3 - Deformação Axial por Força causada pela dilatação .....	8
Figura 2.4 - Exemplos de uso do método de tirantes .....	9
Figura 2.5 - Configuração dos cabos .....	10
Figura 2.6 - Configuração dos cabos (2) .....	11
Figura 2.7 - Aplicação do <i>shotcrete</i> .....	12
Figura 2.8 - Interação <i>shotcrete</i> -rocha em uma seção de forma irregular .....	12
Figura 4.1 - Microscopia Eletrônica de Varredura da perlita expandida .....	15
Figura 4.2 - Distribuição granulométrica das misturas com EPA, a) SP0 e SP100; b) SP25; c) SP50; d) SP75 .....	17
Figura 4.3 - Aplicação do <i>shotcrete</i> .....	18
Figura 4.4 - Testes: a) compressão; b) UPV; c) TPS; d) sonda térmica .....	19
Figura 4.5 - Resultados para o rebote .....	21
Figura 4.6 - Efeito do EPA na densidade; <i>shotcrete</i> (S) e concreto (C) .....	22
Figura 4.7 - Efeito do EPA na absorção de água .....	22
Figura 4.8 - Efeito do EPA na resistência a compressão .....	24
Figura 4.9 - Efeito do EPA na resistência à compressão ao longo da cura .....	24
Figura 4.10 - Efeito do EPA na resistência à tração ao longo da cura .....	25
Figura 4.11 - Efeito do EPA na condutividade térmica .....	26
Figura 4.12 - Efeito do EPA na difusividade térmica .....	27
Figura 4.13 - Relação secagem ar/forno com a umidade .....	27
Figura 4.14 - Relação UPV e condutividade térmica .....	28
Figura 4.15 - Relação UPV e difusividade térmica .....	29
Figura 5.1 - Dispositivo de avaliação da capacidade de isolamento térmico .....	35
Figura 5.2 - Resultados do ensaio de resistência à compressão das argamassas .....	36
Figura 5.3 - Resultados da resistência à tração na flexão das argamassas .....	37
Figura 5.4 - Tensão (MPa) versus Flecha (mm) das argamassas ensaiadas .....	38
Figura 5.5 - Desempenho do isolamento térmico das placas de argamassas .....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Dados de temperatura e ambiente de trabalho de algumas minas subterrâneas .....	13
Tabela 4.1 - Proporções das misturas de <i>shotcrete</i> e rebote correspondente .....	16
Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas .....	23
Tabela 4.3 - Propriedades térmicas .....	26
Tabela 5.1 - Composição do fosfogesso. ....	32
Tabela 5.2 - Proporções de materiais utilizados para confecção dos compósitos ....	33
Tabela 5.3 - Exigências mecânicas para argamassas .....	36

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Justificativa .....	2
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1. Objetivo Geral.....	3
1.2.2. Objetivos Específicos .....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Lavra de Mina Subterrânea.....	4
2.2. Métodos de Suporte e Reforço de Rochas .....	5
2.2.1. <i>Rock Bolt</i> .....	9
2.2.2. <i>Cable Bolt</i> .....	10
2.2.3. <i>Shotcrete</i> .....	11
2.3. Altas Temperaturas nas Minas Subterrâneas.....	13
2.3.1. <i>Shotcretes</i> Utilizados para Redução de Temperatura .....	14
3. METODOLOGIA .....	14
4. ESTUDO DE CASO - ADIÇÃO DE AGREGADO DE PERLITA EXPANDIDO....	15
4.1. Agregado de Perlita Expandido .....	15
4.2. Metodologia .....	17
4.2.1. Avaliação Mecânica.....	18
4.2.2. Avaliação Térmica .....	19
4.3. Resultados e Discussão .....	20
4.3.1. Rebote.....	20
4.3.2. Densidade e Absorção de Água .....	21
4.3.3. Propriedades Mecânicas .....	22
4.3.4. Propriedades Térmicas .....	25
4.3.5. Correlação com UPV .....	28
4.4. Conclusões do Estudo.....	29
5. SUGESTÃO DE ESTUDO - ADIÇÃO DE FOSFOGESSO .....	30
5.1. Fosfogesso .....	30
5.1.1. Composição.....	31
5.1.2. Usos .....	32
5.2. Metodologia .....	33
5.3. Resultados e Discussão .....	35
5.3.1. Propriedades Mecânicas .....	35
5.3.2. Propriedades Térmicas .....	38
5.4. Conclusões do Estudo .....	39
6. CONCLUSÕES.....	41
7. REFERÊNCIAS .....	42

## 1. INTRODUÇÃO

Vários estudos surgem a cada ano buscando atender as especificações do mercado, e ao mesmo tempo, visando para os processos de produção, aplicação, uso e pós-consumo uma utilização de produtos de baixo impacto ambiental aliada à redução do consumo de materiais primários. São necessários estudos de novas tecnologias de produção, armazenamento de energia, reuso de recursos naturais, novos tipos de materiais reciclados e recicláveis e técnicas construtivas que evitem o desperdício, de modo a reduzir os impactos ambientais, sociais e econômicos (Luz et al. 2005; Oliveira et al. 2015).

Ao longo dos anos as empresas mineradoras têm aumentado sua produção em ordem de acompanhar o avanço econômico e atender à crescente demanda de materiais. A medida que a indústria da mineração evolui, são necessários métodos de extração mineral cada vez mais avançados. A lavra em minas subterrâneas é cada vez mais comum na indústria da mineração, e a lavra nessas minas, às vezes, é realizada em grandes profundidades para viabilizar a exploração do mineral (Lato & Diederichs 2014; Liu *et al.* 2014; Sahu *et al.* 2015; Sameera *et al.* 2015; Sasmito *et al.* 2015; Szwedzicki 1989). As minas subterrâneas podem ser lavradas por diferentes métodos, dependendo de vários fatores, dentre eles destacam-se o tipo de material a ser extraído, a qualidade das rochas encaixantes ao corpo mineral, a atitude do corpo de minério e a profundidade que o corpo se encontra (Hustrulid & Bullock 2001).

Com o intuito de dar estabilidade as câmaras e aberturas subterrâneas são construídos pilares para evitar desmoronamento o rompimento do maciço rochoso. Os pilares das minas subterrâneas apresentam altas tensões devido à profundidade e do tipo de rocha, e por isso, utilizam-se de revestimentos para aumentar a sua resistência e eficiência desses pilares e das superfícies de escavação (Hartman & Mutmanský 2002). Um dos principais métodos é o emprego de revestimento, chamado de *shotcrete*. Trata-se de um tipo de concreto, que é usado como revestimento de superfície de escavações, principalmente para aumento de resistência, através da

aplicação de argamassa de cimento e areia, no qual pode conter agregados grosseiros (Hustrulid & Bullock 2001).

Outro fator importante que se modifica à medida que a profundidade aumenta, é o aumento da temperatura nas rochas encaixantes. Como a temperatura ambiente nas galerias abertas em maiores profundidades é inapropriada para o trabalho dos operários, é necessário investir em sistemas de ventilação e resfriamento. Estes sistemas são muito caros e por isso, grande parte do dinheiro gasto na operação é voltado para o resfriamento (Ghoreishi-Madiseh *et al.* 2015; Liu *et al.* 2014; Sasmito *et al.* 2015). Pesquisadores estudam a possibilidade de uso de um *shotcrete* que, além de manter as propriedades físicas necessárias para estabilidade das rochas encaixantes, possa contribuir termicamente. Ou seja, que suas propriedades térmicas possibilitem um maior isolamento térmico entre a rocha e a galeria. Para que o *shotcrete* possa contribuir termicamente, é necessária uma mudança em sua composição, adicionando componentes que possuam propriedades térmicas favoráveis ao isolamento térmico.

### **1.1. Justificativa**

Como a temperatura em altas profundidades é muito alta, o gasto com sistemas de ventilação e resfriamento em minas subterrâneas é altíssimo. É importante, um estudo da utilização de métodos que possam possibilitar um ambiente menos quente nessas galerias. Como o *shotcrete* é um revestimento utilizado como suporte, uma mudança em sua composição, de modo que não perca suas propriedades físicas, pode resultar em uma perda de temperatura, por isolamento térmico entre a rocha encaixante. E também auxiliar os sistemas de resfriamento manter a temperatura de interesse.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

O objetivo deste TCC é estudar o trabalho realizado por Liu *et al.* (2014), que adiciona um agregado de perlita expandido (EPA) na composição de *shotcrete*, de modo averiguar as propriedades térmicas obtidas no produto.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Fazer um estudo de caso das propriedades térmicas de um *shotcrete* que foi adicionado de um agregado de perlita.
- Mostrar as propriedades obtidas no estudo de adição de fosfogesso na produção de argamassa, e sugerir o uso de fosfogesso na produção de *shotcrete*.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Lavra de Mina Subterrânea

Muitos especialistas afirmam que a maioria dos depósitos que se localizam próximo a superfície já foram minerados, em adição existe um alto custo para que a atividade de lavra na superfície esteja dentro dos padrões ambientais exigidos por lei. Revisando os principais fatores para o funcionamento de uma mina, nota-se que lavra subterrânea existe uma menor preocupação em relação aos fatores locais, como o clima por exemplo, e também com as consequências ambientais geradas pela mineração. Uma das principais diferenças entre os dois tipos de lavra é que na lavra subterrânea se extrai apenas o minério de interesse, deixando-se o material estéril para trás (Alpay & Yavuz 2009; Hartman & Mutmansky 2002; Neme 2011; Sahu *et al.* 2015; Sasmito *et al.* 2015).

Existem três principais fatores que tornam a lavra a céu aberto menos atrativa. O primeiro é que muitos dos depósitos minerais já estão em processo de lavra ou já foram totalmente minerados. Em segundo, devido ao impacto visual gerado, cada vez mais a população que mora perto das minas está tendo um pensamento negativo em relação a este tipo de mineração, o que prejudica o desenvolvimento. E por fim, houve uma grande mudança no jeito que os negócios são feitos no mundo, tendo-se uma pressão para melhorias de performance nas perspectivas sociais e ambientais (Morrison 2006; Sahu *et al.* 2015).

Assim a lavra subterrânea tem um importante papel no futuro da mineração, ela ocorre quando a extração por mina a céu aberto não é mais viável economicamente, pois se extrai muito mais material estéril do que o mineral minério. Ou, quando o corpo mineral não pode ser alcançado pelos métodos de lavra a céu aberto, faz-se então necessário o uso dos métodos de lavra subterrânea. Os principais métodos de lavra subterrânea, de acordo com Alpay & Yavuz (2009), Darling (2011), Hartman & Mutmansky (2002), IBRAM (2008), e Liu *et al.* (2014) são:

- I. *Room-and-Pillar*
- II. *Longwall*;

- III. *Shrinkage Stopping*;
- IV. *Sublevel Stopping*;
- V. *Cut-and-Fill*;
- VI. *Sublevel Caving*;
- VII. *Panel Caving*.

A escolha do método de lavra é um fator primordial para o sucesso da exploração. Uma vez que a existência do corpo mineral é provada e se tem informações suficientes para as próximas análises, se inicia o processo de decisão de qual método será o de melhor aproveitamento. Devido às singularidades de cada depósito, as variações possíveis em cada um desses métodos podem ser ilimitadas de modo a melhor adequar o processo (Alpay & Yavuz 2009; Darling 2011; Hustrulid & Bullock 2001; IBRAM 2008; Neme 2011).

Na lavra subterrânea existe uma menor preocupação com fatores locais como o clima e também em relação as consequências ambientais. Os fatores mais importantes estão relacionados à resistência do minério e da rocha encaixante, a presença de água subterrânea, e a temperatura no local (Hartman & Mutmanský 2002). Devido aos riscos de desmoronamento, explosões, falta de ar respirável, presença de gases perigosos e riscos térmicos, a mineração subterrânea torna-se mais perigosa, e, portanto, demanda mais atenção do que a mineração na superfície. Então é importantíssimo um controle do ambiente para que este esteja em condições favoráveis para que a operação seja realizada com segurança (Sasmito *et al.* 2015).

## **2.2. Métodos de Suporte e Reforço de Rochas**

Quando uma abertura é escavada em uma mina subterrânea, devido as forças cisalhantes e a concentração ou alívio de tensões na zona em torno da abertura, as rochas nessa região estão sujeitas a falhas. O tamanho dessa zona em que as falhas podem ocorrer é influenciado não apenas pela tensão na rocha, mas também a resistência da rocha e da existência de descontinuidades no local (Asadi *et al.* 2005; Li 2006). A falha ocorre quando a tensão induzida pela escavação é maior do que a resistência do maciço rochoso (Song & Lu 2001).

Essa região de falha ao redor da escavação é chamada por Li (2006) de zona de distúrbio, já Song & Lu (2001) a chama de zona de alívio. Sua espessura pode variar. Quando ela é menor que 150 centímetros os métodos normais, de suporte rígidos, são suficientes. Por outro lado, quando a espessura da camada de distúrbio é maior que 150 centímetros, os métodos rígidos são insuficientes para manter a estabilidade da escavação (Song & Lu 2001). Isto ocorre porque de acordo com Barton *et al.* (1974), uma zona de distúrbio com espessura maior que 150 centímetros é classificada como rocha pobre ou macia, de acordo com o sistema de classificação da qualidade do maciço rochoso proposto pelo autor.

O uso do suporte fornece resistência a três fatores importantes (Song & Lu 2001):

1. Quanto ao próprio peso da rocha solta que se encontra na zona de distúrbio;
2. Contra a dilatação gerada pela rocha quebrada na zona de distúrbio;
3. Contra as deformações plásticas e elásticas das rochas atrás da zona de distúrbio.

As figuras 2.1, 2.2 e 2.3 mostram curvas típicas de testes de dilatação de rochas (Dong *et al.* 1996). De acordo com essas figuras observa-se que a deformação volumétrica é pequena antes do pico de tensão, e aumenta bastante depois do pico. O que leva à conclusão que a deformação dilatante após a falha do maciço rochoso é a principal responsável pela deformação do túnel escavado (Song & Lu 2001).

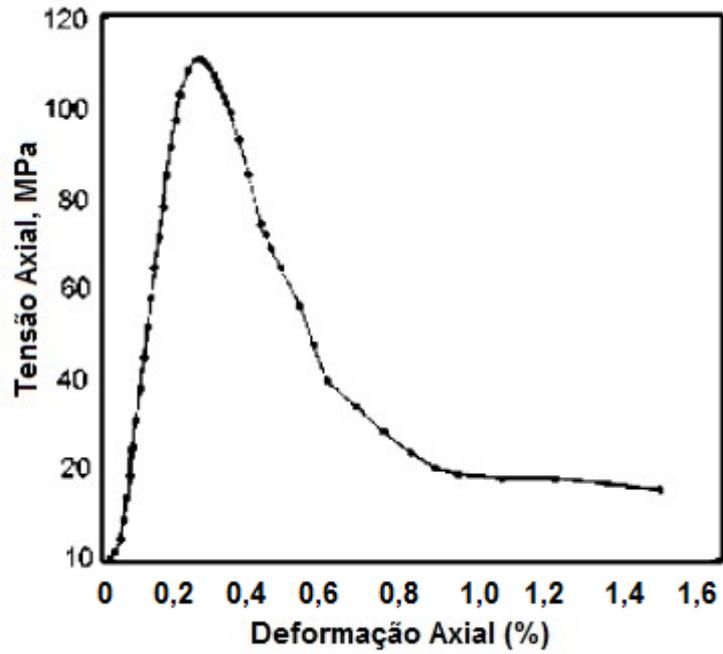


Figura 2.1 - Deformação Axial por Tensão Axial. Adaptado de Dong *et al.* (1996).

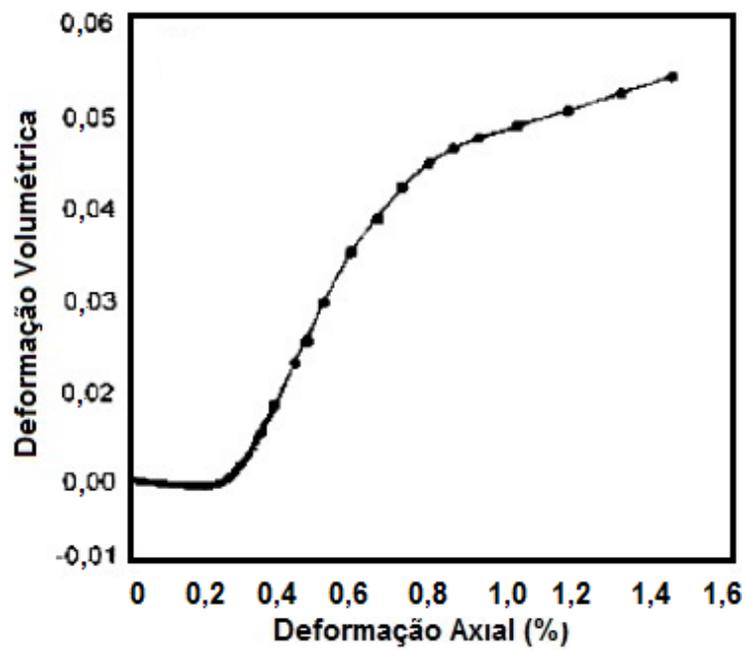


Figura 2.2 - Deformação Axial por Deformação Volumétrica. Adaptado de Dong *et al.* (1996).

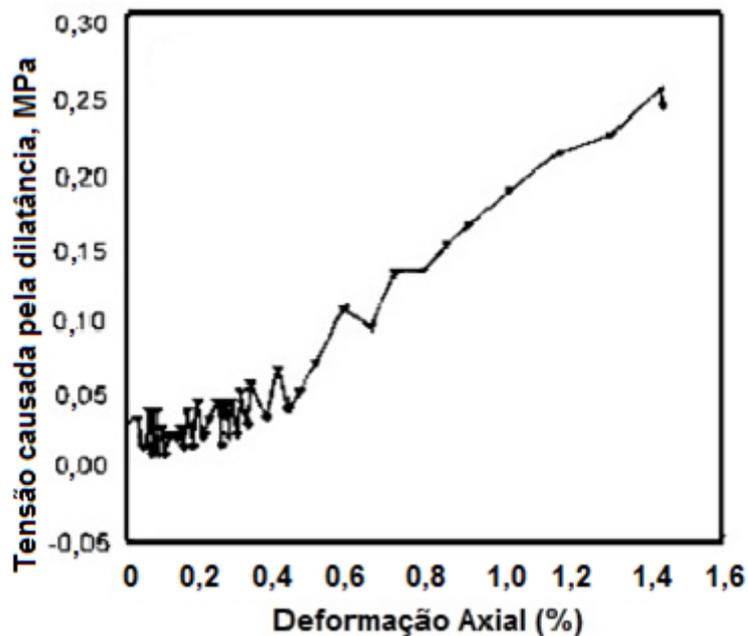


Figura 2.3 - Deformação Axial por tensão causada pela dilatação. Adaptado de Dong *et al.* (1996).

O principal propósito do suporte é aguentar a dilatação das deformações ou as cargas geradas enquanto a zona de distúrbio se desenvolve, de modo a possibilitar um ambiente de trabalho seguro para os trabalhadores e também acessibilidade para a mina (Malmgren & Nordlund 2006; Song & Lu 2001). O suporte de rocha é geralmente feito para condições de carga estáticas, no entanto como mencionado por Malmgren & Nordlund (2006), deve-se estar atento a cargas dinâmicas, como aquelas geradas por ruptura de rochas e por vibração gerada por explosão.

Os principais métodos utilizados no suporte de rochas, segundo Hustrulid & Bullock (2001), são: *rock bolt*, *cable bolt* e *shotcrete*. Os autores ressaltam que é importante diferenciar os termos suporte e reforço, pois embora sejam utilizados como sinônimos possuem significados diferentes. Reforço é utilizado internamente no maciço rochoso (*rock bolt* e *cable bolt*), já suporte é utilizado na face da escavação (*shotcrete*).

### 2.2.1. *Rock Bolt*

Em muitas minas subterrâneas, *rock bolt*, é o principal método utilizado para o suporte de rochas. Consiste da inserção de tirantes no maciço rochoso que podem contribuir das seguintes maneiras (Hustrulid & Bullock 2001):

- Suporta blocos de rochas parcialmente soltos, estratos laminados ou rochas incompetentes sujeitas a queda sob a ação da gravidade;
- Modifica a resistência interna e as características de deformação do maciço rochoso;
- Previne a formação de novas descontinuidades e propagação das descontinuidades pré-existentes;
- Previne a flexão e arqueamento das camadas evitando o movimento lateral ou vertical do maciço.

A figura 2.4 mostra exemplos em que o método é utilizado e como os tirantes são inseridos no maciço rochoso.

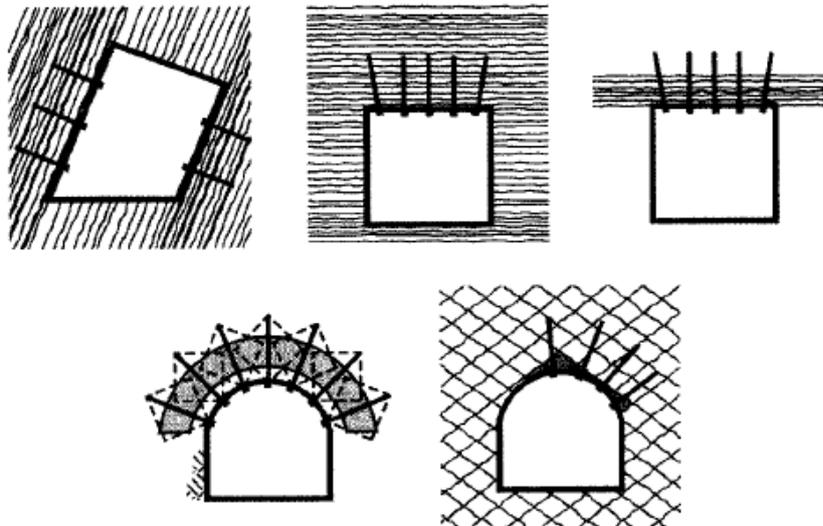


Figura 2.4 - Exemplos de uso do método de tirantes. Hustrulid & Bullock (2001).

Em ordem de serem utilizados em diferentes condições de rochas, novos tirantes e técnicas são desenvolvidos cada ano. Um sistema bem-sucedido de *rock bolt* é seguro, e economicamente está dentro dos requisitos de produção (Krauland 1984).

### 2.2.2. Cable Bolt

Este método faz o uso de cabos longos que apresentam alta resistência à tração. São usados para reforçar maciços rochosos em torno de escavações de superfície, de mineração subterrânea e de engenharia civil. São mais fortes que as barras de aço lisas ou rugosas usadas em chumbadores mecânicos e resinados, e independente do tipo ou tamanho, podem ser instalados com resina pontual ou coluna total (Hustrulid & Bullock 2001).

A figuras 2.5 e 2.6 mostram os principais tipos de cabos utilizados na indústria e como são configurados (Hustrulid & Bullock 2001).

TYPE	LONGITUDINAL SECTION	CROSS SECTION
Multiwire Tendon <i>(Clifford, 1974)</i>		
Birdcaged Multiwire Tendon <i>(Jirovec, 1978)</i>		Antinode  Node
Single Strand <i>(Hunt &amp; Askew, 1977)</i>		Normal  Indented  Drawn
Coated Single Strand <i>(VSL Systems, 1982)</i> <i>(Dorsten et. al., 1984)</i>		Sheathed  Coated  Encapsulated
Barrel and Wedge Anchor On Strand <i>(Matthews et. al., 1983)</i>		3 Component Wedge  2 Component Wedge
Swaged Anchor On Strand <i>(Schmuck, 1979)</i>		Square  Circular

Figura 2.5 - Configuração dos cabos. Hustrulid & Bullock (2001).

TYPE	LONGITUDINAL SECTION	CROSS SECTION
Multiwire Tendon (Clifford, 1974)		
Birdcaged Multiwire Tendon (Jirovec, 1978)		Antinode  Node
Single Strand (Hunt & Askew, 1977)		Normal  Indented  Drawn
Coated Single Strand (VSL Systems, 1992) (Dorsten et. al., 1984)		Sheathed  Coated  Encapsulated
Barrel and Wedge Anchor On Strand (Matthews et. al., 1983)	 Double Acting Twin Anchor      Single Anchor	3 Component Wedge  2 Component Wedge
Swaged Anchor On Strand (Schmuck, 1979)		Square  Circular

Figura 2.6 - Configuração dos cabos (2). Hustrulid & Bullock (2001).

### 2.2.3. Shotcrete

*Shotcrete* já vem sendo utilizado por cerca de um século, e este uso aumentou significativamente nos últimos anos. É um componente amplamente utilizado em suporte de rochas em túneis e escavações subterrâneas (Mpunzi *et al.* 2015). *Shotcrete*, também conhecido como concreto projetado, é uma mistura de cimento, agregados, areia, vários tipos de aditivos e água. O material é aplicado na superfície da rocha sendo jogado em alta velocidade na forma de spray podendo o método ser a seco ou a úmido, figura 2.7 (Ahmed & Ansell 2012; Brady & Brown 1993; Hustrulid & Bullock 2001; Jolin *et al.* 1999).

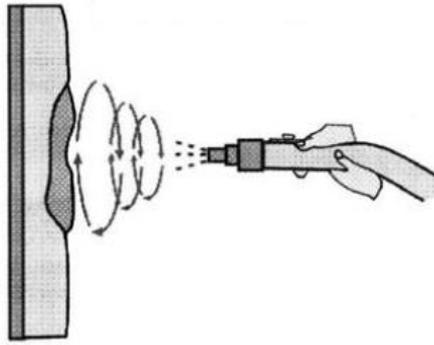


Figura 2.7 - Aplicação do *shotcrete*. Hustrulid & Bullock (2001).

A interação entre o *shotcrete* e a rocha é muito complexa e é influenciada por um número de fatores, figura 2.8. Entre eles estão a rugosidade da parede e do teto, as propriedades mecânicas da rocha, a carga na rocha, a zona danificada pela escavação (EDZ – *excavation damaged zone*), as discontinuidades, os parafusos de ancoragem (*rock bolt*), a espessura da camada de *shotcrete* e da interface entre o *shotcrete* e a rocha. Não é possível analisar a influência desses fatores apenas com modelos experimentais ou analíticos, é necessário o uso de métodos empíricos para o uso de *shotcrete* (Banton *et al.* 2004; Barret & McCreath 1995; Fernandez-Delgado *et al.* 1976; Holmgren 1993; Malmgren & Nordlund 2008; Saiang *et al.* 2005).

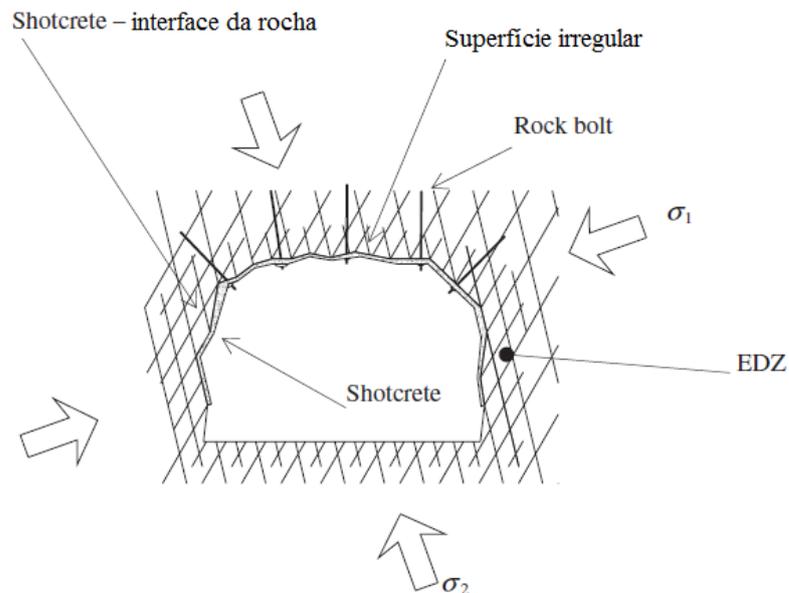


Figura 2.8 - Interação *shotcrete*-rocha em uma seção de forma irregular. Adaptado de Malmgren & Nordlund (2008).

A principal função do *shotcrete* é ajudar a rocha a aguentar as cargas que estão atuando sobre ela (Malmgren & Nordlund 2008). As principais vantagens do uso do método são: prevenir a movimentação de rochas em uma escavação, criar maciço rochoso ao redor da abertura uma condição de tensão similar a tensão tri-axial, criar um arco ao redor da escavação que limita a propagação de fraturas, proteger as rochas contra erosão, manter a escavação livre do fluxo de gases e água do maciço rochoso, influenciar positivamente as condições climáticas na escavação e também facilitar o fluxo de ar (Leung *et al.* 2005; Prusek *et al.* 2014).

### **2.3. Altas Temperaturas nas Minas Subterrâneas**

As empresas mineradoras operam em ambientes cada vez mais profundos, algumas minas chegam a cerca de 3 km abaixo da superfície, com o aumento da profundidade a temperatura também aumenta. Assim, para que o ambiente esteja a uma temperatura segura para os trabalhadores é necessário o uso de um sistema de ventilação. Geralmente apenas um sistema de ventilação não é suficiente para remover o calor transmitido pela rocha encaixante, então é necessário o uso de um sistema de condicionamento e que conseqüentemente aumenta muito nos custos (Ghoreishi-Madiseh *et al.* 2015; Liu *et al.* 2014; Sahu *et al.* 2015; Sasmito *et al.* 2015).

Segundo Teixeira *et al.* (2000), a temperatura no interior da Terra aumenta em cerca de 20 °C a cada 1 km, podendo este gradiente chegar a cerca de 100°C/km em algumas regiões. A tabela 2.1 mostra relação entre profundidade e temperatura de algumas minas de carvão localizadas na África do Sul, Japão e China. Geralmente a temperatura no subsolo é afetada por fatores tais como clima, distância da fonte geotermal, distância da superfície e também do calor gerado pelos equipamentos de lavra (Sasmito *et al.* 2015).

Tabela 2.1 - Dados de temperatura e ambiente de trabalho de algumas minas subterrâneas. Adaptado de Sasmito *et al.* (2015).

Mina de carvão	Profundidade (m)	Temperatura na rocha (°C)
Amandelbult, África do Sul	3300	55
Fengyu-Lead, Japão	500	80
Sanhejian, China	1300	56
Jiahe, China	800	32 - 34
Zhangshuanglou, China	1000	34 - 36
Zhangxiaolou, China	1125	30
Jisan, China	785	31,51
Wobei, China	640	35 - 36
Yongchuan, China	800	29,3 - 31,5

### 2.3.1. Shotcretes Utilizados para Redução de Temperatura

Alguns autores como Liu *et al.* (2014) estudam o uso de *shotcrete* para que além da função de suporte da rocha, também funcione, devido à sua composição, como um condicionador natural no ambiente onde é empregado. Um estudo desta possível empregabilidade para o *shotcrete* é muito importante, uma vez que estudos mostram que dependendo do tamanho e da profundidade da mina custos com ventilação utilizam cerca de 40% da energia elétrica total da operação, e podem chegar até 60% do custo do processo de lavra subterrânea (Chatterjee *et al.* 2015; Ghoreishi-Madiseh *et al.* 2016; Karacan 2007; Kurnia *et al.* 2014;).

## 3. METODOLOGIA

Este trabalho consiste de um estudo bibliográfico sobre o uso de *shotcrete* com intuito de avaliar suas propriedades térmicas. E se divide em duas etapas:

Primeiramente uma análise de um estudo de caso realizado pelo professor Wey Victor Liu, Engenheiro de Minas e PhD, atualmente professor na Universidade de Alberta. O trabalho realizado pelo professor consiste no estudo das propriedades térmicas de um *shotcrete* contendo agregado de perlita expandido.

A segunda parte mostra um trabalho de iniciação científica que estuda o uso de fosfogesso, resíduo da indústria de fertilizantes, como um aditivo na produção de argamassa para revestimento. O estudo das propriedades físicas e térmicas da substância como revestimento apresenta resultados melhores quando comparados a

uma argamassa sem adição do resíduo. Então é interessante um estudo mais avançado analisando a possibilidade do uso do fosfogesso na composição de *shotcrete* e uma análise das propriedades térmicas do produto.

#### 4. ESTUDO DE CASO - ADIÇÃO DE AGREGADO DE PERLITA EXPANDIDO

##### 4.1. Agregado de Perlita Expandido

O agregado de perlita expandido (EPA) é composto principalmente por  $\text{SiO}_2$  (70-75%) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (12-18%), possui vários usos devido sua baixa densidade, alto brilho, alta absorção, baixas condutividade térmica e acústica, e por ser um material não inflamável (Khonsari *et al.* 2010). Como visto na figura 4.1 apresenta uma estrutura porosa e possui uma densidade aparente após secagem em forno de  $71 \text{ Kg/m}^3$ . A areia estava na condição de superfície saturada seca correspondendo a uma umidade de 2,04% em massa e densidade aparente na condição seca de  $1675 \text{ Kg/m}^3$ .

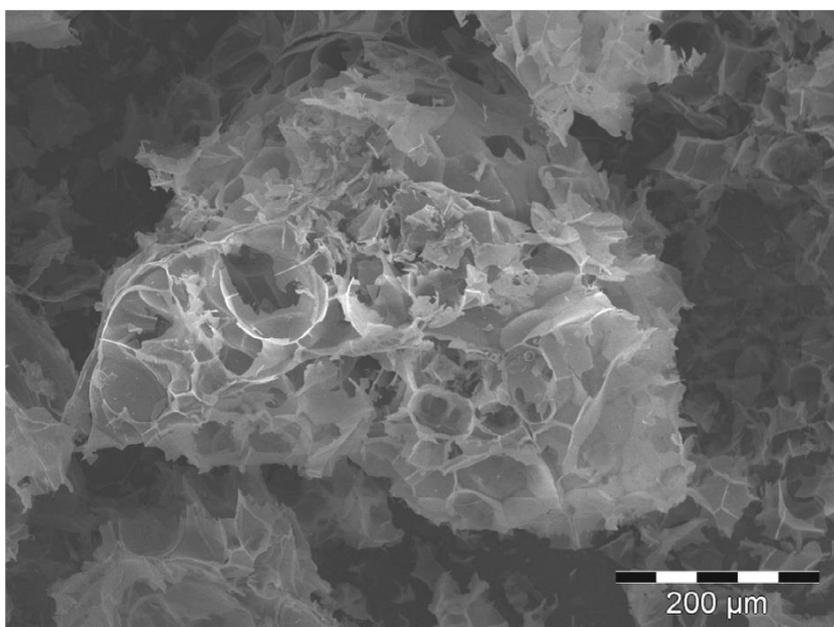


Figura 4.1 - Microscopia Eletrônica de Varredura da perlita expandida. Liu *et al.* (2014).

A tabela 4.1 mostra a quantidade utilizada de cada material, bem como as porcentagens foram definidas de acordo com as normas ACI 506.5R (2009) e ASTM C-126 (2006), para uso de *shotcrete* em minas subterrâneas. Foram utilizados 5

produtos, um sendo referência sem adição de EPA (SP0), e outros substituindo a areia, em porcentagem volumétrica, por EPA nas proporções de 25% (SP25), 50% (SP50), 75% (SP75) e 100% (SP100). O rebote é a porção do material lançado que não se adere ao substrato. Consiste principalmente de agregados (parte grossa dos agregados), e em menor quantidade de cimento e água de mistura (Pfeuffer & Kusterle 2001; Klapperich *et al.* 1995). A quantidade de rebote é influenciada pela composição do *shotcrete* (cimento, agregados, aditivos, adjuvantes, relação água-cimento e capacidade de adesão da mistura), a engenharia de processo (equipamento de fornecimento, velocidade do material no bico, diâmetro da mangueira), bem como parâmetros no local (experiência do aplicador, tipo de substrato, espessura de aplicação, temperatura, etc.) (Warner 1995; Kusterle & Eichler 1997; Armelin & Banthia 1998).

Tabela 4.1 - Proporções das misturas de *shotcrete* e rebote correspondente. Adaptado de Liu *et al.* (2014).

Número da Mistura	Percentual de Substituição (%)	Cimento (g)	Areia (g) (Seca)	EPA (g) (Seco)	Rebote (%)
SP0*	0	519,5	1623,5	0	21
SP25	25	519,5	1217,6	17,3	11,4
SP50	50	519,5	811,7	34,6	16,6
SP75	75	519,5	405	52	15
SP100	100	519,5	0	69,3	29,1

\* SP0 foi pré-misturada pelo misturador de tambor um dia antes do processo de lançamento para apertar a programação, mas a mistura começou a hidratar, resultando em blocos endurecidos. No entanto, ainda foi lançado para obter o rebote.

A consistência do *shotcrete* é influenciada pela granulometria dos agregados finos e grossos, e também pela quantidade e a trabalhabilidade da pasta de cimento. O *shotcrete* deve o mais plástico possível, de modo que os agregados pulverizados possam ser incorporados no *shotcrete* fresco. Para se aderir a superfície, o peso específico não deve ser maior do que a coesão e a força de aderência do *shotcrete* com a interface de substrato (Pfeuffer & Kusterle 2001).

A figura 4.2 exibe a distribuição granulométrica da areia (SP0), do EPA (SP100), e das misturas (SP25, SP50 e SP75). De acordo com a norma ACI 506R (2005) a granulometria aceitável para *shotcrete* é encontrada nas zonas de

classificação #1 e #2, todas as curvas granulométricas estão dentro da zona de classificação #1 que apresenta uma granulometria mais fina que na zona #2, resultando em um corpo sólido, sem laminações, áreas arenosas ou vazios.

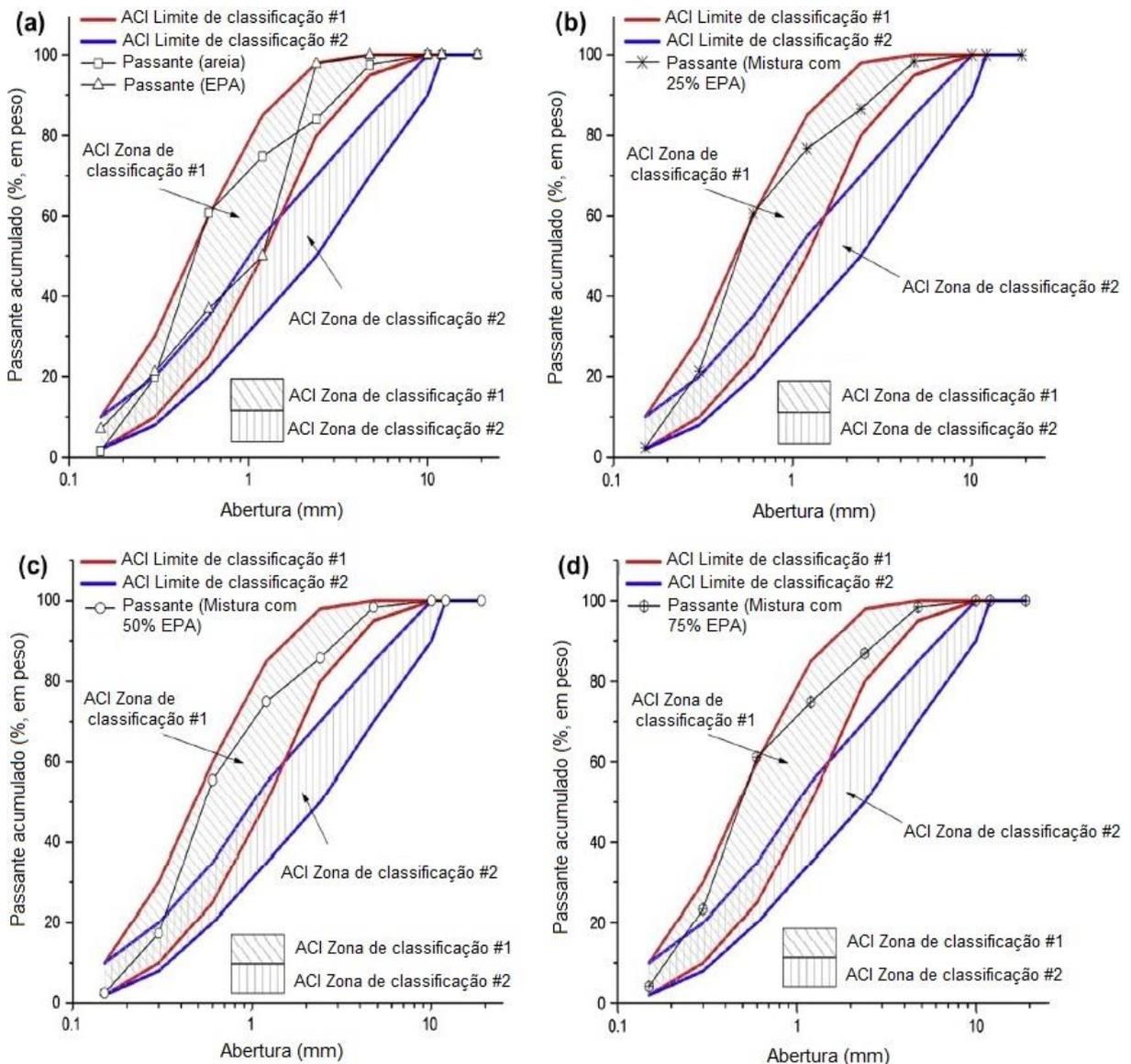


Figura 4.2 - Distribuição granulométrica das misturas com EPA, a) SP0 e SP100; b) SP25; c) SP50; d) SP75. Adaptado de Liu *et al.* (2014).

#### 4.2. Metodologia

A preparação do *shotcrete* foi supervisionada por um aplicador certificado e os ensaios foram realizados no laboratório do departamento de engenharia de Minas e Civil da Universidade de Alberta, no campus norte na cidade de Edmonton. Foram

preparados 15 painéis de madeira com dimensões de 610x610x90mm (largura, comprimento e profundidade, respectivamente). Três corpos foram preparados para cada mistura e aplicados no mesmo dia. Para medir o rebote um saco plástico foi colocado no chão para coletar o material após cada aplicação. Após aplicação, figura 4.3, os corpos foram levados para cura, onde manteve-se uma temperatura de  $25 \pm 2$  °C e umidade relativa de 95-100%. De cada painel foi retirado cilindros com 50 mm de diâmetro com 6 tempos de cura, 1 dia, 3 dias, 5 dias, 7 dias, 14 dias e 28 dias. Foi medida a relação comprimento/diâmetro dos cilindros resultando em valores entre 1 e 1,78. Apenas os cilindros dentro das zonas de classificação 1 e 2 (ACI 506.2 1995) foram aceitos para os testes.



Figura 4.3 - Aplicação do *shotcrete*. Liu *et al.* (2014).

#### 4.2.1. Avaliação Mecânica

Os cilindros foram utilizados da seguinte maneira: três para examinar densidade e volume de vazios (ASTM C642 2006); três para avaliar a resistência à compressão uniaxial (ASTM C42 2012) conforme figura 4.4a, e outros quatro para resistência à tração (ASTM D3967 2008). Totalizando dez cilindros para cada mistura de *shotcrete*. Também foi medida a velocidade de pulso ultrassônico (UPV), figura 4.4b, de acordo com a norma ASTM C597 (2009). A frequência dos dois transdutores

foi de 54 kHz e o corpo apresentou diâmetro de 50mm e comprimento entre 80 e 90 mm. As velocidades medidas foram depois correlacionados com as propriedades térmicas.

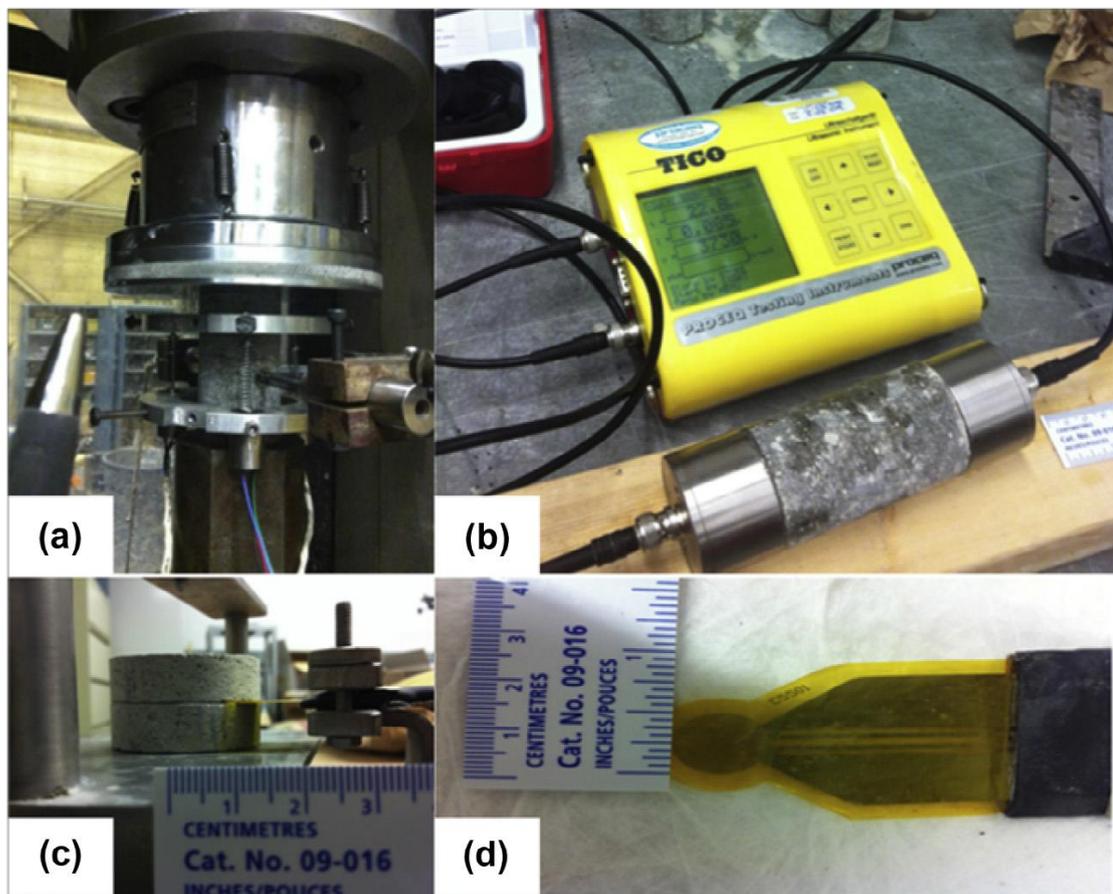


Figura 4.4 - Testes: a) compressão; b) UPV; c) TPS; d) sonda térmica. Liu *et al.* (2014).

#### 4.2.2. Avaliação Térmica

Além dos cilindros utilizados para os ensaios de avaliação mecânica, três cilindros foram designados para avaliação térmica no fim do dia 28 de cura. Os métodos de avaliação térmica podem ser divididos em duas categorias, métodos de estado estacionário e os métodos transientes. Nos métodos de estacionários, o fluxo de calor através das amostras é controlado para permitir que o gradiente de temperatura ao longo de uma distância medida atinja o estado estacionário. No entanto, o processo para atingir o estado estacionário geralmente leva muito tempo,

e estes métodos geram condutividade térmica depois de um período de duas a três horas. Por outro lado, nos métodos transitórios, a mudança de sinal é gravada ao mesmo tempo em que a amostra é aquecida. Dentre os métodos transitórios destaca-se o TPS - *Transient Plane Source*, que fornece informação rápida e simultânea da condutividade e difusividade térmica (ISO 22007-2 2008; Log & Gustafsson 1995; Liu *et al.* 2011; Bouguerra *et al.* 2001).

Foi utilizado um analisador de constantes térmicas que é baseado no método TPS e segue as instruções da ISO 22007-2 (2008), conforme figura 4.4c. O componente que destaca o dispositivo é a fonte de calor e sonda de temperatura que operam combinados, figura 4.4d. Os discos para o teste foram feitos dos cilindros, de modo que cada cilindro se gera um par de discos.

### **4.3. Resultados e Discussão**

#### **4.3.1. Rebote**

Os resultados de rebote são mostrados na tabela 4.1, e podem ser melhor visualizados no gráfico representado na figura 4.5. Como a mistura SP0 foi preparada um dia antes, esta foi ignorada na discussão. Assim, nota-se um aumento do rebote com o aumento de EPA no composto, sendo o maior rebote de 29,1% atingido na mistura com 100% de EPA. Esses resultados contradizem estudos feitos por Bindiganavile & Banthia (2009), que dizem que densidades menores resultam em uma minimização do rebote. No entanto, nos estudos destes autores a densidade variava entre 600 a 15000 Kg/m<sup>3</sup>, e a densidade do EPA é de cerca de 71 Kg/m<sup>3</sup>. Estudos feitos por Armelin & Banthia (1998) mostram que a tendência de ocorrer rebote da partícula depende de dois fatores, o primeiro é habilidade de fixação dessa partícula no substrato, e segundo, sua susceptibilidade de ejeção do substrato. Como a densidade do EPA é muito baixa, há o risco de que o material nem chegue a atingir o substrato. Liu *et al.* (2011) confirmam que na aplicação da mistura SP100, uma parte do material, predominantemente partículas de EPA, foram vistas saindo do fluxo da aplicação, e claramente não atingindo o substrato. Mas o autor questiona, se este caso pode ser classificado como rebote, ou caso de excesso de material projetado na

aplicação. Todavia, no caso de *shotcrete dry-mix* (seco-misturado), existe um limite inferior para a densidade abaixo do qual o benefício no rebote não é testemunhado (Liu *et al.* 2011).

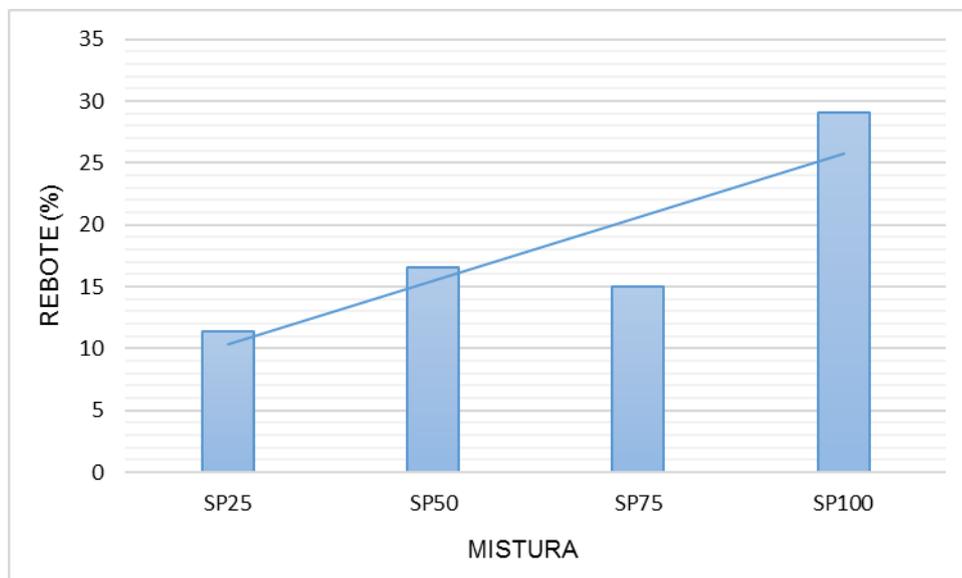


Figura 4.5 - Resultados para o rebote.

#### 4.3.2. Densidade e Absorção de Água

A figura 4.6 apresenta os resultados para a densidade, para o *shotcrete* aplicado (S) e para corpos produzidos convencionalmente (C) com as mesmas proporções de EPA. A densidade aparente seca varia entre 2100 Kg/m<sup>3</sup> a 800 Kg/m<sup>3</sup> para o *shotcrete* e entre 2150 Kg/m<sup>3</sup> a 1200 Kg/m<sup>3</sup> para os corpos convencionais. A diferença entre o *shotcrete* e o concreto não foi significativa com exceção da amostra com 100% de substituição de EPA. A figura 4.7 apresenta duas curvas para absorção de água em função da quantidade de EPA substituída, uma calculada após imersão e outra após imersão e fervura. Analisando a figura nota-se que as curvas são praticamente idênticas, com exceção da SP100 (densidade de 800 Kg/m<sup>3</sup>) que apresenta uma absorção maior após fervura. Considerando o comportamento das curvas afirma-se que a absorção de água aumenta com o aumento da substituição de EPA, aumentando de um valor de 5% para SP25 para 55% na SP100 (substituição total da areia).

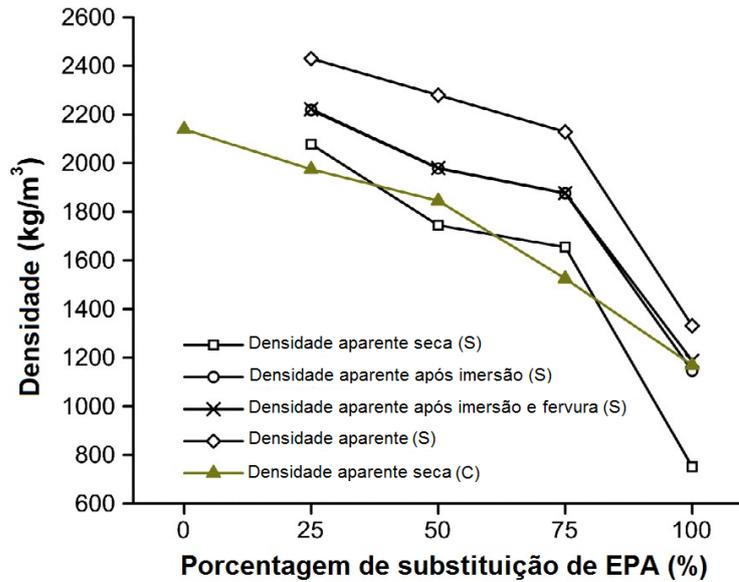


Figura 4.6 - Efeito do EPA na densidade; *shotcrete* (S) e concreto (C). Adaptado de Liu *et al.* (2014).

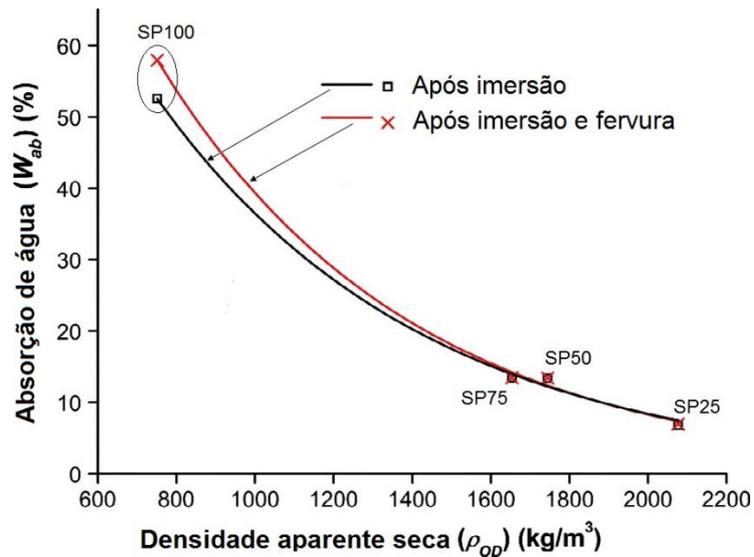


Figura 4.7 - Efeito do EPA na absorção de água. Adaptado de Liu *et al.* (2014).

### 4.3.3. Propriedades Mecânicas

Os resultados para os testes de resistência à compressão (UCS) e resistência à tração (STS) são mostrados na tabela 4.2. Devido à dificuldade de controle da quantidade de água no *shotcrete* produzido pelo processo *dry-mix*, é melhor comparar os valores de resistência à compressão com a densidade aparente seca em forno. De acordo com a figura 4.8, as duas curvas, para o *shotcrete* e para o concreto,

apresentam uma tendência, a resistência à compressão diminui com o aumento da substituição de areia por EPA. A tendência pode ser atribuída à microestrutura porosa do próprio EPA, e, eventualmente, uma zona de transição mais fraca influenciada pela introdução de EPA. Como esperado, a única diferença significativa nas UCS foi observada na mistura SP100, o que está de acordo com a diferença entre as densidades relativas de secagem em forno discutidas anteriormente. Os autores Karakoç & Demirboga (2010), Topçu & Işıkdağ (2008) e Sengul *et al.* (2010) encontraram resultados parecidos com os de Liu *et al.* (2014) para a relação entre densidade e resistência à compressão. As figuras 4.9 e 4.10 apresentam o efeito da adição de EPA na resistência à compressão e tração ao longo da cura. Nota-se, como esperado, que a resistência em ambos os casos diminui com o aumento da quantidade de EPA, e aumenta ao longo da cura.

Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas. Adaptado de Liu *et al.* (2014).

Lote	SP25	SP50	SP75	SP100
1° dia UCS (MPa)	13,06 ± 0,69	12,01 ± 0,65	9,26 ± 0,27	1,12 ± 0,07
3° dia UCS (MPa)	28,58 ± 0,57	19,41 ± 0,16	22,70 ± 1,2	1,90 ± 0,03
5° dia UCS (MPa)	31,11 ± 0,49	20,70 ± 3,08	24,01 ± 3,28	1,97 ± 0,05
7° dia UCS (MPa)	34,39 ± 0,85	23,96 ± 3,67	25,37 ± 0,61	2,20 ± 0,07
14° dia UCS (MPa)	41,66 ± 2,74	29,78 ± 1,28	25,55 ± 3,73	3,80 ± 0,66
28° dia UCS (MPa)	45,92 ± 0,45	31,38 ± 0,93	29,72 ± 1,61	4,26 ± 0,12
1° dia STS (MPa)	1,80 ± 0,18	1,55 ± 0,15	1,54 ± 0,08	0,36 ± 0,06
3° dia STS (MPa)	3,41 ± 0,14	3,10 ± 0,08	3,31 ± 0,12	0,62 ± 0,06
5° dia STS (MPa)	5,50 ± 0,10	3,64 ± 0,34	3,94 ± 0,17	0,72 ± 0,13
7° dia STS (MPa)	5,59 ± 0,32	4,12 ± 0,56	4,02 ± 0,31	0,75 ± 0,05
14° dia STS (MPa)	6,54 ± 0,09	4,37 ± 0,45	4,15 ± 0,18	0,80 ± 0,06
28° dia STS (MPa)	6,90 ± 1,34	4,44 ± 0,52	4,49 ± 1,29	1,16 ± 0,17

Resistência à compressão (UCS); Resistência à tração (STS)

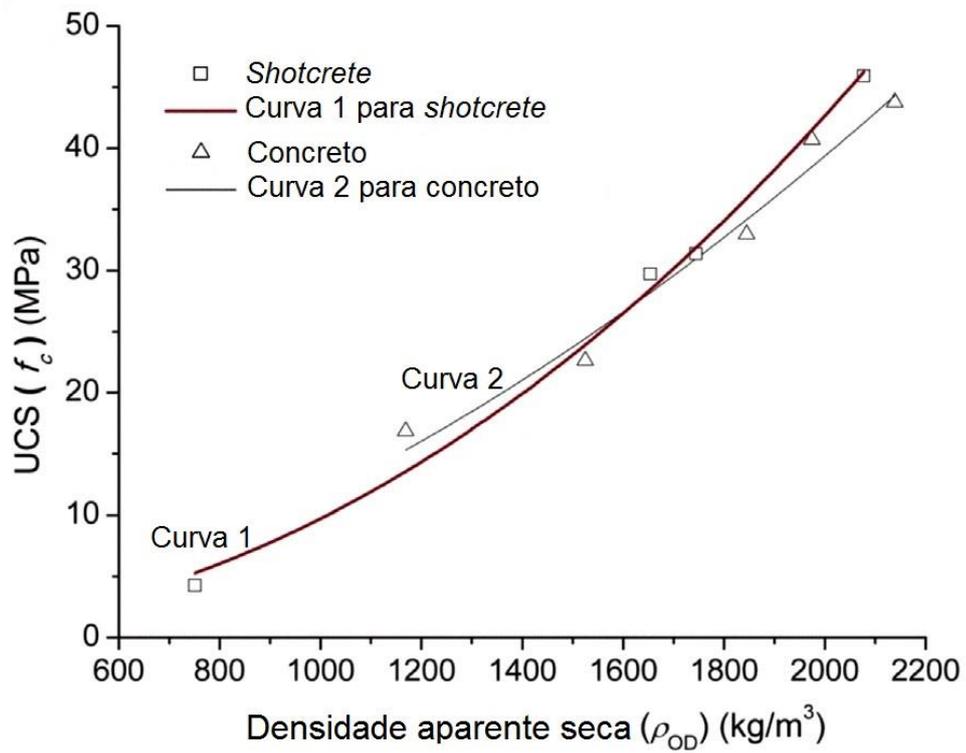


Figura 4.8 - Efeito do EPA na resistência à compressão. Adaptado de Liu *et al.* (2014).

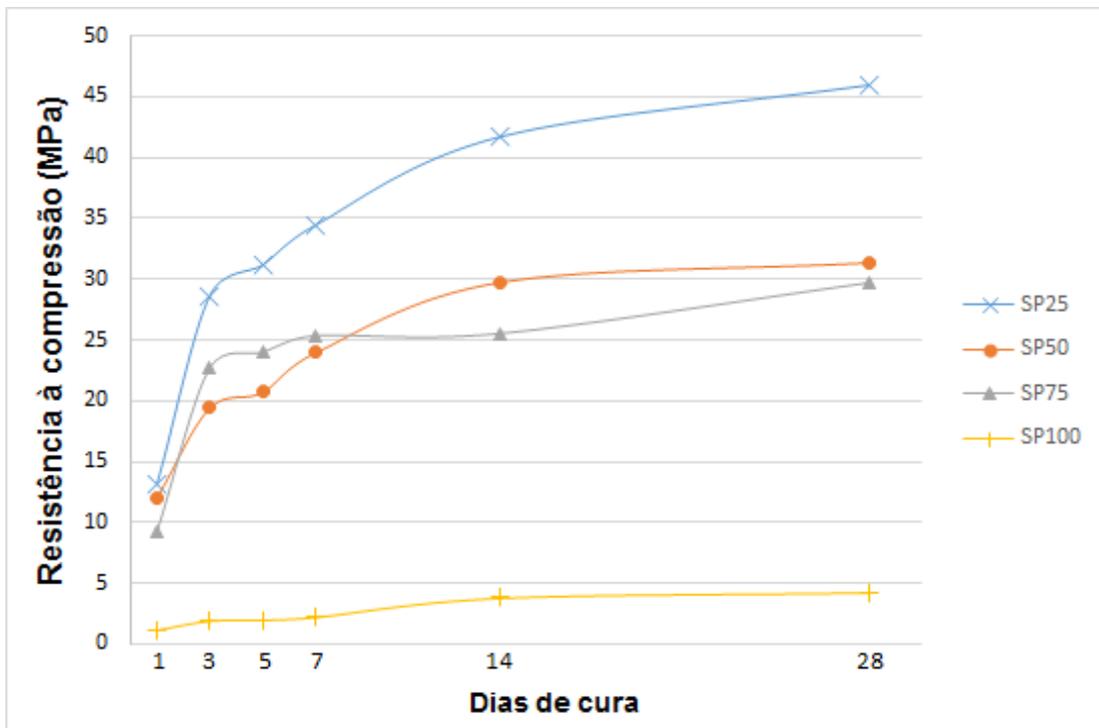


Figura 4.9 - Efeito do EPA na resistência à compressão ao longo da cura.

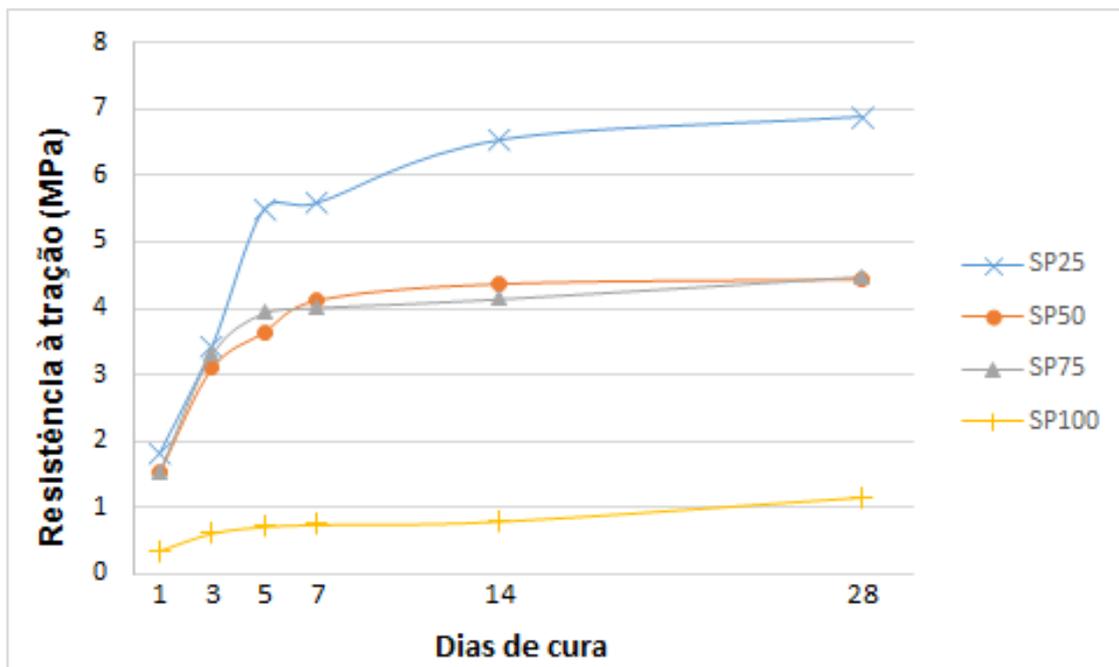


Figura 4.10 - Efeito do EPA na resistência à tração ao longo da cura.

#### 4.3.4. Propriedades Térmicas

Os resultados para as propriedades térmicas são mostrados na tabela 4.3. O método TPS fornece os resultados com um erro de 5% em relação à média. As figuras 4.11 e 4.12 mostram a relação entre a adição de EPA com a condutividade e difusividade térmica das amostras de *shotcrete*, sendo comparadas em duas curvas, com o corpo seco em forno e seco em temperatura ambiente. Como esperado, a condutividade e a difusividade diminui com o aumento da porcentagem de EPA, uma vez que a condutividade do EPA é de 0,04 W/(m K) enquanto que da areia varia de 0,78 a 2,2 W/(m K) (Karakoç & Demirboga 2010; Khan 2002; Lienhard IV & Lienhard V 2011).

No processo de produção do *shotcrete dry-mix*, a quantidade de água é controlada pelo aplicador de modo a adequar a aplicabilidade assegurando um baixo rebote e uma resistência à penetração adequada (Armelin & Banthia 1998; Liu *et al.* 2014). É conhecido que a resistência à penetração depende principalmente da demanda de água da mistura *dry-mix*. Considerando que o ar e água tem condutividade térmica de 0,026 W/(m K) e 0,60 W/(m K), respectivamente, é esperado

que o aumento do EPA, alta taxa de absorção de água, gere um aumento na quantidade de água. O processo *dry-mix* produz um *shotcrete* com compactação superior ao concreto convencional, no entanto, estudos realizados por Nguyen *et al.* (2010) mostram que uma maior compactação não significa maior condutividade térmica. Em comparação dos resultados dos testes para concreto convencional feitos por Liu *et al.* (2008), a condutividade térmica das amostras de *shotcrete* foram menores. Como visto na figura 4.13, uma maior umidade é apresentada no *shotcrete* em relação ao concreto convencional.

Tabela 4.3 - Propriedades térmicas. Adaptado de Liu *et al.* (2014).

		SP25	SP50	SP75	SP100
Seco ambiente	Condutividade térmica (W/(m K))	1,95	1,66	1,24	0,41
	Difusividade térmica (mm <sup>2</sup> /s)	1,56	1,05	0,83	0,57
	Capacidade térmica volumétrica (MJ/(m <sup>3</sup> K))	1,26	1,58	1,5	0,72
	Calor específico (J/(Kg K))	568,36	814,89	807,3	688,67
Seco em forno	Condutividade térmica (W/(m K))	1,44	1,11	0,83	0,18
	Difusividade térmica (mm <sup>2</sup> /s)	0,88	0,81	0,68	0,37
	Capacidade térmica volumétrica (MJ/(m <sup>3</sup> K))	1,65	1,37	1,22	0,48
	Calor específico (J/(Kg K))	793,56	783,12	735,76	641,77

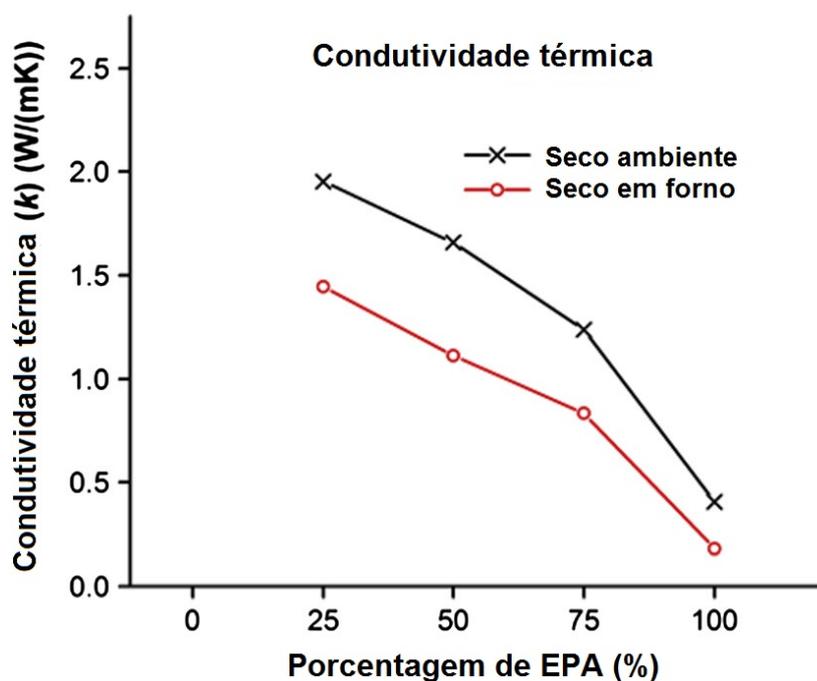


Figura 4.11 - Efeito do EPA na condutividade térmica. Adaptado de Liu *et al.* (2014).

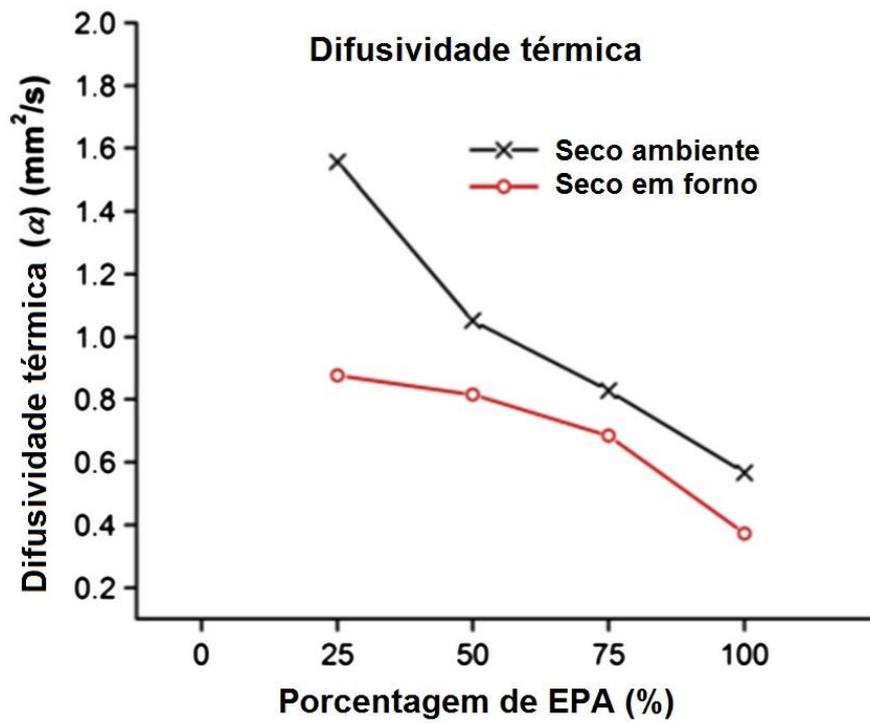


Figura 4.12 - Efeito do EPA na difusividade térmica. Adaptado de Liu *et al.* (2014).

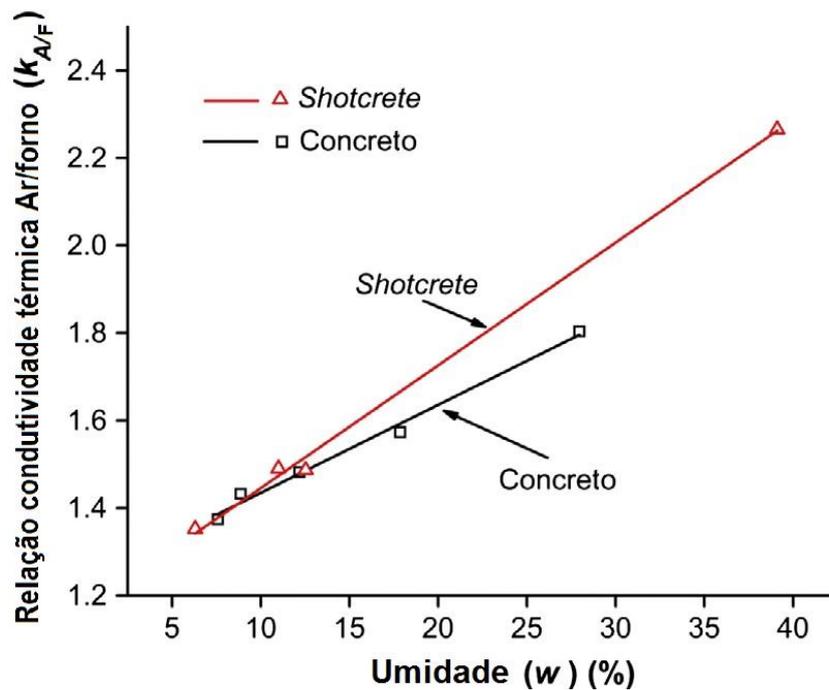


Figura 4.13 - Relação secagem ar/forno com a umidade. Adaptado de Liu *et al.* (2014).

#### 4.3.5. Correlação com UPV

As propriedades térmicas foram correlacionadas com a velocidade de pulso ultrassônico, figura 4.14 e 4.15. A condutividade térmica aumenta com o aumento da UPV, e a diferença entre as condições de secagem em forno e ar parece ser uniforme para a gama de valores medidos de UPV. A difusividade térmica também cresce com o aumento da UPV, no entanto não existe um padrão na diferença entre os meios de secagem, mostrando que não está claro o papel da umidade neste caso. Relações parecidas para a condutividade térmica foram encontradas por Karakoç & Demirboga (2010).

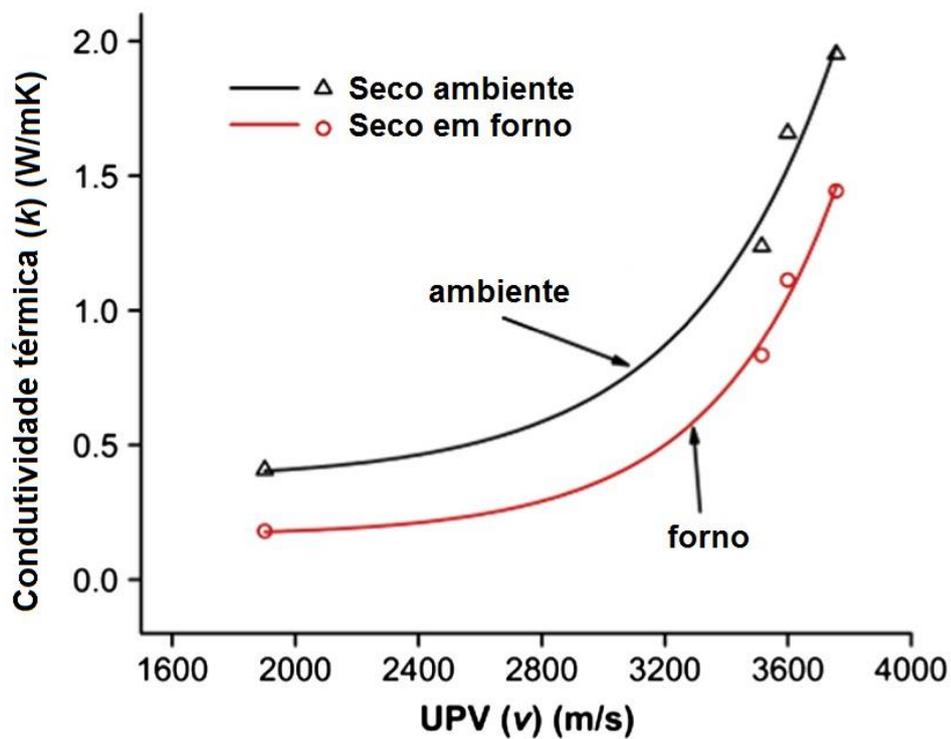


Figura 4.14 - Relação UPV e condutividade térmica. Adaptado de Liu *et al.* (2014).

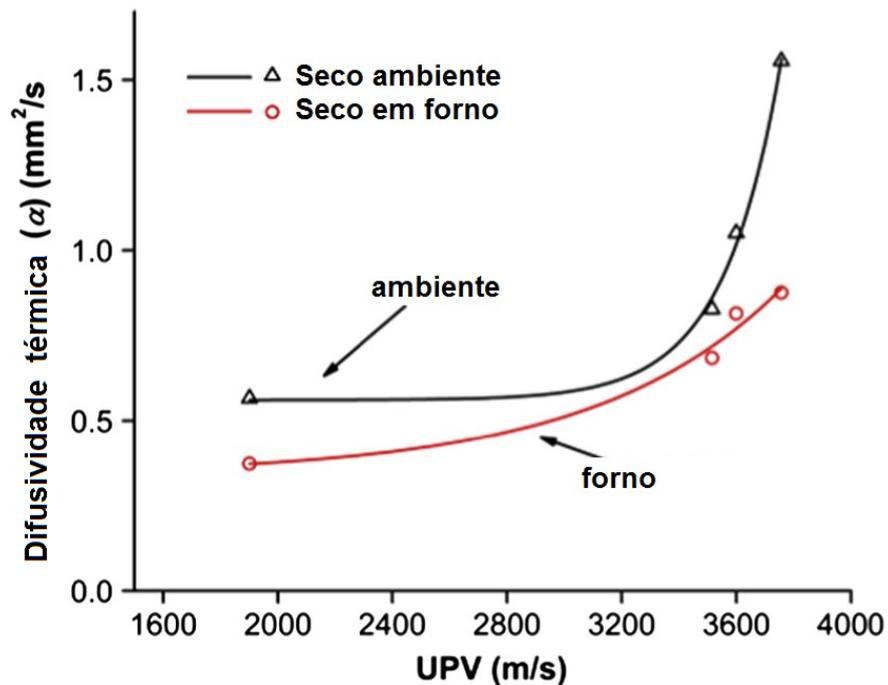


Figura 4.15 - Relação UPV e difusividade térmica. Adaptado de Liu *et al.* (2014).

#### 4.4. Conclusões do Estudo

Após análise dos resultados obtidos para as 5 misturas com diferentes quantidades de EPA substituindo areia. Os autores Liu *et al.* (2014), afirmam que um *shotcrete* produzido com até 75% de EPA apresenta propriedades térmicas superiores sem comprometimento do desempenho mecânico. Os principais resultados obtidos no trabalho segundo os autores foram:

- A substituição da areia por EPA resulta em uma redução da densidade da amostra.
- Quando a aplicação é feita pelo processo *dry-mix*, existe um aumento no rebote devido à baixa densidade do EPA.
- A demanda de água aumenta com o aumento da porcentagem de EPA.
- A resistência à compressão e tração diminui com a introdução de EPA, apresentando uma relação linear.

- Condutividade e difusividade térmica são minimizadas com o aumento da porcentagem de EPA, e foi obtido uma correlação entre condutividade térmica e a velocidade de pulso ultrassônico (UPV).

## **5. SUGESTÃO DE ESTUDO - ADIÇÃO DE FOSFOGESSO**

### **5.1. Fosfogesso**

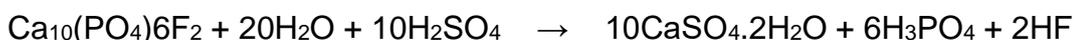
O fósforo existe com certa abundância na natureza (é o décimo elemento mais comum): 1.050 ppm na crosta terrestre e teores médios de 8.690 ppm em carbonatitos, 650 ppm em granitos e 390 ppm em diabásios (Heinrich 1967). Seus minérios são rochas naturais que se formam em ambientes geológicos variados. Habitualmente, contém mais de um tipo de fosfato, sendo os mais comuns os fosfatos de cálcio do grupo da apatita. Quando em quantidade e concentração suficientes, formam depósitos de valor econômico. Estes minérios podem ser utilizados diretamente, ou após beneficiamento, na manufatura de produtos comerciais. Sua principal aplicação é na agricultura, como fertilizante (Loureiro *et al.* 2008).

A produção de fertilizantes a partir de minérios fosfatados naturais é realizada em complexos industriais constituídos por unidades que podem agrupar-se numa mesma área ou atuarem separadamente. No Complexo Industrial de Uberaba existem unidades produtivas de ácido sulfúrico, ácido fosfórico, fosfato monoamônio (MAP), superfosfato triplo (TSP), superfosfato simples (SSP), nitrato de amônio e uréia, e têm operado no limite de suas capacidades. A operação deste complexo industrial produz como resíduo o sulfato de cálcio dihidratado, também chamado de fosfogesso (Loureiro *et al.* 2008).

A rocha beneficiada, que é utilizada como matéria-prima para a produção de ácido fosfórico é, de modo geral, muito insolúvel. Por este motivo, um ataque químico drástico se faz necessário. São conhecidos dois processos de produção de ácido fosfórico a partir da rocha fosfática: o que se dá por via seca e o que ocorre por via úmida. No processo por via seca, a rocha fosfática, juntamente com coque e areia, é tratada em forno elétrico a 1300°C para liberar fósforo elementar em forma de vapor, que é condensado e, em seguida, oxidado a P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, o qual, com água, produz ácido

fosfórico. Atualmente, o processo por via úmida é utilizado na grande maioria das áreas de produção do ácido fosfórico. Neste caso, a rocha fosfática é tratada com ácido sulfúrico e água, produzindo sulfato de cálcio hidratado (denominado fosfogesso), ácido fosfórico e fluoreto de hidrogênio (Loureiro *et al.* 2008).

De acordo com Loureiro *et al.* (2008) o produto principal da reação entre o concentrado fosfático e o ácido sulfúrico é o ácido ortofosfórico. Segundo PÉREZ *et al.* (2007) neste processo, não só o ácido fosfórico comercial é produzido, mas também um sulfato de cálcio insolúvel residual chamado fosfogesso. Este processo pode ser representado pela seguinte equação:



(fluorapatita + água + ác. Sulfúrico → gesso + ác. Ortofosfórico + fluoreto de hidrogênio)

Dependendo das condições da reação pode-se obter o fosfogesso semihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) ou dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Enquanto a razão molar entre o fosfogesso e o ácido fosfórico é de 10:6, a razão de massa é de aproximadamente 10:6, isto é, em torno de 5 toneladas de fosfogesso são geradas para cada tonelada de ácido produzida (Jianxi *et al.* 2011).

De acordo com Paes *et al.* (2001), uma vez cristalizado, o fosfogesso é separado da porção líquida por filtração, misturado com água e armazenado em pilhas. A água do processo é reciclada. O ácido fluorídrico reage com as impurezas de silicato da rocha fosfática não dissolvida e produz  $\text{SiF}_4$ , que hidrolisa formando o ácido fluorsilícico ( $\text{H}_2\text{SiF}_6$ ).

### 5.1.1. Composição

O fosfogesso é um subproduto composto principalmente por um gesso matriz ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) com elevados teores de impurezas tais como  $\text{P}_2\text{O}_5$ , F, substâncias orgânicas, metais potencialmente tóxicos e elementos radioativos (Pérez *et al.* 2007).

Existe uma vasta literatura internacional sobre a composição do fosfogesso. A Tabela 5.1 apresenta a composição do fosfogesso (Garg *et al.* 2009).

Tabela 5.1 - Composição do fosfogesso. Adaptado de Garg *et al.* (2009).

Constituintes (%)	Fosfogesso não processado
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,56
F	0,35
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	0,40
Matéria Orgânica	0,059
SiO <sub>2</sub> + em HCL insolúvel	0,90
CaO	31,50
MgO	0,053
SO <sub>3</sub>	45,10
LOI	19,80
pH	4,0

### 5.1.2. Usos

O fosfogesso é usado extensivamente, em muitos países, como um substituto do gesso natural na produção de cimento, revestimento de paredes e plastificantes (UNSCEAR 1993). Segundo Santos (2002) diversos trabalhos foram elaborados, enfocando as várias possibilidades de aplicação do fosfogesso brasileiro na agricultura (Silva 1997; Freitas 1992; Gomide Filho 1992; Ramos 1992; Guimarães 1986; Carvalho *et al.* 1986). O fosfogesso é utilizado na construção civil (Mazzilli *et al.* 2000; Rosa 1997; Damasceno & Lima 1994; Lima 1992; Maccarini 1991) e também em outros potenciais tecnológicos (Borges 2001; Saad 2000; Damasceno & Lima 1994; Barti & Albuquerque 1992; Pessenda *et al.* 1988). Cárdenas-Escudero *et al.* (2011) discutem a respeito da utilização do fosfogesso como agente de sequestro de CO<sub>2</sub>.

Apesar de todas as possibilidades de usos citadas anteriormente, estas não utilizam 10% de todo fosfogesso produzido. Faz-se necessário a descoberta de novos usos que apliquem o resíduo. Sob condições de mercado, esta é uma verdadeira fonte

de lucros adicionais, bem como da diversificação e capitalização de qualquer empreendimento em desenvolvimento (Samonov 2011).

## 5.2. Metodologia

Para o presente trabalho foi coletado fosfogesso na empresa Vale Fertilizantes, resíduo do processo de formação do ácido fosfórico. O fosfogesso obtido foi secado em estufa na temperatura de 75 +/- 5°C, e em seguida foram confeccionados corpos de prova com e sem adição de fosfogesso. A secagem e confecção dos corpos de provas foram feitas no laboratório de edificações do CEFET-MG, campus de Araxá, e foram supervisionadas pelo técnico do laboratório. Os ensaios mecânicos foram feitos no laboratório do CEFET-MG em Belo Horizonte, e o ensaio de isolamento térmico foi feito em Araxá. Na tabela 5.2 são apresentadas as proporções de materiais utilizados nos compósitos cimentícios.

Tabela 5.2 - Proporções de materiais utilizados para confecção dos compósitos. Adaptado de Oliveira *et al.* (2015).

Material	Referência	Traço 1 (10%)	Traço 2 (20%)	Traço 3 (30%)
	Quantidades (g)			
Cimento	624,00	624,00	624,00	624,00
Fosfogesso	0,00	62,40	124,80	187,20
Água	300,00	300,00	300,00	300,00
Areia normal				
Fração grossa	468,00	468,00	468,00	468,00
Fração média grossa	468,00	468,00	468,00	468,00
Fração média fina	468,00	468,00	468,00	468,00
Fração fina	468,00	468,00	468,00	468,00

O compósito cimentício sem adição foi chamado de argamassa controle (AC) e os com adições foram chamados de argamassas adicionadas de fosfogesso (AAF). Foram moldados três corpos de prova prismáticos de 160x40x40mm para o ensaio de resistência à tração na flexão, cinco corpos de prova cilíndricos com 50 mm de

diâmetro e 100 mm de altura para o ensaio de resistência à compressão e uma placa cujas dimensões foram 300x300x22mm para o ensaio de capacidade de isolamento térmico, isto para cada traço de adição. Após 7 dias da cura úmida de 14 dias, os corpos de prova foram caracterizados mecanicamente através dos ensaios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão e foi feito o ensaio de avaliação da capacidade de isolamento térmico.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em máquina universal de ensaios mecânicos eletromecânica micro processada de duplo fuso com duas colunas guias cilíndricas paralelas, com capacidade de carga de 30 KN, com velocidade de aplicação de carga de 0,5MPa/s. Os corpos de prova tiveram suas bases regularizadas com capeador de neoprene com base metálica. O equipamento utilizado para determinar a tração na flexão foi o mesmo do ensaio de resistência à compressão e com velocidade de aplicação de carga de 0,1MPa/s.

O ensaio para avaliar a capacidade de isolamento térmico foi realizado com a utilização de um forno do tipo mufla com capacidade de temperatura máxima de 1200°C e com dimensões internas de 200x150x150mm. A tampa do forno foi retirada e nas roscas de fixação da tampa foi fixado um dispositivo que possui parafusos de ajustes, foram fabricadas 2 chapas metálicas, nas dimensões de 300x300mm e espessura de 3,18 mm. Foram usados dois termopares de contato tipo K (mineral), com bainha em aço inox, rabicho 2x24 AWG com isolação interna e externa em fibra de vidro e terminal pino.

Nos corpos de prova em forma de placas foram feitos dois rasgos, um em cada face, em posições paralelas para passagem dos termopares. O corpo de prova foi colocado entre as duas chapas metálicas, e os termopares foram posicionados entre a chapa metálica e o corpo de prova, os dois lados, e o conjunto foi colocado na entrada da mufla. Foram ajustados os parafusos do dispositivo para que a chapa ficasse totalmente apoiada. Nos terminais dos termopares foram acoplados dois multímetros para registro das temperaturas. Foi também posicionado um relógio de parede sobre a mufla para controle do tempo de aquecimento e regulado a temperatura máxima para 640°C, e registrado em um caderno as temperaturas desde

o início do aquecimento no interior da mufla, no corpo de prova do lado interno da mufla, no corpo de prova no lado externo, sendo feitas as anotações a cada 60s. A figura 5.1 mostra o dispositivo de avaliação da capacidade de isolamento térmico.



Figura 5.1 - Dispositivo de avaliação da capacidade de isolamento térmico. Oliveira *et al.* (2015).

### **5.3. Resultados e Discussão**

#### **5.3.1. Propriedades Mecânicas**

Na figura 5.2 é possível observar a média, a mediana, o valor máximo e o mínimo de resistência à compressão alcançados pelas argamassas produzidas. A AC apresentou resistência à compressão superior a AAF10 em aproximadamente 48%. A AAF20 e a AAF30 apresentaram resistência à compressão inferiores a AAF10, cerca de 69 e 45%, respectivamente. Estas diferenças nos resultados de resistência à compressão das argamassas não se apresentaram de forma relevante, no entanto deve-se ressaltar que a resistência à compressão não é importante para argamassas de revestimento.

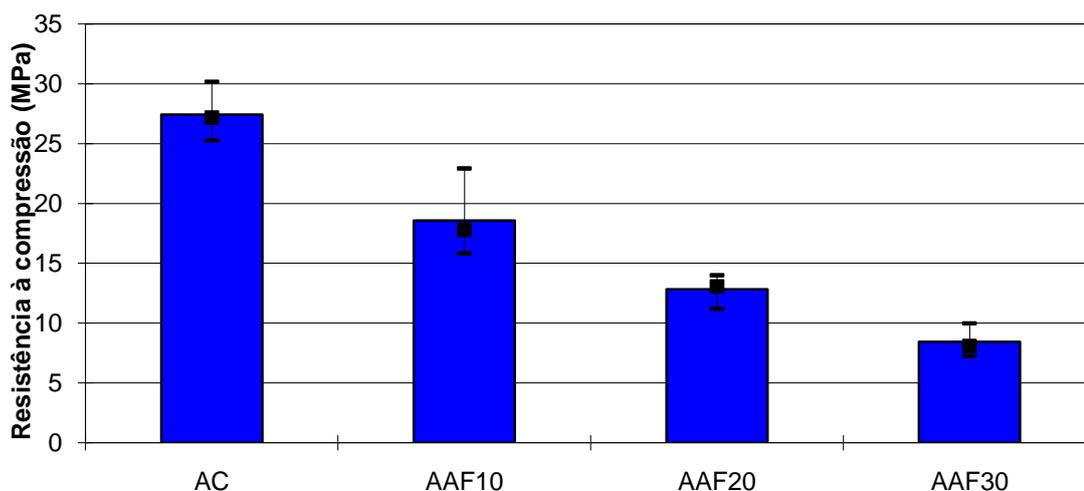


Figura 5.2 - Resultados do ensaio de resistência à compressão das argamassas. Oliveira *et al.* (2015).

Conforme a NBR 13281 (ABNT 2005) as argamassas de revestimento de paredes e tetos ou assentamento de paredes devem cumprir com os requisitos nela estabelecidos. Todas as argamassas de fosfogesso apresentaram-se com resistência à compressão superior a resistência mínima para a identificação 1 da tabela 5.3. É válido ressaltar que não foram encontrados parâmetros para argamassas para proteção passiva de estruturas metálicas.

Tabela 5.3 - Exigências mecânicas para argamassas. ABNT (2005).

Características	Identificação	Limites	Método
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	I	$\geq 0,1$ e $< 4,0$	NBR 13279
	II	$\geq 4,0$ e $\leq 8,0$	
	III	$> 8,0$	

A ASTM E 761 (1988) define como parâmetro mínimo de resistência à compressão de argamassas projetadas para proteção de estruturas metálicas o valor de 0,057MPa.

Na Figura 5.3 são apresentados os resultados de resistência à tração na flexão das argamassas. Nota-se que a resistência à tração na flexão de todas as argamassas com adição de fosfogesso é superior do que a argamassa de referência. A AAF10 apresenta o melhor resultado, cerca de 100% superior em relação à AC, a partir desta porcentagem de adição os valores da resistência dos compósitos decrescem com o aumento da proporção do resíduo. No entanto ainda permanecem superiores à AC, sendo AAF20 e AAF30 de aproximadamente 94 e 51%, respectivamente.

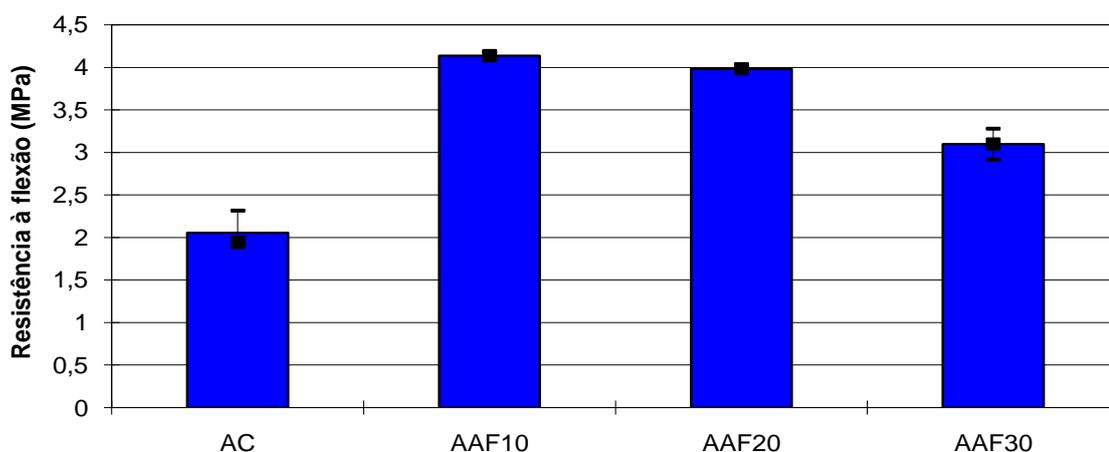


Figura 5.3 - Resultados da resistência à tração na flexão das argamassas. Adaptado de Oliveira *et al.* (2015).

Analisando as curvas da figura 5.4 notamos que os corpos de referência romperam primeiro do que os corpos com adição do gesso, comprovando mais uma vez a eficácia das argamassas com adição. Nesta figura também se nota a superioridade da argamassa de 10% em relação às outras.

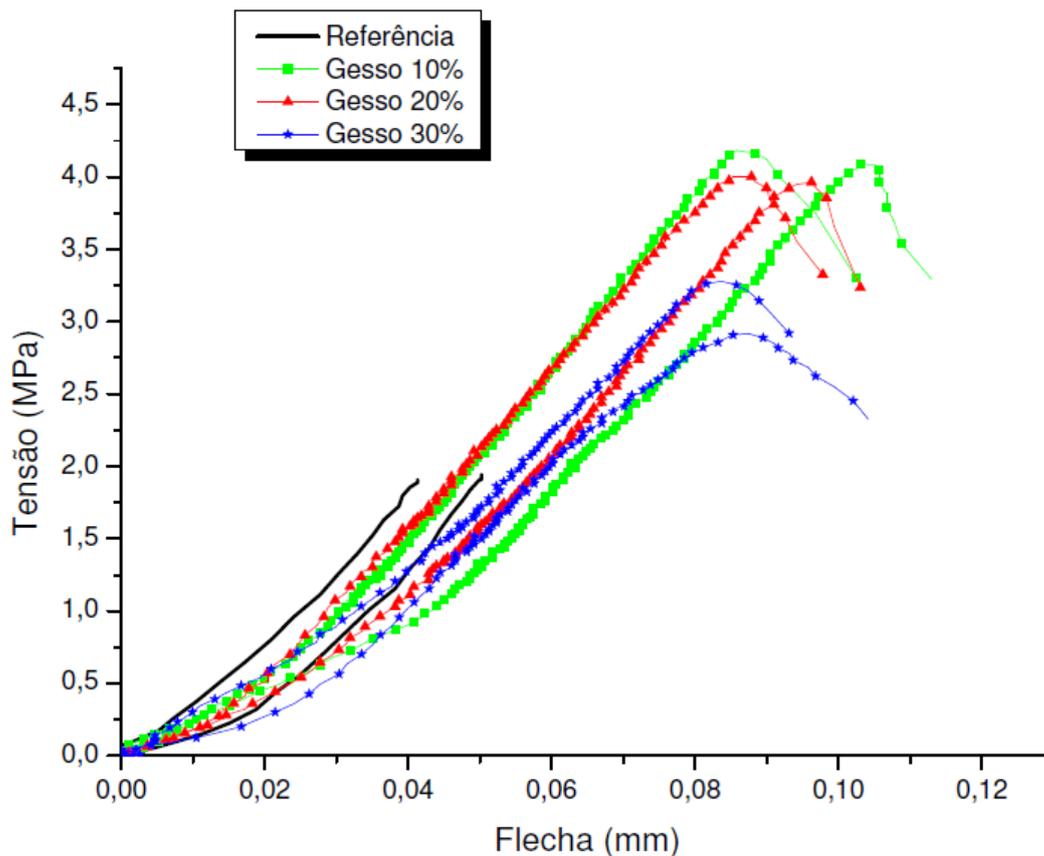


Figura 5.4 - Tensão (MPa) versus Flecha (mm) das argamassas ensaiadas. Adaptado de Oliveira *et al.* (2015).

### 5.3.2. Propriedades Térmicas

Na Figura 5.5 é possível observar o comportamento ao isolamento das placas de argamassas produzidas com os diferentes percentuais de adição de fosfogesso. Observando as curvas das diferentes argamassas percebe que aproximadamente até a temperatura de 350°C as capacidades de isolamento térmico das argamassas com adição se apresentam superiores em relação à placa de referência. A argamassa com a adição de 30% de fosfogesso apresentou a melhor proteção em comparação com as outras placas até os 350°C, após esta temperatura todas as placas tiveram comportamento semelhante.

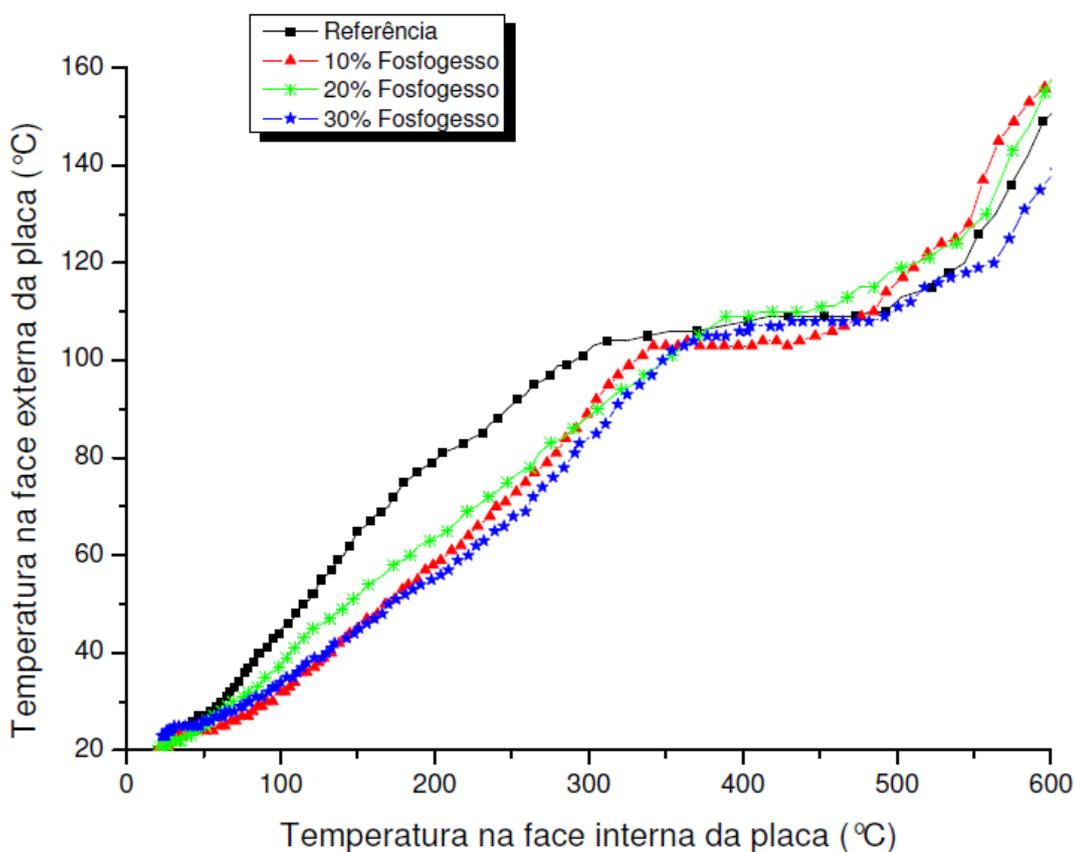


Figura 5.5 - Desempenho do isolamento térmico das placas de argamassas. Adaptado de Oliveira *et al.* (2015).

#### 5.4. Conclusões do Estudo

Após análise dos resultados da adição do fosfogesso na produção da argamassa, as seguintes afirmações podem ser feitas:

- A adição de fosfogesso não contribui para o acréscimo da resistência à compressão do compósito;
- A adição de fosfogesso contribui significativamente para o acréscimo da resistência à tração na flexão do compósito;
- A adição de fosfogesso contribui para a capacidade de isolamento térmico dos compósitos, uma vez que o desempenho das argamassas com adições foi expressivo em comparação com a argamassa controle até 350°C, acima desta temperatura todas as argamassas apresentaram comportamento semelhante;

- Ressaltando que a resistência à compressão não é importante para argamassas de revestimento, além dos resultados superiores em relação a argamassa de referência, ainda pode-se destacar que o uso deste resíduo acarretará na imobilização do fosfogesso, que possui milhões de toneladas inutilizadas em estoques. O trabalho conclui que é viável o uso de fosfogesso para a confecção de argamassas para proteção passiva.

## 6. CONCLUSÕES

Como as empresas que utilizam o método de lavra subterrânea operam em profundidades cada vez maiores, conseqüentemente a temperatura no ambiente escavado é maior. Deste modo os gastos com sistemas de resfriamento são gigantescos. Assim, com intuito de minimizar estes gastos, uma alternativa é o uso de um revestimento que proporcione certo isolamento térmico entre a galeria e a rocha encaixante. Como o *shotcrete* é um método de suporte, e é aplicado nas paredes e pilares, uma ótima opção é uma mudança em sua composição de modo a se obter um produto com boa capacidade de isolamento térmico, e que ao mesmo tempo atendas as propriedades mecânicas.

Ambos os estudos apresentados neste trabalho exibiram resultados superiores, quando comparados aos corpos de referência, em relação as propriedades térmicas dos produtos gerados, sendo o agregado de perlita na composição de *shotcrete* e o fosfogesso na composição de argamassa. Como o fosfogesso apresentou eficiência no isolamento térmico, um estudo do uso de sua adição na composição do *shotcrete* é bastante interessante, pois pode gerar um *shotcrete* com propriedades de isolamento térmico que viabilizem seu uso. Este estudo é bastante conveniente, pois se viável a utilização deste *shotcrete* acarreta em dois grandes benefícios. O primeiro é proporcionar melhores propriedades térmicas para o *shotcrete* reduzindo altos custos nos sistemas de resfriamento utilizados nas minas subterrâneas. E segundo, o uso do fosfogesso resultaria em uma demanda para o produto, assim o retirando de estoque e dando uso para os milhões de toneladas que não possuem uso.

## 7. REFERÊNCIAS

- Ahmed, L. & Ansell, A. 2012. Structural dynamic and stress wave models for the analysis of shotcrete on rock exposed to blasting. *Engineering Structures*. **35**:11-17.
- ACI 506. 2009. Guide for specifying underground shotcrete. *American Concrete Institute*. Farmington Hills, MI.
- ACI 506.02. 1995. Specification for shotcrete. *American Concrete Institute*. Farmington Hills, MI.
- ACI 506R. 2005. Guide to shotcrete. *American Concrete Institute*. Farmington Hills, MI.
- Alpay, S. & Yavuz, M. 2009. Underground mining method selection by decision making tools. *Tunnelling and Underground Space Technology*. **24**:173-184.
- Armelin, H. S. & Banthia, N. 1998. Development of a general model of aggregate rebound for dry-mix shotcrete - Part I. *Materials and Structures*. **31**(2):91-98.
- Armelin, H. S. & Banthia, N. 1998. Development of a general model of aggregate rebound for dry-mix shotcrete - Part II. *Materials and Structures*. **31**(3):195-202.
- Asadi, A.; Shahriar, K.; Goshtasbi, K. & Najm, K. 2005. Development of new mathematical model for prediction of surface subsidence due to inclined coalseam mining. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*. **105**(1):15-20.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2005. NBR 13279: *Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2005. NBR 13281: *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos*. Rio de Janeiro.

- ASTM C42. 2012. *Standard test method for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete*. ASTM International. West Conshohocken, Pennsylvania. p. 8.
- ASTM C126. 2006. *Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregate*. ASTM International. West Conshohocken, Pennsylvania.
- ASTM C597. 2009. *Standard test method for pulse velocity through concrete*. ASTM International. West Conshohocken, Pennsylvania.
- ASTM C642. 2006. *Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete*. ASTM International. West Conshohocken, Pennsylvania.
- ASTM D3967. 2008. *Splitting tensile strength of intact rock core specimens*. ASTM International. West Conshohocken, Pennsylvania.
- Banton, C.; Diederichs, M. S.; Hutchinson, D. J. & Espley, S. 2004. Mechanisms of shotcrete roof support. *2nd international conference engineering developments in shotcrete*. **1**:39-45.
- Barret, S. V. L. & McCreath, D. R. 1995. Shotcrete support design in Blocky ground: towards a deterministic approach. *Tunnelling and Underground Space Technology*. **10**(1):79-89.
- Barti, P. E. & Albuquerque, P. C. W. 1992. Alternativas para a reciclagem do fosfogesso. *Seminário sobre o uso do gesso na agricultura*. Uberaba, p.67-81.
- Barton, N. R.; Lien, R. & Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock mechanics*. **6**(4):189-236.
- Bindiganavile, V. & Banthia, N. 2009. Effect of Particle Density on Its Rebound in Dry-Mix Shotcrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. **21**(2):58-64.
- Borges, R. M. M. 2001. *Caracterização tecnológica do fosfogesso gerado no pólo industrial de Cubatão*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

- Bouguerra, A.; Aït-Mokhtar, A.; Amiri, O. & Diop, M. B. 2001. Measurement of thermal conductivity, thermal diffusivity and heat capacity of highly porous building materials using transient plane source technique. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. **28**(8):1065-1078.
- Brady, B. H. G. & Brown, E. T. 1993. *Rock Mechanics: For underground mining*. London; New York: Springer Science & Business Media. 571 p., 2 ed.
- Cárdenas-Escudero, C.; Morales-Flórez, V.; Pérez-Lopez, R.; Santos, A. & Esquivias, L. 2011. Procedure to use phosphogypsum industrial waste for mineral CO2 sequestration. *Journal of Hazardous Materials*. **196**:431-435.
- Carvalho, L. J. C. B.; Rodrigues, G. C.; Souza, D. M. G. & Freitas JR., E. 1986. *Resposta do milho à aplicação de gesso e déficit hídrico em solo dos cerrados*. I Seminário sobre o uso do fosfogesso na agricultura. Brasília.
- Chatterjee, A.; Zhang, L. & Xia, X. 2015. Optimization of mine ventilation fan speeds according to ventilation on demand and time of use tariff. *Applied Energy*. **146**:65-73.
- Damasceno, E. C. & Lima, J. R. B. 1994. *Aproveitamento de resíduos da indústria de mineração: o fosfogesso gerado pela solubilização de concentrados fosfáticos*. III Congresso Italo Brasileiro Di Ingigneria Cineraria. Verona, Itália.
- Darling, P. 2011. *SME Mining Engineering Handbook*. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., v.1, 1984 p., 3 ed.
- Dong, F.; Song, H. W.; Jing, H. W. & Zhou, R. Z. 1996. Surrounding Rock State of Underground Projects and Bolt Performance Mechanism. *Wanguo Academy Publishing House*. **1**:283-286.
- Fernandez-Delgado, G.; Mahar, J. M. & Parker, H. W. 1976. Structural behaviour of thin shotcrete liners obtained from large scale tests. *Shotcrete for underground support*. **54**:399-442.

- Freitas, B. J. A. 1992. *A disposição do fosfogesso e seus impactos ambientais*. II Seminário sobre o uso do fosfogesso na agricultura. Uberaba. 325-339 p.
- Garg, M.; Jain, N. & Singh, M. 2009. Development of alpha plaster from phosphogypsum for cementitious binders. *Construction and Building Materials*. **23**:3138-3143.
- Ghoreishi-Madiseh, S. A.; Sasmito, A. P.; Hassani, F. P. & Amiri, L. 2015. Heat transfer analysis of large scale seasonal thermal energy storage for underground mine ventilation. *Energy Procedia*. **75**:2093-2098.
- Ghoreishi-Madiseh, S. A.; Sasmito, A. P.; Hassani, F. P. & Amiri, L. 2016. Performance evaluation of large scale rock-pit seasonal thermal energy storage for application in underground mine ventilation. *Applied Energy*. **1**:1-8.
- Gomide Filho, I. 1992. *Avaliação económica do uso do gesso agrícola*. II Seminário sobre o uso do fosfogesso na agricultura. Uberaba. 341-365 p.
- Guimarães, P. T. G. 1986. *O gesso agrícola na neutralização do alumínio nas camadas subsuperficiais do solo: aplicações às culturas anuais e perenes*. Brasília. 145-167 p.
- Hartman, H. L. & Mutmansky, J. M. 2002. *Introductory Mining Engineering*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 570 p.
- Heinrich, E. W. 1967. The Geology of Carbonatites. *American Association for the Advancement of Science*. **157**:93-431.
- Holmgren, J. 1993. Principles for a rational design of shotcrete lining in hard rock. *Shotcrete for underground support*. **1**(2):67-74.
- Hustrulid, H. L. & Bullock, R. L. 2001. *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc (SME). 718 p.

- ISO 22007-2. 2008. *Plastics - Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity - Part 1: General Principles*. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland.
- Jianxi, L.; Su, Y. & Liping, M. 2011. Feasibility analysis for decomposition of phosphogypsum in cement precalciner. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. **30**:44-49.
- Jolin, M.; Beaupre, D. & Mindess, S. 1999. Tests to characterise properties of fresh dry-mix shotcrete. *Cement and Concrete Research*. **29**:753-760.
- Karacan, C. O. 2007. Development and application of reservoir models and artificial neural networks for optimizing ventilation air requirements in development mining of coal seams. *International Journal of Coal Geology*. **72**(3-4):221-239.
- Karakoç, M. & Demirboga, R. 2010. HSC with Expanded Perlite Aggregate at Wet and Dry Curing Conditions. *Journal of Materials in Civil Engineering*. **22**(12):1252-1259.
- Khan, M. I. 2002. Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models. *Building and Environment*. **37**(6):607-614.
- Khonsari, V.; Eslami, E. & Anvari, A. 2010. Effects of expanded perlite aggregate (EPA) on the mechanical behavior of lightweight concrete. *Korea Concrete Institute*. **1**:1354-1361.
- Klapperich, H.; Pottler, R. & Willocq, J. 1995. *Shotcrete for Underground Support VII*. Engineering Foundation, New York, p.155-164.
- Krauland, N. 1984. *Rock Bolting and Economy*. International Symposium on Rock Bolting. Balkema. 499-507 p.
- Kusterle, W. & Eichler, K. 1997. Tests with rebound behavior of dry-sprayed concrete. *Tunnelling*. **5**:43-51.

- Kurnia, J. C.; Sasmito, A. P. & Mujumdar, A. S. 2014. Simulation of a novel intermittent ventilation system for underground mines. *Tunnelling and Underground Space Technology*. **42**:206-215.
- Lato, M. J. & Diederichs, M. S. 2014. Mapping shotcrete thickness using LiDAR and photogrammetry data: Correcting for over-calculation due to rockmass convergence. *Tunnelling and Underground Space Technology*. **41**:234-240.
- Leung, C. K. Y.; Lai, R. & Lee, A. Y. F. 2005. Properties of wet-mixed fiber reinforced shotcrete and fiber reinforced concrete with similar composition. *Cement and Concrete Research*. **35**:788-795.
- Li, C. C. 2006. Disturbance of mining operations to a deep underground workshop. *Tunnelling and Underground Space Technology*. **21**:1-8.
- Lienhard IV, J. H. & Lienhard V, J. H. 2011. *A heat transfer textbook*. Cambridge: Phlogiston Press. 762 p., 3 ed.
- Lima, J. R. B. 1992. *Aproveitamento do fosfogesso gerado como subproduto da indústria de fertilizantes fosfatados*. In: *Anais do Seminário Reciclagem de Rejeitos da Indústria Minero Metalúrgica*. Seminário Reciclagem de Rejeitos da Indústria Minero Metalúrgica. Associação Brasileira de Metais. Ouro Preto.
- Liu, W. V.; Apel, D. B. & Bindiganavile, V. S. 2011. Thermal characterization of a lightweight mortar containing expanded perlite for underground insulation. *International Journal of Mining and Mineral Engineering (IJMME)*. **3**(1):55-71.
- Liu, W. V.; Apel, D. B. & Bindiganavile, V. S. 2014. Thermal properties of lightweight dry-mix shotcrete containing expanded perlite aggregate. *Cement & Concrete Composites*. **53**:44-51.
- Luz, C. A.; Cheriaf, M.; Rocha, J. C.; Ambroise, J. & Pera, J. 2005. Estudo de um cimento com baixo impacto ambiental (BIA) a partir do clínquer sulfoaluminoso e do fosfogesso. *Ambiente Construído*. **5**(4):7-27.

- Log, T. & Gustafsson, S. E. 1995. Transient plane source (TPS) technique for measuring thermal transport properties of building materials. *Fire and materials*. **19**(1):43-49.
- Loureiro, F. E. L.; Monte, M. B. M. & Nascimento, M. 2008. Agrominerais - Fosfato. *CETEM*, n.2.
- 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. 147-157 p.
- Malmgren, L. & Nordlund, E. 2006. Behaviour of shotcrete supported rock wedges subjected to blast-induced vibrations. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. **43**:593-615.
- Malmgren, L. & Nordlund, E. 2008. Interaction of shotcrete with rock and rock bolts - A numerical study. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. **45**:538-553.
- Mazzilli, B.; Saueia, C. & Santos, A. J. G. 2000. *Implicações radiológicas do uso do fosfogesso como material de construção no Brasil*. Seminário Desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil: práticas recomendadas. São Paulo. 131-132 p.
- Morrison, D. 2006. Driving Mining Underground. *Engineering & Mining Journal*. **1**:1-4.
- Mpunzi, P.; Masethe, R.; Rizwan, M. & Stacey, T. R. 2015. Enhancement of the tensile strengths of rock and shotcrete by thin spray-on liners. *Tunnelling and Underground Space Technology*. **49**:369-375.
- Neme, M. B.; Curi, A.; Silva, J. M. & Carneiro, A. C. B. 2011. Realização de projeto de lavra de mina subterrânea com utilização de aplicativos específicos. *Revista Escola de Minas*. **64**(4):519-524.

- Nguyen, T. T.; Picandet, V.; Carre, P.; Lecompte, T.; Amziane, S. & Baley, C. 2010. Effect of compaction on mechanical and thermal properties of hemp concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. **14**(5):545-560.
- Oliveira, P. T.; Neto, J. T. D. S.; Resende, D. S. D. & Bezerra, A. C. D. S. 2015. Evaluation of the Use of Waste Gypsum from the Mining Industry in the Production of Mortar for Passive Protection. *Journal of Civil Engineering and Architecture Research*. **2**(1):462-468.
- Paes, V. P. 2001. *Caracterização radioquímica dos isótopos de urânio e tório no fosfogesso*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia Associada À Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- Pérez, R. L.; Álvarez, A. M. V. & Miguel, J. N. 2007. Changes in mobility of toxic elements during the production of phosphoric acid in the fertilizer industry of Huelva (SW Spain) and environmental impact of phosphogypsum wastes. *Journal of Hazardous Materials*. **148**(3):745-750.
- Pessenda, L. C. R.; Nascimento Filho, V. F.; Fernandes, E. A. N. & Ferraz, E. S. B. Determinação de Ra-226 e Th-232 em amostras de fosfatos naturais, gessos industriais e solos superficiais, por espectrometria gama. 1988. *Congresso Geral de Energia Nuclear*. Rio de Janeiro. 403-412 p.
- Pfeuffer, M. & Kusterle, W. 2001. Rheology and rebound behaviour of dry-mix shotcrete. *Cement and Concrete Research*. **31**:1619-1625.
- Prusek, S.; Rotkegel, M. & Malecki, L. 2014. Laboratory tests and numerical modelling of strength-deformation parameters of a shotcrete lining. *Engineering Structures*. **75**:353-362.
- Ramos, M. A. P. 1992. Gesso, reforço na base. *Globo Rural*. **84**:44-45.
- Rosa, R. 1997. *Exposição potencial à radiação natural, no interior de residências, devido ao uso do fosfogesso na indústria da construção civil*. Dissertação de

- Mestrado, Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997. 122 p.
- Saad, S. 2000. *Radiological characterization of the industry of phosphate in Brazil with emphasis on the Itataia project*. International Symposium on the uranium production cycle on the environment. Vienna. 362-366 p.
- Sahu, H. B.; Prakash, N. & Jayanthu, S. 2015. Underground Mining for Meeting Environmental Concerns - A Strategic Approach for Sustainable Mining in Future. *Procedia Earth and Planetary Science*. **11**:232-241.
- Saiang, D.; Malmgren, L. & Nordlund, E. 2005. Laboratory tests on shotcrete-rock joints in direct shear, tension and compression. *Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. **38**(4):275-297.
- Sameera, S. D. S.; Erkan, T. & Ali, A. M. W. 2015. Designing an optimal stope layout for underground mining based on a heuristic algorithm. *International Journal of Mining Science and Technology*. **25**:767-772.
- Samonov, A. E. 2011. New Data on Mineral Forms of Rare Metals in Phosphogypsum Wastes. *Geochemistry*. **440**(2):234-237.
- Santos, A. J. G. 2002. *Avaliação do impacto radiológico ambiental do fosfogesso brasileiro e lixiviação de  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{210}\text{Pb}$* . Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO São Paulo, 2002. 184 p.
- Sasmito, A. P.; Kumia, J. C.; Birgersson, E. & Mujumdar, A. S. 2015. Computational evaluation of thermal management strategies in an underground mine. *Applied Thermal Engineering*. **90**:1144-1150.
- Sengul, O.; Azizi, S.; Karaosmanoglu, F. & Tasdemir, M. A. 2010. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. *Energy and Buildings*. **43**:(2-3):671-676.

- Silva, L. H. C. 1997. *Aspectos econômico-ambientais do uso do fosfogesso na agricultura*. Dissertação de Mestrado, Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.
- Song, H. W. & Lu, S. M. 2001. Repair of a deep-mine permanent access tunnel using bolt, mesh and shotcrete. *Tunnelling and Underground Space Technology*. **16**:235-240.
- Szwedzicki, T. 1989. Geotechnical assessment deficiencies in underground mining. *Mining Science and Technology*. **9**:23-37.
- Teixeira, W.; Toledo, M. C. M.; Fairchild, T. R. & Taioli, F. 2000. *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de Textos. 558 p., 1 ed.
- Topçu, İ. B. & Işıkdağ, B. 2008. Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete. *Journal of Materials Processing Technology*. **204**(1-3):34-38.
- UNSCEAR - UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. 1993. *Effects and Risks of Ionizing Radiations*. New York.
- Warner, J. 1995. Understanding shotcrete - the fundamentals. *Concrete International*. **17**(5):59-64.
- Wills, B. A. & Atkinson, K. 1991. The development of minerals engineering in the 20th century. *Minerals Engineering*. **4**(7-11):643-652.