

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FELIPE CLARO NATARELLI

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO FOSFOGESSO COMO ISOLANTE
TÉRMICO DE TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS. ÍNDICE DE BOND.**

SANTOS/SP
FEVEREIRO - 2020

FELIPE CLARO NATARELLI

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO FOSFOGESSO COMO ISOLANTE TÉRMICO
DE TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS. ÍNDICE DE BOND.**

Dissertação apresentada a Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Dr. Aldo Ramos Santos e coorientação do Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior.

**SANTOS/SP
FEVEREIRO - 2020**

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

698.832 NATARELLI, Felipe Claro.
N277a Avaliação experimental de fosfogesso como isolante
térmico de tubulações industriais. Índice de Bond.
Felipe Claro Ntarelli. - 2020
51 paginas

Orientador: Prof. Dr. Aldo Ramos Santos
Coorientador: Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP,
2020.

1. Fosfogesso. 2. Isolamento térmico. 3. Rocha fosfática.
4. Condutividade térmica. 5. Moinho de bolas.

I.SANTOS, Aldo Ramos. II. MORAES Jr., Deovaldo de III.
Avaliação experimental de fosfogesso como isolante térmico de
tubulações industriais

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas – Unisanta

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Mário Ntarelli e Nilce Ntarelli por todo incentivo e à minha futura esposa Bianca Cavallieri por sempre acreditar no meu potencial a todo o tempo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço os orientadores Dr. Aldo Ramos Santos e Dr. Deovaldo de Moraes Júnior pela confiança e apoio ao longo do desenvolvimento deste trabalho, desde a intenção da realização do mesmo a partir do meu estágio no Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília, onde ambos me apresentaram o mundo da pesquisa e sua importância na engenharia.

Agradeço o Prof. Dr. Vitor da Silva Rosa pelas relevantes contribuições no que concerne ao tratamento estatístico dos resultados e correções do texto, e também como uma das pessoas que mais me incentivaram ao longo dos trabalhos.

Agradeço todo o corpo docente e funcionários envolvidos no Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu, por serem incrivelmente solícitos e atenciosos em todas as etapas deste projeto.

Agradeço os técnicos da Universidade Santa Cecília, Volnei de Lemos, Vitor Dias, Álvaro Luiz Moreira Conrado e Irineu Penha da Ressurreição, pela colaboração no desenvolvimento dos trabalhos, seja na adaptação da unidade experimental ou com ótimas sugestões de aprimoramento dos ensaios.

Agradeço os estagiários voluntários do Laboratório de Operações Unitárias e, em especial, ao Matheus Nifo Gloria e Felipe Cunha da Silva, que ajudaram na condução dos experimentos.

RESUMO

A indústria de fertilizantes fosfatados é de grande importância mundial, entretanto esta produz o resíduo denominado fosfogesso, que hoje não possui um meio adequado e eficiente de reaproveitamento, obrigando a própria indústria a gerenciar sua disposição em pilhas próximas ao sítio de produção. Este trabalho visou qualificar o uso do fosfogesso sem acréscimo de aditivos como isolante térmico de tubulações e encontrar o índice de trabalho de Bond para cominuição. Foi utilizado um moinho de bolas de bancada e um conjunto de 09 peneiras entre 4,0 mm e 0,25 mm de abertura, mensurando o diâmetro médio das partículas antes e depois da moagem. Um sistema com uma resistência de cobre alimentado por um gerador de corrente, chamado de método do fio quente, foi isolado com moldes de fosfogesso em meia-cana e a condutividade térmica foi determinada com o auxílio de termopares inseridos na peça. Foram encontrados valores de índice de trabalho entre 3,5 e 21 kWh/t e de condutividade térmica entre 0,0975 e 0,1916 W/m.K. As peças de fosfogesso foram usadas para isolar um sistema aquecido por vapor, que variou entre 107,87 kPa e 127,49 kPa, verificando-se a queda do fluxo de calor conforme o aumento de sua espessura. Encontrou-se o raio crítico de 0,01571 m para a pressão de 117,68 kPa. Concluiu-se que a melhor eficiência de moagem do fosfogesso em moinho de bolas se deu em rotações entre 26% e 62% da velocidade crítica em um tempo de 10 minutos, assim como o uso de fosfogesso como isolamento térmico é viável para temperaturas de 323 K (30 °C) até 587 K (314 °C). Foram propostas três equações para o índice de trabalho de Bond (w_i , kWh/t) em função da rotação do moinho: $w_{i,10\min} = 0,0078.N^2 - 1,1108.N + 51,776$, $w_{i,20\min} = 0,002.N^2 - 0,2185.N + 14,235$ e $w_{i,30\min} = 0,0022.N^2 - 0,2531.N + 10,679$, sendo N em RPM, Foi obtida a equação quadrática $k = -2.10^{-6}.T^2 + 0,0021.T - 0,3498$, com T em K, para a condutividade térmica em W/m.K, válida para a faixa de temperatura supracitada.

Palavras Chave: Fosfogesso. Isolamento Térmico. Rocha Fosfática. Condutividade Térmica. Moinho de Bolas.

ABSTRACT

The phosphate fertilizer industries have an enormous importance in everyone's life, therefore it largely produces the residue phosphogypsum, which does not follow an appropriated way of reuse, obligating those who produce to manage its disposal, often in giant piles near the industry. This paper focused in qualifying phosphogypsum as a thermal insulation material for piping and to discover the phosphogypsum Bond work index for comminution. A bench-sized ball mill system was used, with 09 strainers between 4,0 mm and 0,25 mm of diameter, measuring particles average diameter before and after the comminution. A copper wire heated by a current generator, known as hot wire method, was insulated with two halves, cylinder-shaped molded phosphogypsum and the thermal conductivity was determined with thermometers inserted in it. The values of Bond work index encountered were between 3.5 and 21 KWh/t and thermal conductivity found were between 0,0975 and 0,1916 W/m.K. Molded phosphogypsum was used to insulate a steam heated system, varying 107,87 kPa and 127,49 kPa, observing reduction of the heat flow as the insulation thickness was increased. The critical thickness of insulation (or critical radius) of 0,01571 m was found with a pressure of 117,68 kPa. The conclusion is that phosphogypsum ball mill highest efficiency is found with mill speed from 26% to 62% of critical speed in 10 minutes, and the use of phosphogypsum as thermal insulation is practicable for temperatures between 323 K and 587 K. Three equations are proposed for Bond work index (w_i , kWh/t) dependent of ball mill speed: $w_{i,10min} = 0,0078.N^2 - 1,1108.N + 51,776$, $w_{i,20min} = 0,002.N^2 - 0,2185.N + 14,235$ and $w_{i,30min} = 0,0022.N^2 - 0,2531.N + 10,679$, where N is RPM. The quadratic equation $k = -2.10^{-6}.T^2 + 0,0021.T - 0,3498$, where T is K, for thermal conductivity in W/m.K was found, available for the temperature range exposed above.

Keywords: Phosphogypsum. Thermal Insulation. Phosphate Rock.
Thermal Conductivity. Ball Mill.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pilha de fosfogesso a céu aberto.....	13
Figura 2 - Bloco para construção civil feito com fosfogesso.	15
Figura 3 - Isolante térmico para tubulações.....	16
Figura 4 - Fluxo de calor na direção radial em tubulação.	17
Figura 5 - Moinho de bolas.....	23
Figura 6 - Bandejas com fosfogesso na estufa.	27
Figura 7 - Peneiras no vibrador.	28
Figura 8 - Moinho de bolas em escala industrial reduzido.	29
Figura 9 – Molde para confecção do isolamento de fosfogesso do tipo meia cana.....	30
Figura 10 - Peça de fosfogesso moldada em meia cana.	30
Figura 11 - Equipamento usado para medir a condutividade térmica.....	33
Figura 12 - Tubulação isolada e medição de temperaturas..	34
Figura 13 - Posição dos termopares no isolamento.	35
Figura 14 - Sistema aquecido por caldeira elétrica.	35
Figura 15 - Análise granulométrica na preparação do material.....	36
Figura 16 - Análise granulométrica para a rotação de 45 RPM.....	37
Figura 17 - Análise granulométrica para a rotação de 60 RPM.....	37
Figura 18 - Análise granulométrica para a rotação de 75 RPM.....	38
Figura 19 - Análise granulométrica para a rotação de 90 RPM.....	39
Figura 20 - Análise granulométrica para a rotação de 105 RPM.....	39
Figura 21 - Índice de Trabalho de Bond para o fosfogesso em função da rotação do moinho de bolas.....	40
Figura 22 - Valores de condutividade térmica pelo método do fio quente.	42
Figura 23 - Fluxo de calor do sistema para as espessuras do isolamento.....	43
Figura 24 - Fluxo de calor do sistema simulado para espessuras de até 100 mm.	43
Figura 25 - Intervalos de condutividade térmica de vários materiais em temperatura ambiente.....	44
Figura 26 - Espessura ótima EO1 para a pressão de 1,1 Kgf/cm ²	46
Figura 27 - Espessura ótima EO2 para pressão de 1,2 Kgf/cm ²	47
Figura 28 - Espessura ótima EO3 para pressão de 1,3 Kgf/cm ²	47
Figura 29 - Comparação entre silicato de cálcio e fosfogesso (peso).	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Índice de trabalho médio e densidade relativa de alguns materiais a úmido	25
Tabela 2 - Abertura das peneiras de série Tyler/MESH.	28
Tabela 3 - Organização dos ensaios.	32
Tabela 4 - Diâmetros médios para a rotação de 45 RPM.	37
Tabela 5 - Diâmetros médios para a rotação de 60 RPM.	38
Tabela 6 - Diâmetros médios para a rotação de 75 RPM.	38
Tabela 7 - Diâmetros médios para a rotação de 90 RPM.	39
Tabela 8 - Diâmetros médios para a rotação de 105 RPM.	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NPK	–	Nitrogênio-Fósforo-Potássio
RMBS	–	Região Metropolitana da Baixada Santista
FF	–	Fosfogesso
RPM	–	Rotações por minuto

LISTA DE SÍMBOLOS

$\dot{q}$	–	Taxa de transferência de calor (W)
k	–	Coeficiente de condutividade térmica ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
A	–	Área de secção transversal ao fluxo térmico (m^2)
dT/dr	–	Gradiente de temperatura ($\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$)
L	–	Comprimento do cilindro (m)
r	–	Raio do cilindro (m)
r_1	–	Raio interno (m)
r_2	–	Raio externo (m)
T_1	–	Temperatura interna (K)
T_2	–	Temperatura externa (K)
R_{cond}	–	Resistência condutiva em paredes cilíndricas ($\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$)
R_{conv}	–	Resistência convectiva em paredes cilíndricas ($\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$)
h	–	Coeficiente convectivo ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
k_p	–	Condutividade térmica da parede do cilindro ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
k_{iso}	–	Condutividade térmica do isolamento térmico ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
h_1	–	Coeficiente convectivo na superfície interna do cilindro ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
h_4	–	Coeficiente convectivo na superfície externa do cilindro ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
δw	–	Unidade de massa dos sólidos
dD	–	Variação de tamanho
K	–	Constante dos equipamentos de moagem
n	–	Coeficiente de Kick, Rittinger e Bond
W	–	Potência total consumida no moinho de bolas (kW)
w_i	–	Índice de trabalho de Bond (kWh/t)
C	–	Carga total do moinho (t/h)
D_1	–	Diâmetro médio do material antes da moagem (mm)
D_2	–	Diâmetro médio do material após a moagem (mm)
m_r	–	Massa do braço com a força do motor (kg)
$m_{\text{braço}}$	–	Massa do braço livre (kg)
g	–	Aceleração da gravidade (m/s^2)
$L_{\text{braço}}$	–	Comprimento do braço (m)
N	–	Rotação por minuto (RPM)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 OBJETIVO PRINCIPAL	26
2 MATERIAL E MÉTODO.....	26
2.1 PRIMEIRA ETAPA - PREPARAÇÃO DO MATERIAL	26
2.2 SEGUNDA ETAPA – MOLDAGEM DO FOSFOGESSO	29
2.3 TERCEIRA ETAPA – DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE TRABALHO DE BOND PARA O FOSFOGESSO	31
2.4 QUARTA ETAPA – DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA E RAO CRÍTICO	32
2.5 QUINTA ETAPA - APLICAÇÃO DO FOSFOGESSO PARA DETERMINAR O FLUXO DE CALOR DO SISTEMA	33
2.5.1 – ESPESSURA ÓTIMA.....	35
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
3.1) ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL	36
3.2) ÍNDICE DE TRABALHO DE BOND PARA O FOSFOGESSO	36
3.3) COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA E RAO CRÍTICO.....	41
3.4) FLUXO DE CALOR DO SISTEMA.....	42
4 CONCLUSÃO.....	49
5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	50
6 REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

A indústria de fertilizantes têm se mostrado um dos pilares da sociedade atual e, em vista do crescimento populacional acelerado e alta demanda por alimento, não é de se surpreender que este segmento industrial esteja se aprimorando constantemente (SAUEIA, 1998).

Os fertilizantes têm como base nitrogênio, fósforo e potássio – conhecidos como NPK. Durante o processo de obtenção de ácido fosfórico, o resíduo fosfogesso (FF) é gerado como subproduto. A produção de FF é um problema que atinge todos os produtores de ácido fosfórico, com uma taxa de produção entre 4,5 e 5,5 toneladas para cada tonelada de ácido produzido (MAIA, 2016). Normalmente o FF é disposto em pilhas próximas aos sítios de produção. A reação simplificada de obtenção do ácido fosfórico, no processo de via úmida, se dá pela rocha fosfática ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$) sendo reagida com ácido sulfúrico (H_2SO_4), gerando assim ácido fosfórico (H_3PO_4) e, principalmente, os subprodutos FF ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e ácido fluorídrico (HF), conforme a Equação 1:

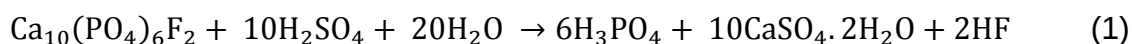


Figura 1 - Pilha de fosfogesso a céu aberto. Fonte: <http://www.clubedoconcreto.com.br/2013/07/inovacao-um-novo-material-de-construcao.html> (Acesso em 27/09/19)

Apesar de o FF ter características muito similares ao gesso ou gipsita (FERRARI, 2012) existem diversas impurezas provenientes da extração da rocha fosfática, tais como quartzo, fluoretos, fosfatos, minerais de alumínio e ferro e matéria orgânica (RUTHERFORD, 1996).

Por este motivo, diversas linhas de pesquisa foram geradas com o objetivo de tornar o FF útil, após o mínimo de beneficiamento, uma vez que o retorno desse material quase não é possível, visto que os sítios de extração são, em praticamente todos os casos, muito distantes das indústrias que o produzem, inviabilizando financeiramente este procedimento. As aplicações mais conhecidas do FF são agricultura e construção civil.

1) Agricultura

O consumo de FF na agricultura no país chegou a 4,5 milhões de toneladas por ano em 2004 (AQUINO apud CANUT, 2006). O FF tem sido usado como aditivo no solo, em função do fósforo residual (P_2O_5), e por conter água livre (15% a 20%), cálcio e enxofre (ambos entre 14% a 20%), podendo ser adicionado aos solos que possuam as seguintes características (RUTHERFORD, 1996)(NUERNBERG et al, 2005):

- a) Acidez elevada;
- b) Presença de argila dispersíveis em água;
- c) Camada subsuperficial compactada, naturalmente ou pela ação de equipamentos agrícolas.

O FF também pode promover significativas reduções na resistência da camada compactada do solo, pois quando aplicado na superfície o mesmo é dissolvido pela água da chuva e promove infiltração da água, evitando o encrostamento e melhorando a germinação das sementes (NUERNBERG et al, 2005)

2) Construção civil

O uso do FF na indústria cimenteira alcança 1,7 milhões de toneladas por ano (AQUINO apud CANUT, 2006). No Japão, o FF é utilizado como aglomerante na

produção de placas e blocos, devido à escassez de matéria-prima e, da mesma forma, como substituto da gipsita nas construções, com ótimos resultados (CANUT, 2006)(VILLAYERDE, 2008). No entanto, para ser adicionado ao clínquer na fabricação de cimento tipo Portland, o FF deve passar por etapas de beneficiamento para remoção do F e P_2O_5 , pois estas impurezas possuem efeito retardante na pega e diminui sua resistência (MAIA, 2016).



Figura 2 - Bloco para construção civil feito com fosfogesso. Fonte: <http://www.ecodesenvolvimento.org/noticias/fosfogesso-solucao-sustentavel-para-a-construcao> (Acesso em 27/10/2019)

3) Isolamento térmico

Dentre as demais aplicações, vale ressaltar, como foco do presente trabalho, o uso de FF como isolante térmico. O consumo de energia na indústria é tão importante que se não houver a devida atenção a este assunto o custo pode inviabilizar a produção. A economia necessária, inclusive em processos com baixas temperaturas, muitas vezes só é possível pelo uso correto de isolamento térmico em equipamentos e processos, ou ainda a reutilização de energia quando se deseja diminuir a temperatura em determinada etapa, aproveitando esta em outra fase da produção. A escolha do isolante pode afetar o rendimento do processo, uma vez que devem ser especificados corretamente seu dimensionamento, condutividade térmica e características físico-químicas.

INCROPERA E DEWITT (2008) indicam que a maioria dos isolantes industriais é feita a base de amianto, sílica, carbonato de magnésio, lã de rocha e de

vidro, cortiça, fibra cerâmica, plásticos expandidos, aglomerados de fibras vegetais e silicato de cálcio. Os autores listam as principais características de um isolante térmico:

- 1) Baixo coeficiente de condutividade térmica;
- 2) Baixa capacidade higroscópica;
- 3) Baixa massa específica;
- 4) Resistência mecânica compatível com sua finalidade;
- 5) Estabilidade química.



Figura 3 - Isolante térmico para tubulações.
<http://www.acusterm.com.br/produto/la-de-rocha>
(Acesso em 09/09/2019).

A condutividade térmica é a característica fundamental na escolha do isolante por ser a propriedade física que mensura a capacidade de se transmitir calor (ÇENGEL, 2009). Pode ser traduzida como a quantidade de calor transmitida por determinada espessura e direção x à superfície do material, unidimensionalmente, pela diferença de temperatura, independentemente do tempo, conforme a Equação de Fourier, indicada pela Equação 2:

$$\dot{q} = -kA \frac{dT}{dr} \quad (2)$$

Em que:

- $\dot{q}$ é a taxa de transferência de calor na direção x (W)
 k é o coeficiente de condutividade térmica ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
 A é a área de secção transversal ao fluxo térmico (m^2)
 $\frac{dT}{dr}$ é o gradiente de temperatura ($\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$)

O sinal negativo se dá pelo gradiente de temperatura ser negativo, para que o fluxo de calor seja positivo. Considerando um tubo em coordenada cilíndrica e condução de calor unidimensional por seu raio r , além de regime permanente, o fluxo de calor pode ser calculado através da Equação 3. Na Figura 4 está apresentado um esquema de uma tubulação com isolamento térmico.

$$\dot{q} = -kA \frac{dT}{dr} \quad (3)$$

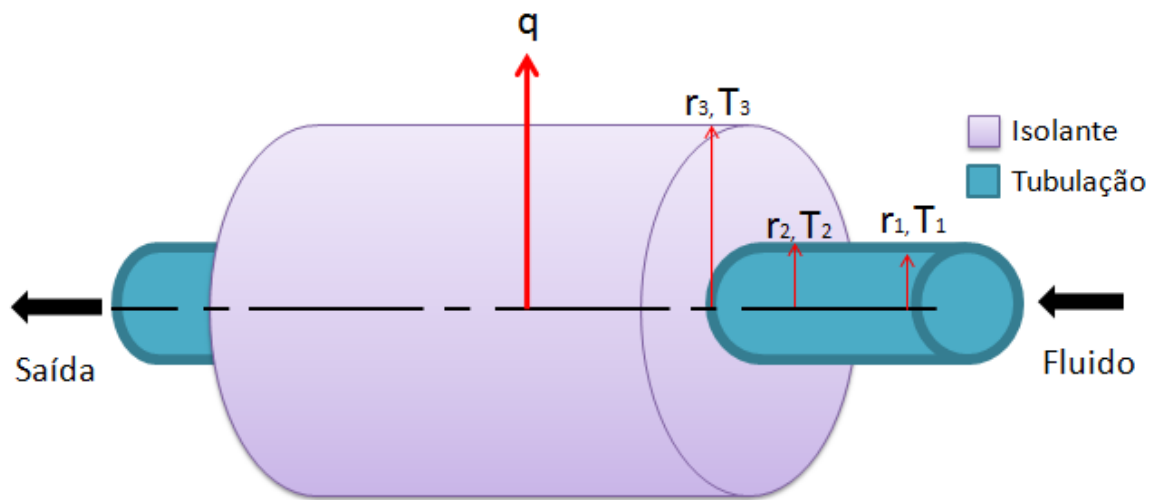


Figura 4 - Fluxo de calor na direção radial em tubulação.

A área lateral do cilindro é representada conforme a Equação 4:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \quad (4)$$

Em que:

L é o comprimento do cilindro (m)
r é o raio do cilindro (m)

Realizando a substituição da Equação 4 em 3 e organizando os termos, têm-se:

$$\dot{q} \frac{dr}{r} = -k \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot dT \quad (5)$$

Integrando a Equação 5 entre o raio inicial de controle (interno) e o raio final de transmissão de calor analisado (externo), obtêm-se a equação de condução unidimensional de calor para formas cilíndricas em regime permanente:

$$\dot{q} = \frac{k \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_1 - T_2)}{\left(\ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (6)$$

Em que:

r_1 é o raio interno (m)
 r_2 é o raio externo (m)
 T_1 é a temperatura interna (K)
 T_2 é a temperatura externa (K)

Com o intuito de determinar a espessura ótima do isolante, ou seja, aquela que corresponde a distância mínima para o melhor resultado, é necessário conhecer a resistência térmica à transferência de calor, possibilitada por uma analogia entre a Equação de Fourier adaptada a configurações cilíndricas (Equação 6) e a lei de Ohm, por seguirem condições semelhantes. Desta forma, a taxa de calor ($\dot{q}$) e a diferença de temperatura (ΔT) podem ser comparadas à corrente elétrica (i) e diferença de potencial (ΔU), respectivamente. Já as resistências representam a dificuldade da transferência calor, similar às cargas elétricas. Estas comparações são evidenciadas na Equação 7 (condução) e Equação 8 (convecção):

$$R_{\text{cond}} = \frac{\left(\ln \frac{r_3}{r_2}\right)}{k \cdot 2 \cdot \pi \cdot L} \quad (7)$$

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{r_3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot h} \quad (8)$$

Em que:

R_{cond} é a resistência condutiva em paredes cilíndricas ($K \cdot W^{-1}$)

R_{conv} é a resistência convectiva em paredes cilíndricas ($K \cdot W^{-1}$)

h é o coeficiente convectivo na parede externa da tubulação ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

O sistema cilíndrico representado pela Figura 4 terá sua taxa de transferência de calor definida de acordo com a diferença de temperatura da fonte energética e o meio ambiente e as resistências térmicas existentes, conforme a Equação 9:

$$\dot{q} = \frac{(T_1 - T_{\text{amb}})}{\frac{1}{r_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot h_1} + \frac{\left(\ln \frac{r_2}{r_1}\right)}{k_p \cdot 2 \cdot \pi \cdot L} + \frac{\left(\ln \frac{r_3}{r_2}\right)}{k_{\text{iso}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot L} + \frac{1}{r_3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot h_4}} \quad (9)$$

Em que:

k_p é a condutividade térmica da parede do cilindro ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

k_{iso} é a condutividade térmica do isolamento térmico ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

h_1 é o coeficiente convectivo na superfície interna do cilindro ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

h_4 é o coeficiente convectivo na superfície externa do isolante ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

Apesar do nome, o isolamento térmico, se dimensionado incorretamente, pode executar o trabalho inverso: se tornar uma aleta, aumentando a taxa de transferência de calor. Conforme a Figura 4, a resistência a esta transferência se dá pelo isolante, entretanto existe a resistência exercida pelo ar, que não deve ser desconsiderada. As condições do ambiente onde se encontra a tubulação isolada podem influenciar na escolha do isolante. Sendo assim, a resistência total a

transmissão de calor na configuração cilíndrica por unidade de comprimento segue conforme Equação 10 e 11 (MORAES, 2011).

$$R_{\text{total}} = \frac{\left(\ln \frac{r_3}{r_2}\right)}{k_{\text{iso}} \cdot 2 \cdot \pi} + \frac{1}{r_3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot h_4} \quad (10)$$

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{k_{\text{iso}} \cdot 2 \cdot \pi} (\ln r_3 - \ln r_2) + \frac{r_3^{-1}}{2 \cdot \pi \cdot h_4} \quad (11)$$

Com a intenção de encontrar o raio que oferece menor resistência, também conhecido como raio crítico (r_c), deriva-se a equação e iguala-se a zero, de acordo com as Equações 12 a 15.

$$\frac{dR_{\text{total}}}{dr_3} = 0 \quad (12)$$

$$R'_{\text{total}} = \frac{1}{k_{\text{iso}} \cdot 2 \cdot \pi} \left(\frac{1}{r_3} - 0 \right) + \frac{-1 r_3^{-1-1}}{2 \cdot \pi \cdot h_4} = 0 \quad (13)$$

$$R'_{\text{total}} = \frac{1}{k_{\text{iso}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_3} - \frac{r_3^{-2}}{2 \cdot \pi \cdot h_4} = 0 \quad (14)$$

$$R'_{\text{total}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_3} \cdot \left(\frac{1}{k_{\text{iso}}} - \frac{1}{r_3 h_4} \right) = 0 \quad (15)$$

Para validar o resultado da Equação um dos termos deve ser igual à zero. Sendo assim, obtêm-se a Equação 16.

$$\left(\frac{1}{k_{\text{iso}}} - \frac{1}{r_3 h_4} \right) = 0 \quad (16)$$

Adequando a equação determina-se a Equação 17 que define o raio crítico.

$$r_3 = r_c = \frac{k_{iso}}{h_4} \quad (17)$$

Desta maneira conclui-se que o r_c é o raio em que a taxa de transferência é máxima e a resistência é mínima. Para fins de isolamento, o raio do isolante deve ser superior ao raio crítico para que a taxa de transferência de calor seja reduzida (MORAES Jr, 2011).

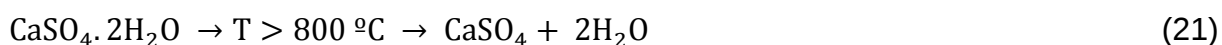
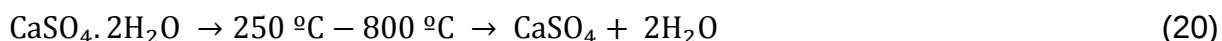
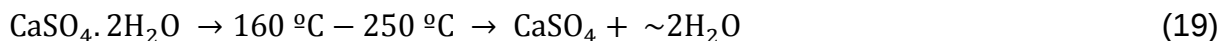
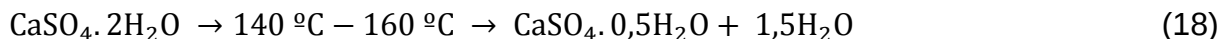
Em função do uso do isolamento térmico existirá a redução do fluxo de calor, reduzindo o custo com aquecimento ou resfriamento. No caminho contrário, o valor investido no isolante aumenta conforme a área total a ser isolada. Para encontrar a espessura ótima e sua consequente redução de custos, deve ser levado em consideração (NOGUEIRA, 2005):

- a) Custo do isolante e da geração de vapor;
- b) Depreciação dos materiais empregados e equipamentos;
- c) Amortização do investimento;
- d) Custo da manutenção do isolante;
- e) Temperatura e dimensões dos equipamentos;
- f) Tempo de operação.

Com a intenção de realizar a moldagem do FF como isolamento térmico em configurações cilíndricas, este deve ser partido em metades, comumente visto como peças de “meia-cana”. Entretanto, a pega do FF não é simples como a do gesso comum. Na pilha de FF o tamanho dos grãos é irregular e possuem diversas impurezas. Sendo assim, se faz necessário a submissão do material a etapas de beneficiamento. Este procedimento visa tratar o material em suas características físico-químicas, térmicas e/ou mecânicas, dependendo da finalidade.

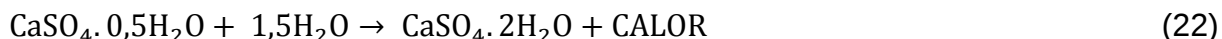
Dentre os tratamentos térmicos, existe a calcinação, que é um processo de desidratação da gipsita. O material é mantido sob temperaturas da ordem de 140 °C a 160 °C, com a intenção de se obter o hemidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) conforme Equação 18. Para se obter a anidrita III (CaSO_4 com teor de $\text{H}_2\text{O} \approx 0$) a temperatura deve estar entre 160 °C e 250 °C (Equação 19). Com temperaturas entre 250 °C e

800 °C obtêm-se anidrita II (Equação 20) e anidrita I com temperaturas acima de 800 °C (Equação 21).



O hemidrato e anidrita são normalmente usados na construção civil e na criação de artefatos (CANUT, 2006). As anidritas II e I possuem resistência mecânica elevada e processo de cura mais lento (SILVA apud CANUT, 2006).

A cura do gesso por meio de hidratação (adição de água) faz o material se dissociar em SO_4^{2-} e Ca^{2+} por meio de reação química exotérmica, originando os cristais de di-hidrato conforme a Equação 22:



Os cristais se desenvolvem em configurações finas e compridas, se entrelaçando, aumentando sua resistência mecânica (HINCAPIÉ e CINCOTTO, 1997). A velocidade da pega do material é diretamente influenciada pelos seguintes fatores:

- a) **Temperatura e tempo de calcinação:** temperaturas elevadas e tempo de calcinação maior retardam a pega do material, entretanto sua resistência é elevada;
- b) **Tamanho das partículas:** Com o aumento da superfície de contato específica com o material a pega pela hidratação será mais rápida e também requererá mais água;
- c) **Volume de água necessário:** A razão água/gesso é o parâmetro principal na pega do gesso. O excesso de água aumentará o tempo de saturação do

material, retardando a pega;

- d) **Presença de impurezas:** Resíduos e impurezas agregados ao material desde sua extração ou outras etapas de reação e misturas atuam como aglomerantes, acelerando o tempo de pega;
- e) **Aditivos:** Controladores de pega podem acelerar ou retardar o processo quando adicionados. Existem produtos orgânicos e inorgânicos disponíveis que desenvolvem esta função, dependendo do ambiente de aplicação do gesso.

O processo de fragmentação de sólidos (ou cominuição) é utilizado na indústria para reduzir o tamanho dos materiais, sejam eles matéria-prima ou produto final, como rocha, areia, brita, gesso e até alimentos como trigo, sementes e açúcar. Trata-se de uma operação unitária que pode ser executada por meio de corte, atrito, compressão e impacto (MORAES Jr, 2011). Algumas das vantagens de diminuir o tamanho das partículas são o aumento da superfície de contato superficial, o que melhora, por exemplo, os processos de extração, secagem, aquecimento, resfriamento, mistura e homogeneização das partículas para comercialização e cinética reacional mais precisa. Os equipamentos usados neste processo podem ser classificados de acordo com a partícula a ser fragmentada. Britadores são empregados na fragmentação de partículas desde 1500 mm até 5 mm, aproximadamente. Os moinhos reduzem as partículas de aproximadamente 5 mm até 0,00001 mm (0,01 μm)(GOMIDE, 1983).

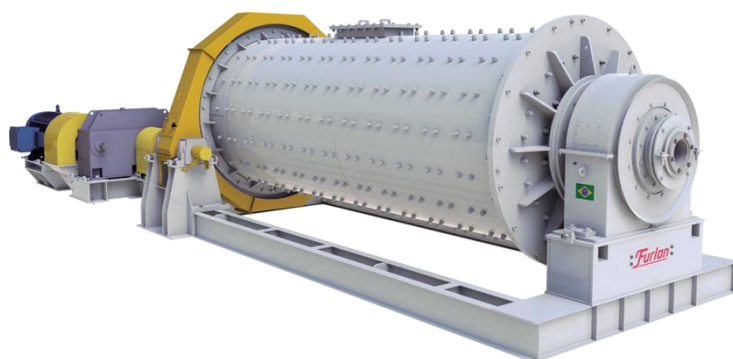


Figura 5 - Moinho de bolas. <http://www.furlan.com.br/moinho-bolas.php> (Acesso em 09/09/2019).

Quanto aos moinhos, os principais são os moinhos de martelo, moinhos de bola, britadores de mandíbula e trituradores de rolo. O moinho de bolas é um vaso cilíndrico que possui cerca de 50% de seu volume preenchido com esferas, por exemplo, de alumina, e o material a ser moído a seco ou em suspensão (BRUNATTO, 2017). O espaço livre serve para a movimentação das esferas e do material. O vaso é girado sobre seu eixo e as esferas comprimem o material e o comprimem contra a parede, ocorrendo principalmente cominuição por impacto.

O moinho de bolas é recomendado para cominuição de sólidos com dimensão média de 50 mm até 1 mm e dureza, em geral, igual ou abaixo de 5 na escala Mohs, que classifica a resistência dos materiais ao esmagamento. A escala, em ordem crescente de dureza, é: 1) Talco; 2) Gipsita; 3) Calcita; 4) Fluorita; 5) Apatita; 6) Feldspato; 7) Quartzo; 8) Topázio; 9) Corindo e 10) Diamante.

A moagem é um procedimento que possui baixo rendimento energético, pois a maior parte da energia empregada é dissipada na suspensão do material, atrito e a deformação elástica das esferas e outra grande parte se dissipa em forma de calor (KWADE apud BRUNATTO, 2017) (GOMIDE, 1983). Ainda assim, existe um limite para a rotação do moinho, visto que em determinada velocidade as esferas acompanharão a rotação do mesmo, com a eficiência tendendo a zero, chamada rotação ou velocidade crítica. Para prever a quantidade de energia dissipada nesse sentido, o recurso empregado tem sido leis empíricas antigas como a lei de Kick e a de Rittinger, e uma mais recente como a lei de Bond. Apesar dos estudos terem sido em laboratório, todas as leis tiveram como base uma equação diferencial que relaciona o trabalho elementar necessário para fragmentar a unidade de massa dos sólidos ($-\delta w$) com a variação de tamanho ($-dD$):

$$-\delta w = K \frac{-dD}{D^n} \quad (23)$$

A constante K depende do tipo de equipamento usado para moagem e o tipo de material, determinada experimentalmente para cada situação particular. O expoente n é uma constante que varia para cada lei. As leis de Kick, Rittinger e Bond utilizam os valores 1, 2 e 1,5, respectivamente. Nas propostas de Kick e Rittinger o resultado realmente obtido demonstra apenas alterações no consumo energético de sistemas já em operação. Já a lei de Bond substitui a constante K por

índice de trabalho do material (Tabela 1), que é a energia necessária para reduzir a unidade de peso do material desde um tamanho bastante grande até uma granulometria 80% passante em 100 μ (BOND, 1952), e a carga C, que é a capacidade do moinho em t/h. A equação integrada obtida pela lei de Bond leva a estimativas mais realistas de consumo energético e é capaz de prever o consumo de uma máquina a ser empregada, conforme a Equação 24:

$$-W = w_i \cdot C \cdot 0,3162 \left(\frac{1}{\sqrt{D_2}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right) \quad (24)$$

Em que:

-W é a potência total consumida (kW)

w_i é o índice de trabalho do material (kWh/t)

C é a capacidade do equipamento (t/h), conforme Equação 25:

$$C = \frac{\text{carga (t)}}{\text{tempo de moagem (h)}} \quad (25)$$

D_1 é o diâmetro médio do material antes da moagem (mm)

D_2 é o diâmetro médio do material após a moagem (mm)

Tabela 1 - Índice de trabalho médio e densidade relativa de alguns materiais a úmido (GREEN, 2018 - adaptado)

Material	Densidade Relativa	Índice de Trabalho (w_i , kWh/t)
Areia	2,65	16,46
Argila	2,23	7,10
Calcário	2,69	11,61
Carbonato de Cálcio	3,00	8,77
Carvão	1,63	11,70
Coque	1,51	20,70
Fertilizante fosfático	2,65	13,03
Rocha fosfática	2,66	10,13
Minério de ferro	3,96	15,44
Vidro	2,58	3,08

1.1 Objetivo Principal

O presente trabalho visou avaliar o fosfogesso como isolante térmico industrial e encontrar seu índice de trabalho de Bond.

A pesquisa foi definida em cinco etapas conforme seguem:

- 1) Preparação do material;
- 2) Moldagem do fosfogesso em “meia-cana”;
- 3) Determinação do índice de trabalho de Bond para o fosfogesso;
- 4) Quantificação o coeficiente de condutividade térmica do fosfogesso;
- 5) Aplicação do fosfogesso em sistema de aquecimento.

2 MATERIAL E MÉTODO

2.1 Primeira Etapa - Preparação do material

O fosfogesso utilizado para os ensaios foi doado por uma empresa de fertilizantes da RMBS, que utiliza rocha fosfática proveniente do Peru. O material recebeu dois estágios de beneficiamento: secagem e moagem.

No estágio de secagem (Figura 6) o material foi disposto em formas rasas e submetido à temperatura de 60 °C em estufa até alcançar massa constante e assim mantido até ser utilizado no estágio de moagem.



Figura 6 - Bandejas com fosfogesso na estufa.

No estágio de moagem, 10% do volume do moinho em fosfogesso (aproximadamente 360 mL, medido em bureta com queda livre de 300 mm) passaram por um conjunto de nove peneiras com aberturas conforme Tabela 2, em um vibrador por 10 minutos (Figura 7). Este volume foi escolhido por ser suficiente para ocupar os espaços vazios entre as esferas dentro do moinho, respeitando o volume final ocupado recomendado de 50% (GOMIDE, 1983). Ilustra-se Figura 8 o moinho utilizado e seus equipamentos. Ao final da operação de vibração, cada peneira foi pesada. Em seguida, o FF foi cominuído pelo moinho com esferas de alumina com diâmetro médio de 30 mm, preenchendo, conforme citado anteriormente, 50% do volume do vaso de cerâmica de 3,6 L. Foi utilizado um motor de $\frac{1}{4}$ de hp de potência acoplado a um conjunto de roletes, dotado de inversor de frequência, capaz de ajustar a rotação do vaso para 75 rpm com o auxílio de um tacômetro, durante 20 minutos. Esta velocidade e tempo foram escolhidos por serem intermediárias às condições estudadas na obtenção do índice de trabalho de Bond, exemplificado no item 2.3. Após a moagem, o material passou novamente pelo mesmo conjunto de peneiras, submetido ao agitador, por mais 10 minutos e foram pesadas novamente.

Com estes procedimentos foi obtido o diâmetro médio das partículas, gerando uma dispersão de pontos a partir da fração retida por determinada peneira e a que antecede, considerando a média das aberturas das mesmas. Sendo assim, o diâmetro médio das partículas, *in natura* e após a moagem, foi encontrado no

ponto da curva de tendência média que indique a passagem de 80% da massa total (ou 20% da massa retida)(BOND, 1952). Foram realizadas seis repetições a 75 rpm e 20 minutos. O material retido nas peneiras 9 a 7, após a segunda agitação foi descartado devido à aglomeração de impurezas presentes na rocha fosfática.

Tabela 2 - Abertura das peneiras de série Tyler/MESH.

N° Peneira	Tyler/MESH	Abertura (mm)	Diâmetro médio (mm)
9	5	4	> 3,4
8	7	2,8	3,4
7	9	2	2,4
6	12	1,34	1,67
5	24	0,71	1,025
4	32	0,5	0,605
3	42	0,355	0,4275
2	60	0,25	0,3025
1	Fundo	-	$\leq 0,3025$



Figura 7 - Peneiras no vibrador.

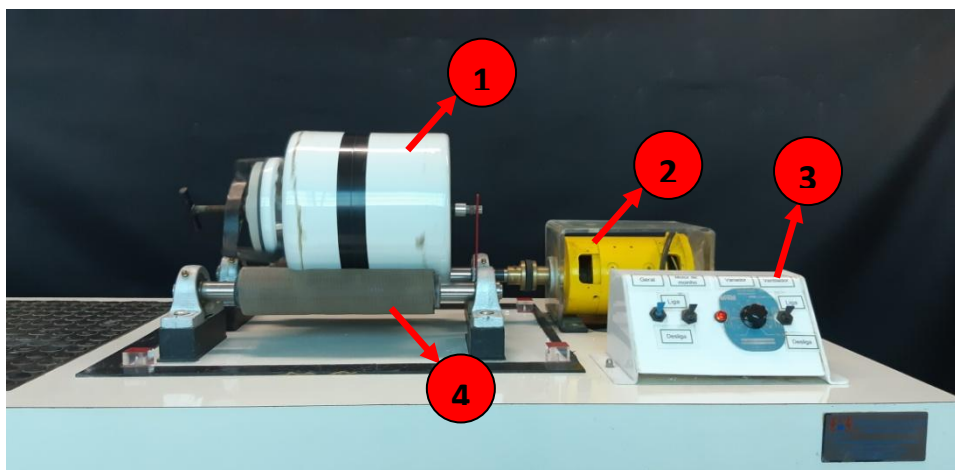


Figura 8 - Moinho de bolas em escala industrial reduzido. 1) Vaso cerâmico de 3,6 L; 2) Motor; 3) Controladores e inversor de frequência e 4) Roletes.

2.2 Segunda Etapa – Moldagem do fosfogesso

Após o beneficiamento do FF na primeira etapa, o material retornou para a estufa, na temperatura de 160 °C por 2 horas, tornando-o hemidrato. Em seguida, o FF foi retirado, disposto em uma forma e foi adicionada água deionizada e, com o auxílio de uma espátula, foi realizada a homogeneização da mistura. A quantidade de água adicionada corresponde à razão de 1 kg de água / 2 kg de FF. Essa razão foi definida experimentalmente, pois foi constatada que a cura do material foi mais rápida a partir desta, impossibilitando a moldagem do material.

Com o intuito de moldar o material em meia-cana (cilindro bipartido) foi utilizado um tubo de PVC com 3" de diâmetro e 200 mm de comprimento cortado longitudinalmente ao meio (molde) onde a mistura foi depositada. Duas peças de madeira foram usadas para fechar o molde, uma em cada extremidade, e foi apoiado um tubo de PVC de 3/4" de diâmetro e comprimento superior a 200 mm, atravessando ambas as peças de madeira, de forma centralizada com o fundo do molde para demarcar a posição da tubulação na qual o isolante será aplicado. Desta forma, a espessura final da peça foi de 35 mm. Para fixar o molde, foi construído um berço utilizando uma base de madeira e dois apoios também em meia-cana, conforme a Figura 9:

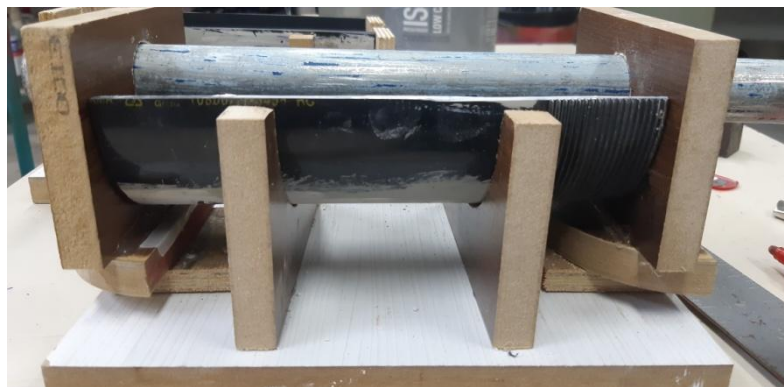


Figura 9 – Molde para confecção do isolamento de fosfogesso do tipo meia cana.

Com o molde finalizado, foi adicionada uma chapa metálica na região superior possibilitando aplicar pressão no FF por meio de pesos distribuídos, os quais somavam 10,5 kg. O molde foi mantido em estufa a 60 °C durante 48 horas. Esta temperatura foi escolhida por auxiliar a água livre a evaporar, sem afetar o processo de cura. Foram constatadas pequenas rachaduras na peça com temperaturas superiores. Após este período, o FF foi retirado do molde e mantido por mais 24 horas em estufa, também a 60 °C, por já possuir resistência mecânica suficiente para não ter suas dimensões e formas alteradas pelo manuseio. Ao final das 72 horas, o FF estava pronto para ser utilizado na tubulação a ser isolada. Os moldes de FF foram feitos em quantidade suficiente para isolar a tubulação indicada na quarta etapa, conforme Figura 10.



Figura 10 - Peça de fosfogesso moldada em meia cana.

2.3 Terceira etapa – Determinação do índice de trabalho de Bond para o fosfogesso

Os procedimentos para a terceira etapa foram similares aos da preparação do material, exceto pela velocidade do moinho e o tempo de rotação. As velocidades do moinho foram de 45, 60, 75, 90 e 105 RPM. Para cada velocidade, foram realizados três ensaios para os tempos de 10, 20 e 30 minutos, totalizando 45 ensaios. Estas velocidades são justificadas pela sensibilidade do inversor de frequência disponível. A relação dos ensaios está indicada na Tabela 3.

Um braço de 514 mm foi acoplado ao motor em balanço e, com o auxílio de uma balança, foi pesada a força do motor e encontrada a potência conforme a Equação 26:

$$W = 0,001396 \cdot (m_r - m_{\text{braço}}) \cdot L_{\text{braço}} \cdot N \quad (26)$$

Em que:

W	é a potência consumida (cv)
m_r	é a massa do braço com a força da rotação do motor (kg)
$m_{\text{braço}}$	é a massa do braço livre (kg)
$L_{\text{braço}}$	é o comprimento do braço (m)
N	é a rotação do moinho (rpm)

Com a potência consumida encontrada com o auxílio da Equação 26, o valor foi substituído na Equação 24 para obter o valor de w_i .

Tabela 3 - Organização dos ensaios.

Rotação por Minuto (RPM)	Tempo (min)	% Velocidade Crítica
45	10	26,47
	20	
	30	
60	10	35,29
	20	
	30	
75	10	44,12
	20	
	30	
90	10	52,94
	20	
	30	
105	10	61,76
	20	
	30	
170	-	100

2.4 Quarta etapa – Determinação do coeficiente de condutividade térmica e raio crítico

Foi utilizado o método do fio quente para a quantificação da condutividade térmica, conforme descrito por SANTOS *et. al.*, 2004, que consiste na passagem de corrente contínua por uma resistência, gerando energia térmica a fluxo constante. Empregou-se um sistema com um gerador, provendo corrente elétrica de até 3,0 A, passando em uma resistência de 270 mm de comprimento e 0,15 mm de diâmetro, similar ao experimento realizado por MAIA, 2016, isolada por fosfogesso moldado com 25 mm de espessura, como exemplificada na Figura 11. Neste método, junto com a unidade experimental, foi considerado:

- a) A relação comprimento por raio (L/R) maior que 10;
- b) A geração de calor e seu fluxo constantes;
- c) Temperatura constante quando atingido regime permanente;
- d) A condução de calor unidimensional ao longo da resistência.

As temperaturas foram lidas através de 04 termopares inseridos na peça de fosfogesso, às distâncias de 0 (encostado na resistência), 7, 14 e 21 mm, respectivamente. Substituindo os valores encontrados na Equação 6, foi possível determinar o coeficiente de condutividade térmica. Os experimentos ocorreram até a estabilização das temperaturas. O raio crítico foi determinado pela Equação 17.

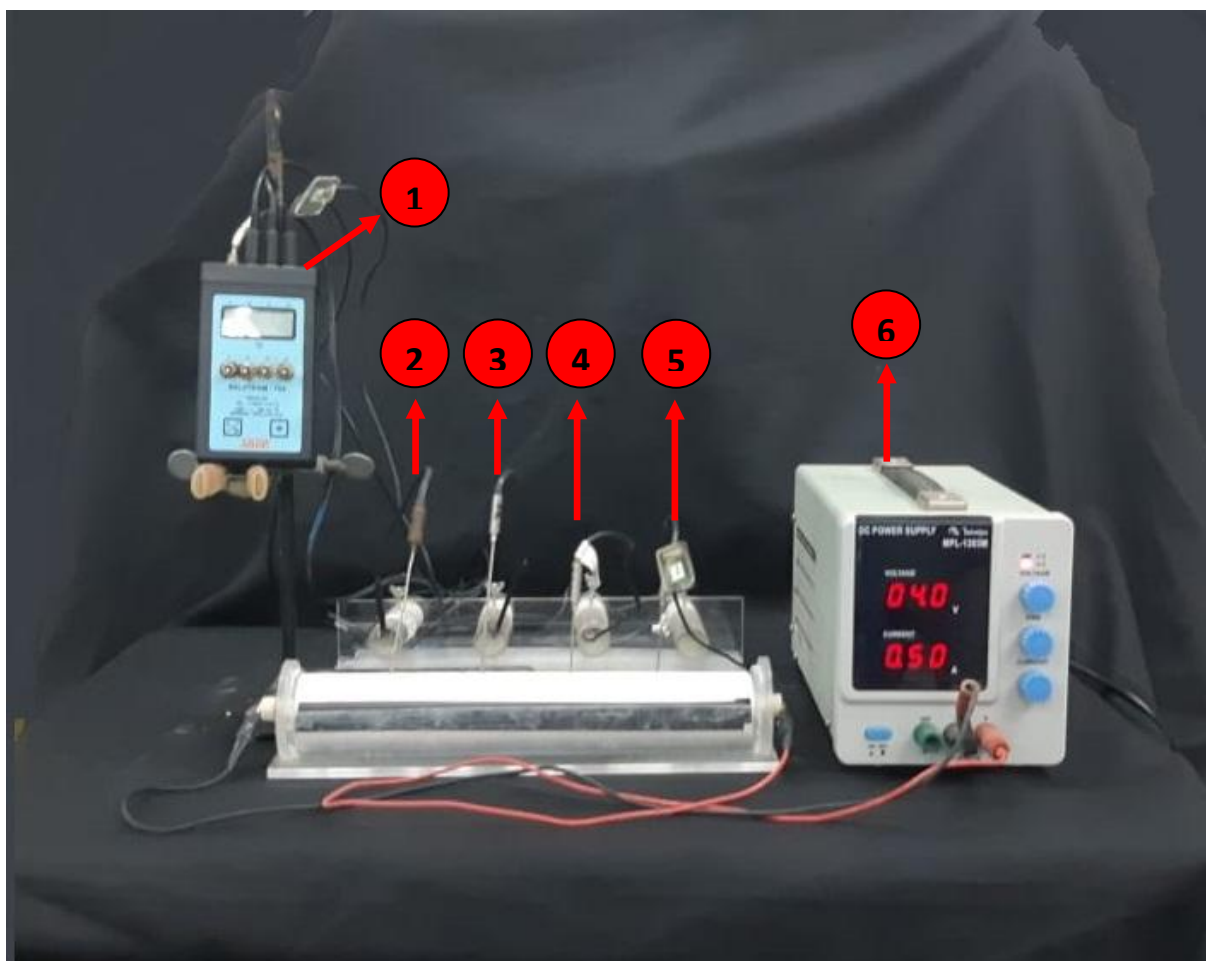


Figura 11 - Equipamento usado para medir a condutividade térmica.
1) Leitor digital de temperatura, 2 a 5) Termopares encostado, a 7, 14 e 21 mm da resistência e 6) Fonte de alimentação de corrente contínua.

2.5 Quinta etapa - Aplicação do fosfogesso para determinar o fluxo de calor do sistema

Na quinta etapa, as peças de 25, 35 e 60 mm de espessura foram dispostas para cobrir uma tubulação de ferro galvanizado de $\frac{3}{4}$ " e um trecho de 600 mm de comprimento, na qual vapor saturado foi admitido. O vapor saturado foi gerado por

uma caldeira elétrica de 6 kW de potência. O equipamento e o isolante na tubulação são exemplificados na Figura 12, 13 e 14.

Os ensaios foram realizados com pressões entre 107,87 e 127,49 kPa, com cada espessura indicada. A vazão de vapor foi obtida com a sua condensação inserindo a extremidade final da tubulação em um tanque com massa de água conhecida. A massa do tanque foi pesada a cada 30 minutos de ensaios. Os ensaios duraram tempo suficiente para que as temperaturas se tornassem constantes. O fluxo de calor foi determinado usando a Equação 9, com o coeficiente de condutividade térmica encontrado na etapa anterior.

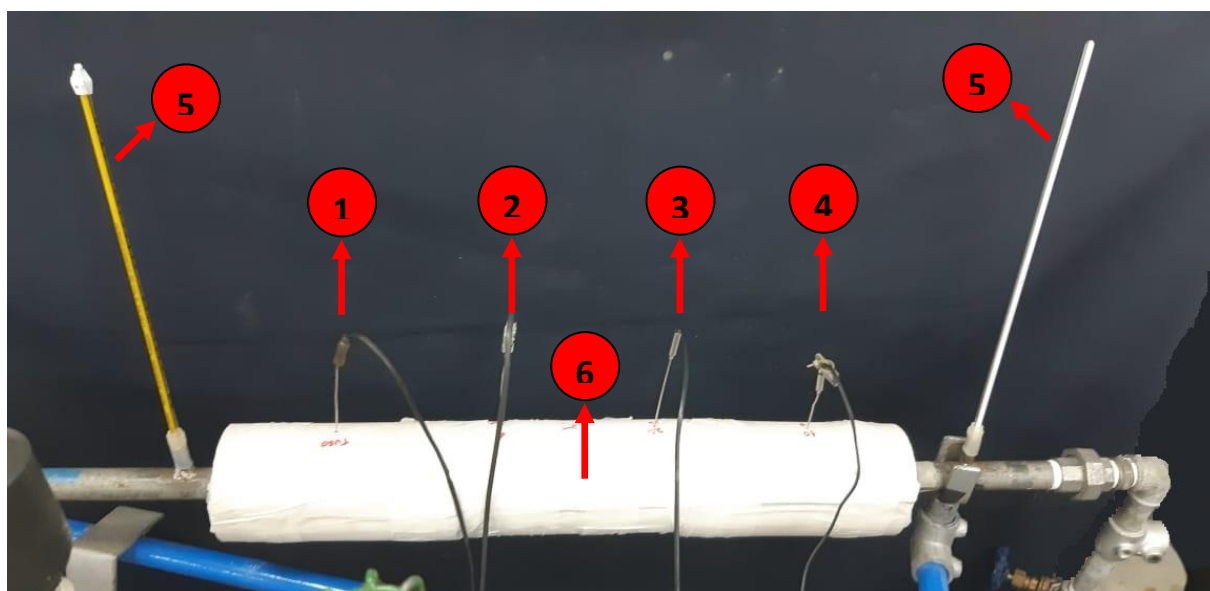


Figura 12 - Tubulação isolada e medição de temperaturas. 1 a 4) Termopar encostado na tubulação, a 10mm, a 20mm e a 30mm da tubulação, respectivamente, 5) Termômetros do vapor saturado e 6) Isolamento térmico de fosfogesso.

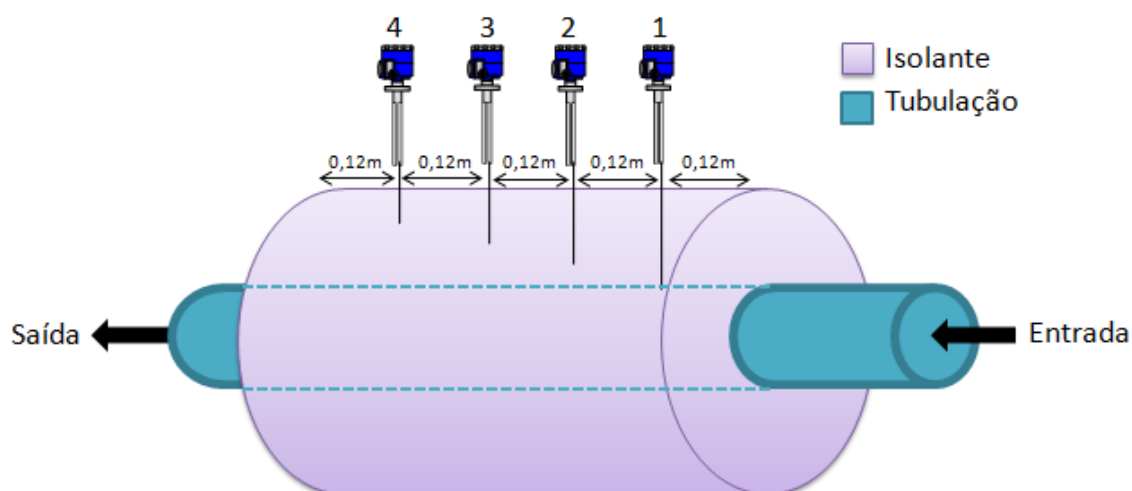


Figura 13 - Posição dos termopares no isolamento.

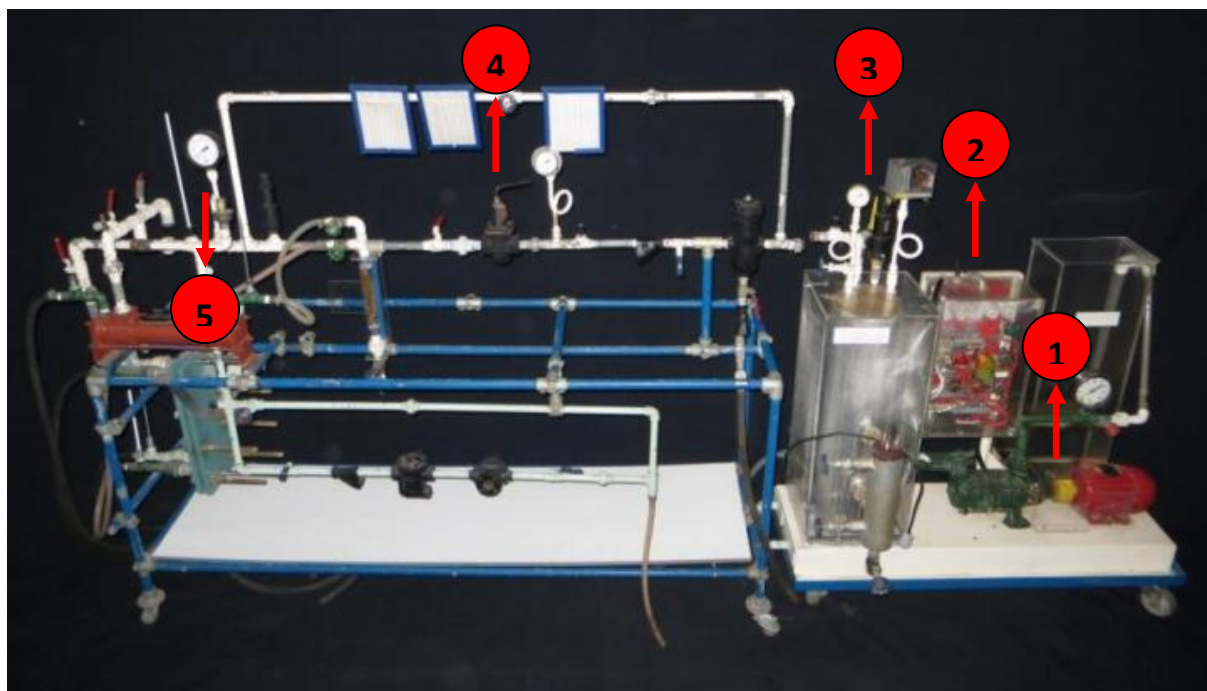


Figura 14 - Sistema aquecido por caldeira elétrica. 1) Motor e bomba centrífuga de 5 estágio, 2) Controladores, 3) Caldeira elétrica, 4) Válvula redutora de pressão e 5) Manômetro.

2.5.1 – Espessura ótima

Empregou-se para a determinação da espessura ótima os dados de condutividade térmica, custo do isolante e consumo energético para produção de vapor. A soma do custo do isolante por espessura com o custo energético resultou no consumo total anual.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1) Análise granulométrica do material

As porcentagens de massa retida nas bandejas para todos os ensaios são apresentadas na Figura 15. Com o auxílio da nuvem de pontos, foi encontrado o diâmetro médio das partículas, anterior e após a moagem.

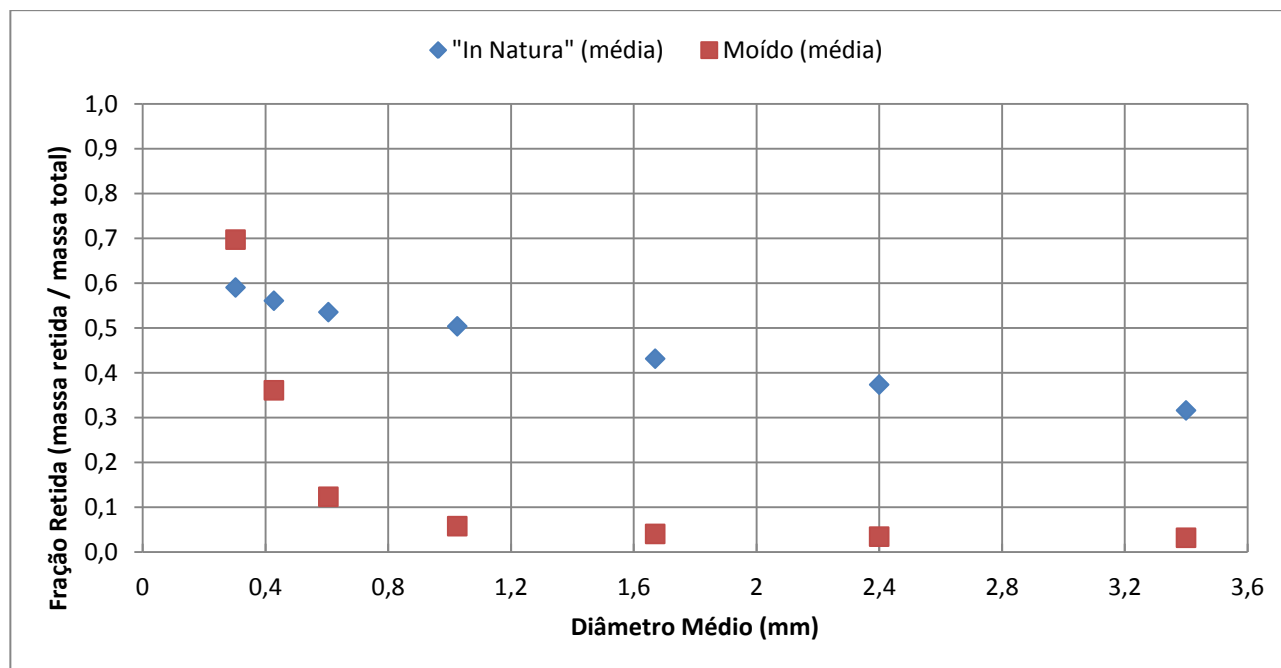


Figura 15 - Análise granulométrica na preparação do material.

Todos os ensaios de granulometria anteriores a moagem mostraram diâmetro médio igual ou superior a 3,4 mm. Já os ensaios posteriores à moagem demonstraram um diâmetro médio de 0,5073 mm. Conforme a razão água/fosfogesso se aproximava de 1:2 o material ganhou resistência mecânica rapidamente. Desta forma, foi possível aplicar pressão à peça com anilhas metálicas logo em seguida e posterior submissão à estufa.

3.2) Índice de Trabalho de Bond para o Fosfogesso

As porcentagens de massa retida nas bandejas para cada rotação são apresentadas nas Figuras de 16 até 20. Os resultados exibidos nestas figuras são as médias das triplicatas para cada tempo para o material *in natura* e após a moagem. Com o auxílio da nuvem de pontos, foi encontrado o diâmetro médio das

partículas, mostrados nas Tabelas 4 a 8. Os valores de Índice de Trabalho são expostos na Figura 21.

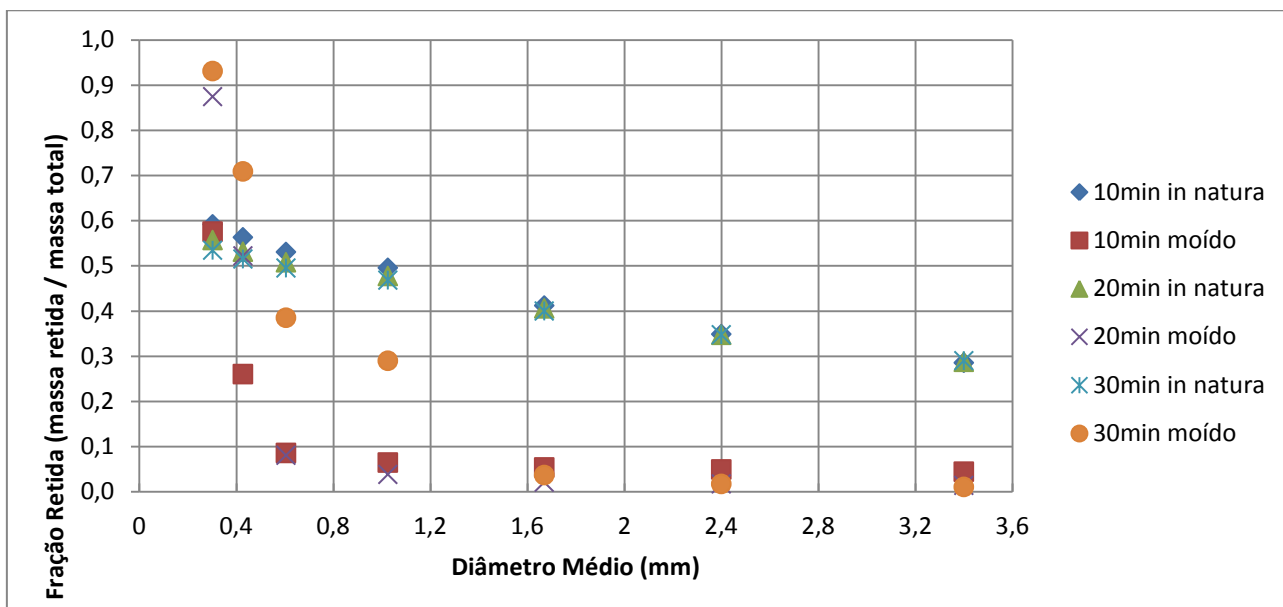


Figura 16 - Análise granulométrica para a rotação de 45 RPM.

Tabela 4 - Diâmetros médios para a rotação de 45 RPM.

Tempo	<i>In natura</i>	Moído
10 minutos	> 3,4 mm	0,4176 mm
20 minutos	> 3,4 mm	0,5422 mm
30 minutos	> 3,4 mm	0,7674 mm

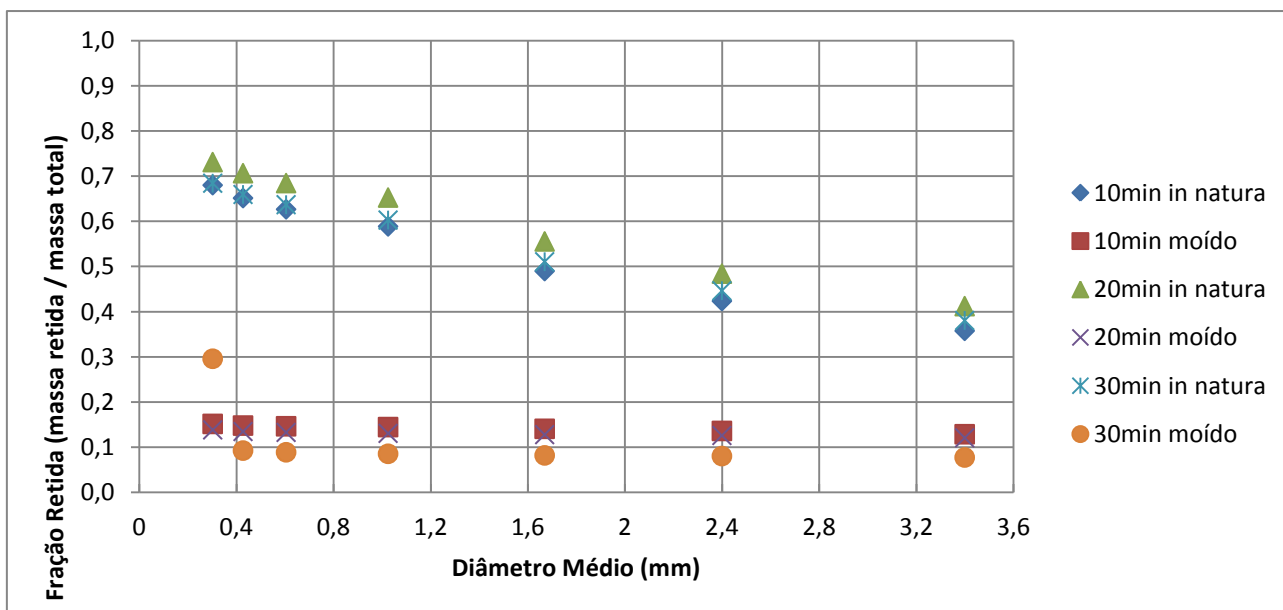


Figura 17 - Análise granulométrica para a rotação de 60 RPM.

Tabela 5 - Diâmetros médios para a rotação de 60 RPM.

Tempo	<i>In natura</i>	Moído
10 minutos	> 3,4 mm	$\leq 0,3025\text{mm}$
20 minutos	> 3,4 mm	$\leq 0,3025\text{mm}$
30 minutos	> 3,4 mm	$\leq 0,3025\text{mm}$

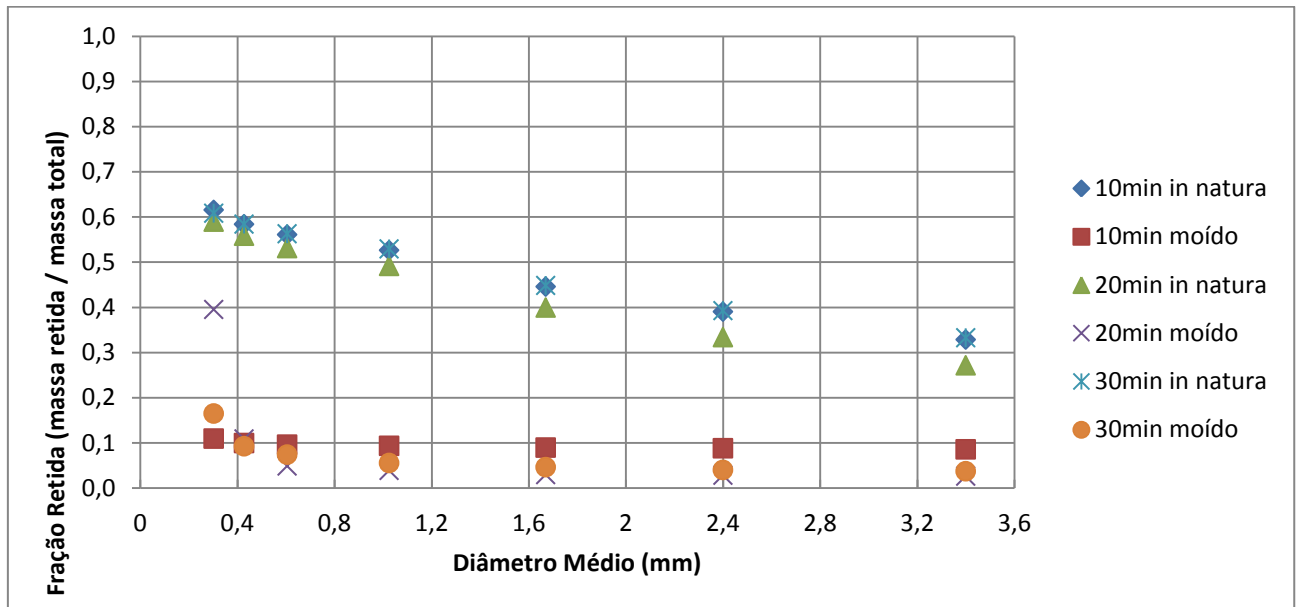


Figura 18 - Análise granulométrica para a rotação de 75 RPM.

Tabela 6 - Diâmetros médios para a rotação de 75 RPM.

Tempo	<i>In natura</i>	Moído
10 minutos	> 3,4 mm	$\leq 0,3025\text{mm}$
20 minutos	> 3,4 mm	0,34 mm
30 minutos	> 3,4 mm	$\leq 0,3025\text{mm}$

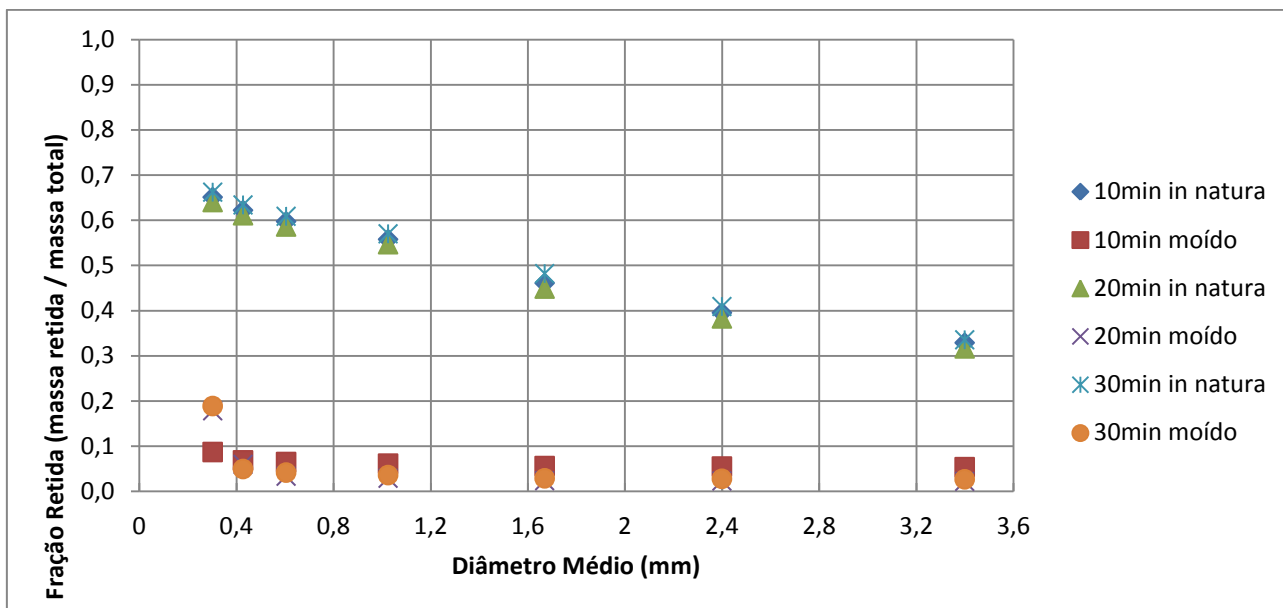


Figura 19 - Análise granulométrica para a rotação de 90 RPM.

Tabela 7 - Diâmetros médios para a rotação de 90 RPM.

Tempo	<i>In natura</i>	Moído
10 minutos	> 3,4 mm	$\leq 0,3025\text{mm}$
20 minutos	> 3,4 mm	0,3183 mm
30 minutos	> 3,4 mm	0,3108 mm

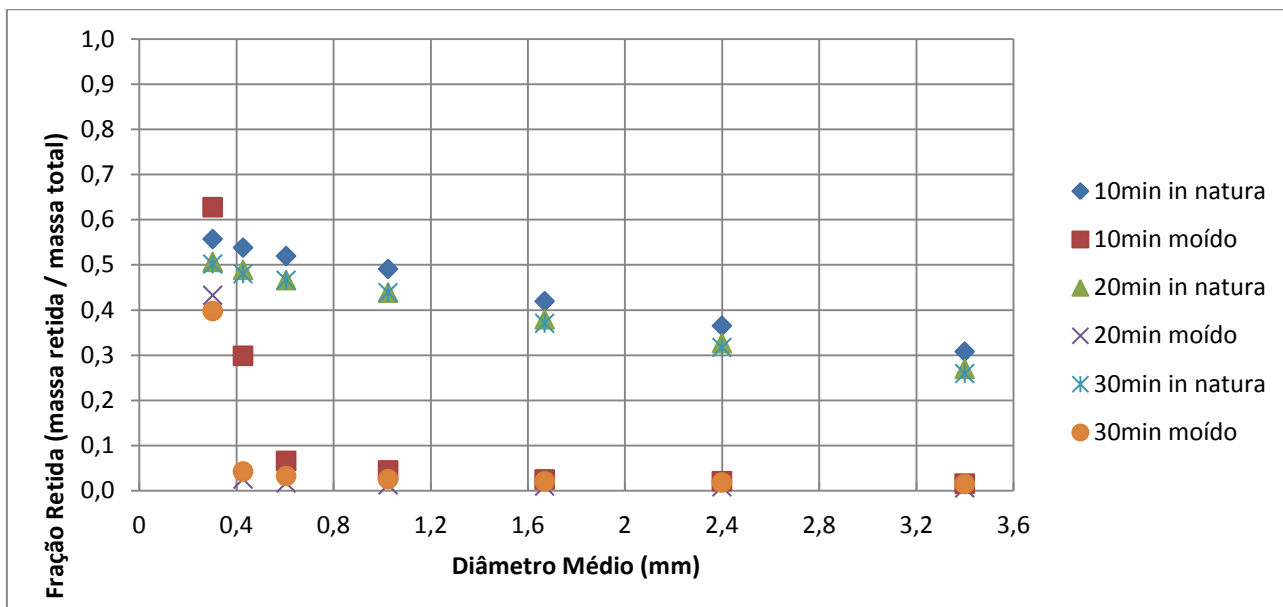


Figura 20 - Análise granulométrica para a rotação de 105 RPM.

Tabela 8 - Diâmetros médios para a rotação de 105 RPM.

Tempo	<i>In natura</i>	Moído
10 minutos	> 3,4 mm	0,4283 mm
20 minutos	> 3,4 mm	$\leq 0,3025\text{mm}$
30 minutos	> 3,4 mm	0,3342 mm

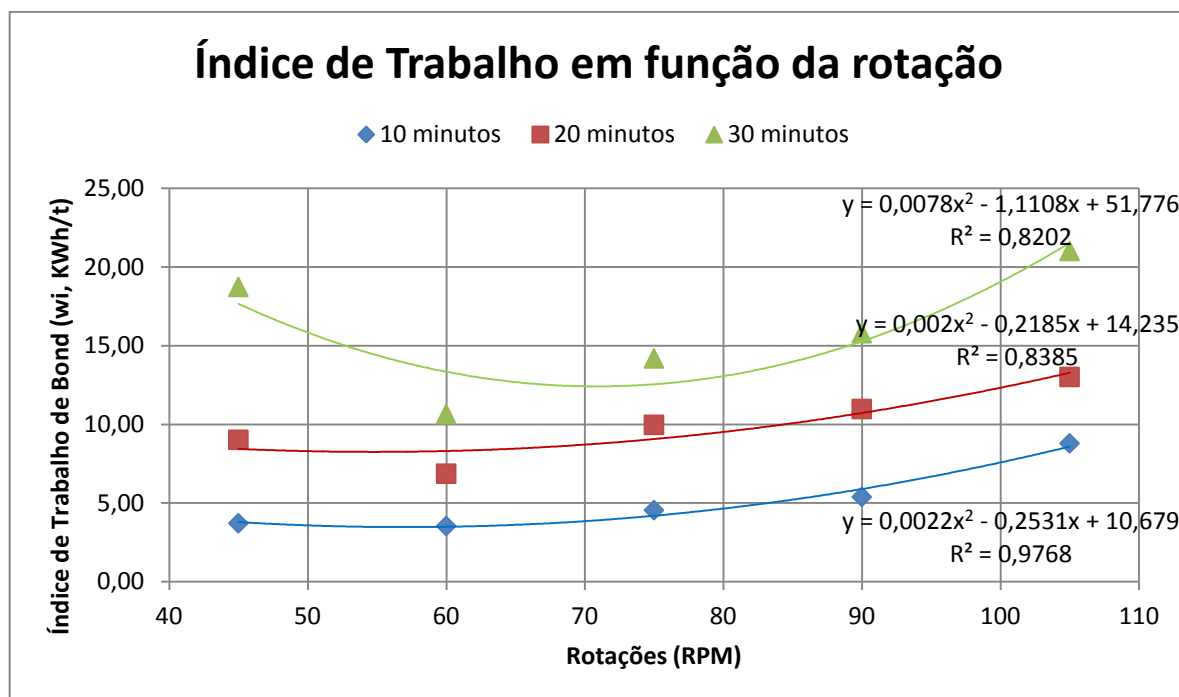


Figura 21 - Índice de Trabalho de Bond para o fosfogesso em função da rotação do moinho de bolas.

Os valores de índice de trabalho de Bond (Figura 21) indicam um menor valor nos experimentos de 45, 60 e 75 rpm. Na rotação de 45 rpm (Tabela 4) pode-se notar que, com o aumento do tempo de ensaio, o diâmetro médio também aumentou. Isto pode ser indício de que apenas o processo de compressão ocorreu, pois a partir de algum tempo a cominuição deixa de ocorrer e o material inicia um processo de agregação. Este fato pode ser ligado à baixa velocidade do equipamento. Sendo assim, esta velocidade deve ser utilizada com cautela no processo de cominuição do fosfogesso, pois fornecerá um diâmetro médio maior do que as demais velocidades estudadas.

Nas rotações de 60, 75 e 90 rpm, o valor de w_i obteve um leve aumento em consonância com a velocidade do moinho. O diâmetro médio do material foi praticamente o mesmo, destacando-se a velocidade de 60 rpm, na qual todos os ensaios forneceram o menor diâmetro possível, dentro dos limites de precisão deste estudo. Já a 105 rpm, o diâmetro médio foi ligeiramente maior que os demais ensaios, com exceção da velocidade de 45 rpm. Esta tendência pode estar relacionada com a alta velocidade do equipamento, na qual parte das esferas acompanhava o movimento rotacional do moinho, cessando a cominuição. Todavia, o valor de w_i foi o maior de todos os ensaios, em todas as velocidades. Consequentemente, foi a velocidade que mais consumiu energia.

Com os dados expostos na Figura 21 foi possível deduzir as Equações de 27 a 29 para o índice de trabalho de Bond em função da velocidade do moinho de acordo com o tempo de operação, conforme seguem:

a) Tempo de 10 minutos ($R^2 = 0,8202$):

$$w_{i,10min} = 0,0078.N^2 - 1,1108.N + 51,776 \quad (27)$$

b) Tempo de 20 minutos ($R^2 = 0,8385$):

$$w_{i,20min} = 0,002.N^2 - 0,2185.N + 14,235 \quad (28)$$

c) Tempo de 30 minutos ($R^2 = 0,9768$):

$$w_{i,30min} = 0,0022.N^2 - 0,2531.N + 10,679 \quad (29)$$

Os resultados dos experimentos e as equações propostas explicitam que o valor de índice de trabalho de Bond varia conforme as condições de funcionamento do moinho, indo na contramão dos valores constantes disponibilizados na literatura.

3.3) Coeficiente de condutividade térmica e raio crítico

Os valores encontrados de condutividade térmica são expostos na Figura 22. As temperaturas dos experimentos foram entre 303,15 K (30 °C) e 587,15 K (314 °C), na parede do isolante. Os cálculos foram realizados somente após a estabilização do sistema, considerando a triplicata dos experimentos. A partir da curva gerada, o valor de k pode ser calculado entre as referidas temperaturas, com o auxílio da Equação 30:

$$k = -2.10^{-6}.T^2 + 0,0021.T - 0,3498 \quad (30)$$

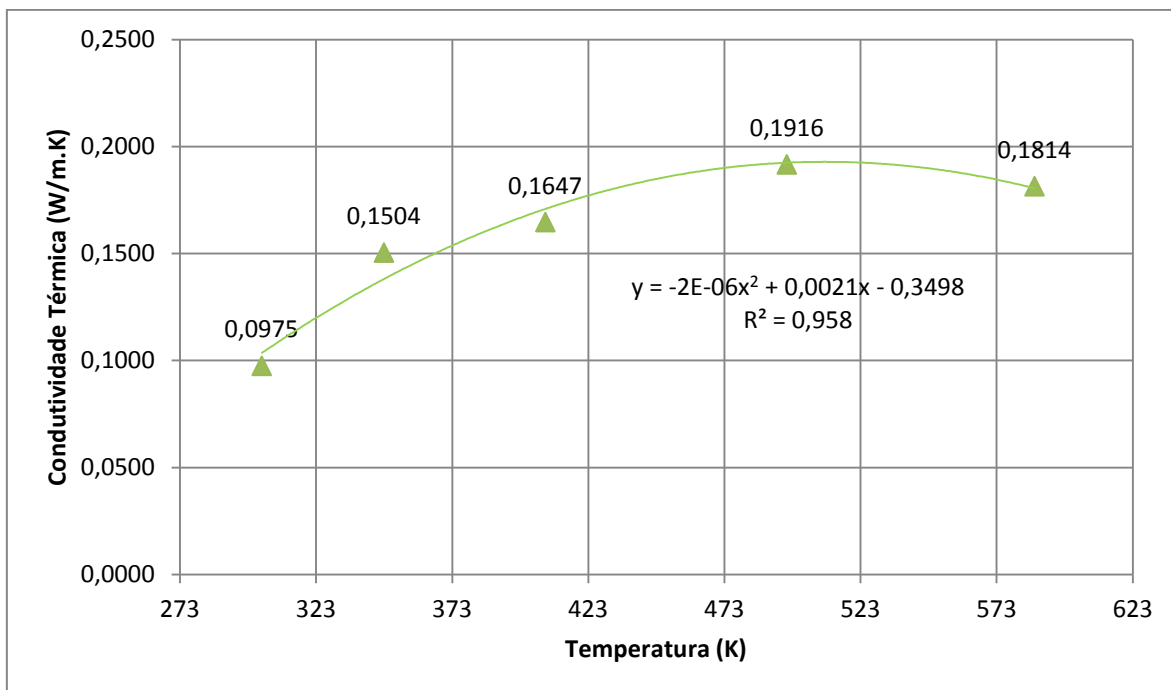


Figura 22 - Valores de condutividade térmica pelo método do fio quente.

O raio crítico foi calculado com o valor de k e o coeficiente convectivo na parede do isolante, sendo este o do ar (ÇENGEL, 2009), substituindo os valores na Equação 17, resultando na Equação 31. Para o cálculo da condutividade térmica, foi utilizada a temperatura de 376,15 K (103 °C) na Equação 30, que corresponde à temperatura encontrada nos experimentos de fluxo de calor, sob pressão de vapor de 1,2 Kgf/cm², resultando em 0,1571 W/m.K. Os demais cálculos do trabalho foram realizados com base neste valor de condutividade térmica.

$$r_c = \frac{0,1571 \frac{\text{W}}{\text{m.K}}}{10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2.\text{K}}} = 0,01571 \text{ m} \quad (31)$$

3.4) Fluxo de calor do sistema

Na Figura 23 é mostrado o fluxo de calor do sistema no sistema de aquecimento por vapor com o isolamento de fosfogesso, para todas as espessuras. Assim como a condutividade, os cálculos foram realizados após a estabilização das temperaturas.

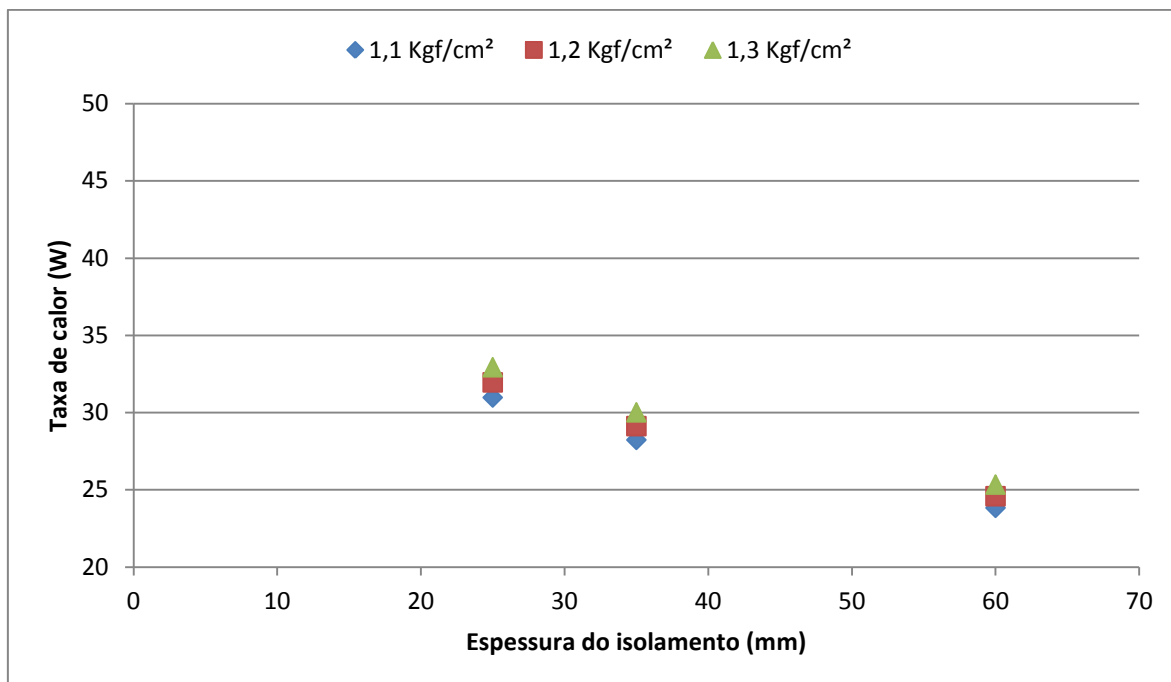


Figura 23 - Fluxo de calor do sistema para as espessuras do isolamento.

Com o propósito de previsão do fluxo de calor ao longo do isolamento, foram usadas as condições que estabeleceram a Figura 23 com as demais espessuras, entre 5 e 100 mm, no cálculo do fluxo de calor. As curvas geradas são expostas na Figura 24. Os círculos indicam os resultados obtidos experimentalmente, anteriormente mostrados na Figura 23.

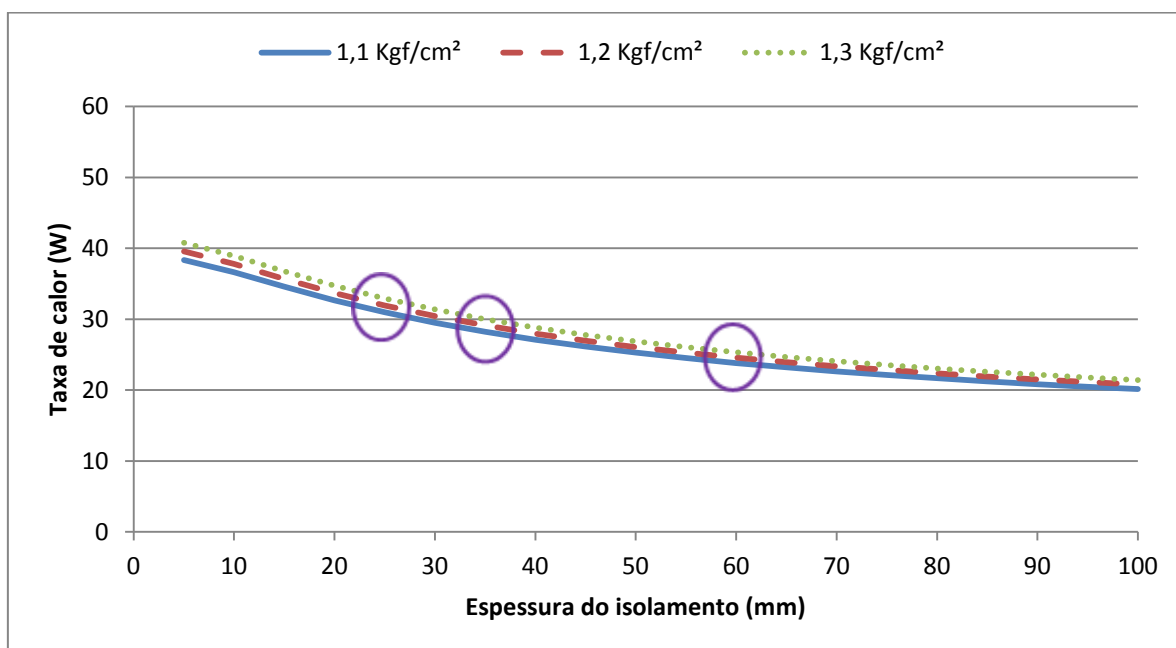


Figura 24 - Fluxo de calor do sistema simulado para espessuras de até 100 mm.

Os valores de condutividade térmica encontrados, conforme Figura 22, tiveram desempenho ligeiramente superior aos resultados obtidos para o mesmo material, de mesma origem. Vale ressaltar que os valores encontrados na literatura foram mensurados em particulado (MAIA, 2016) e não foi realizada a moldagem do material. É possível notar uma tendência de diminuição no valor de k do FF moldado, uma vez que o molde elimina a porosidade, preenchendo os espaços vazios com FF. A mérito de exemplo, valores de condutividade térmica de alguns materiais, incluindo isolantes térmicos, são mostrados na Figura 25. Adicionalmente, é indicada a região na qual o fosfogesso pode ser relacionado na escala apresentada.

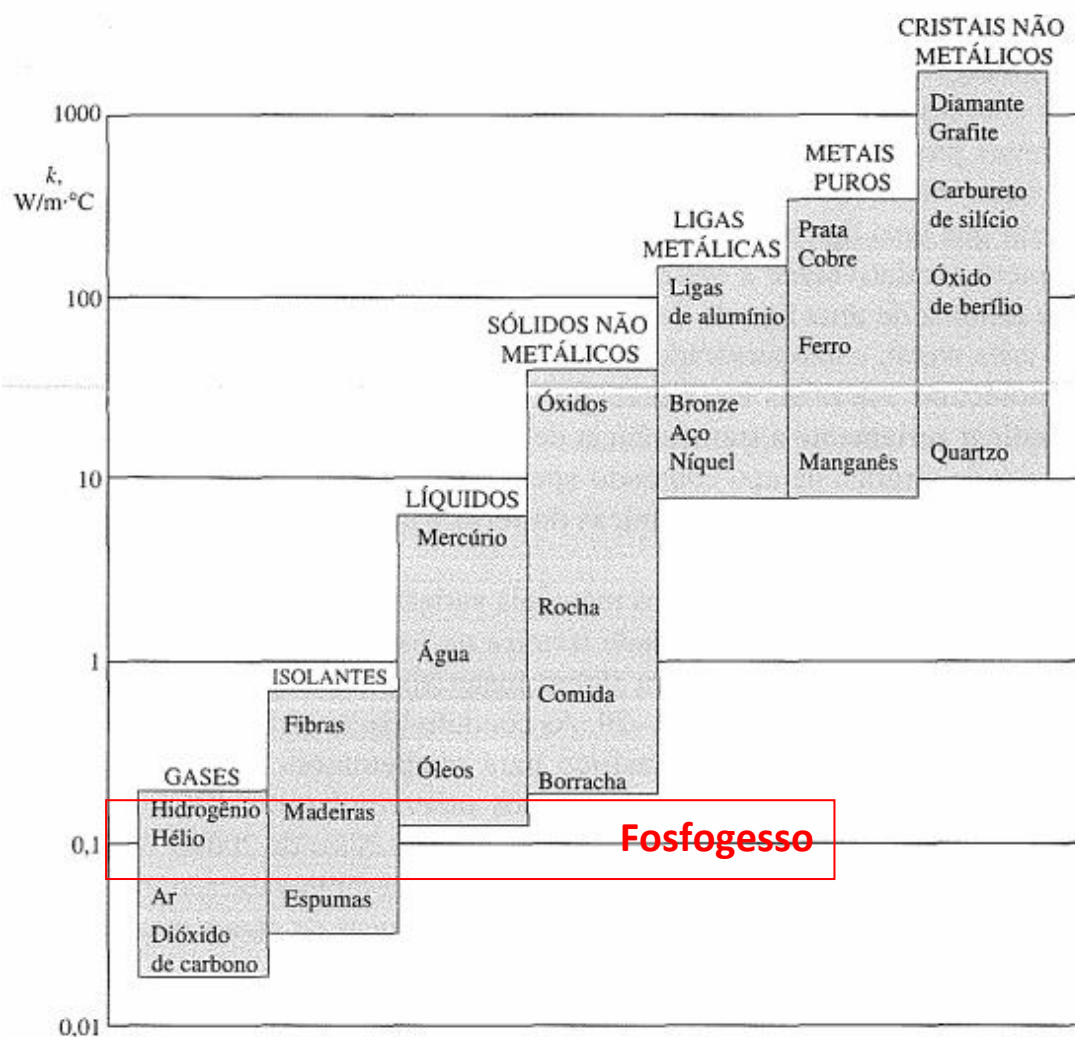


Figura 25 - Intervalos de condutividade térmica de vários materiais em temperatura ambiente. Fonte: ÇENGEL, 2009.

Conforme ilustrado na Figura 25, os valores de k alcançados estão em consonância com os isolantes. Ressalta-se que não foi adicionado nenhum aditivo ou componente na moldagem de fosfogesso além de água. Existem outros produtos disponíveis que poderiam ser utilizados para mistura, como silicato de cálcio, um isolante já consolidado no mercado, com o objetivo de auxiliar na redução do coeficiente de condutividade térmica. Com a proibição da comercialização de amianto no Brasil em 2017, indo de encontro com a mesma restrição em outros países, os produtores de silicato de cálcio tiveram de iniciar um processo de adequação à norma. Em razão disto, o preço do silicato tende a subir, destacando o fosfogesso como possível substituto a este isolante, visto que a condutividade térmica do silicato comercial varia entre 0,06 e 0,13 W/m.K, além de possuir características físicas similares ao fosfogesso. Este procedimento pode ser interessante, pois o custo de FF, da ordem de R\$ 50,00/tonelada, é relativamente baixo, quando comparado aos demais materiais isolantes. Este procedimento já foi testado anteriormente e obteve resultados significativos (MAIA, 2016).

Observando o raio crítico encontrado na Equação 22, de valor 0,01571 m, este se encontra acima do raio da tubulação, de 0,01335 m. Desta forma, o isolamento deve ter, no mínimo, a diferença entre eles, de 0,00236 m (ou 2,36 mm), para atuar como isolante. Consequentemente, o fluxo de calor começa a diminuir ao longo do isolamento. Este fato pode ser comprovado pelas Figuras 23 e 24, observando a queda do fluxo com o aumento da espessura de FF, em todos os casos, os quais foram realizados com espessuras superiores ao raio crítico.

3.4) Espessura ótima

No desenvolvimento dos cálculos foi considerado o equipamento isolado conforme Item 2.5, espessuras variando entre 0 (sem isolamento) e 100 mm, condutividade térmica obtida pela Equação 30 de 0,1571 W/m.K e coeficiente convectivo do ar de 10 W/m².K. Com o objetivo de encontrar o custo anual, foi considerado o funcionamento do equipamento e uso de isolante 24 horas por dia, durante o ano todo. A resistência condutiva foi considerada constante e a resistência convectiva anulada, devido ao movimento do fluido na tubulação. O custo do isolante é de R\$ 0,005/mm por quilograma, para cada metro isolado, respeitando as

condições do equipamento.

As Figuras 26, 27 e 28 ilustram as curvas de custos anuais para as pressões de 107,87 (1,1), 117,68 (1,2) e 127,49 (1,3) kPa (Kgf/cm²), respectivamente.

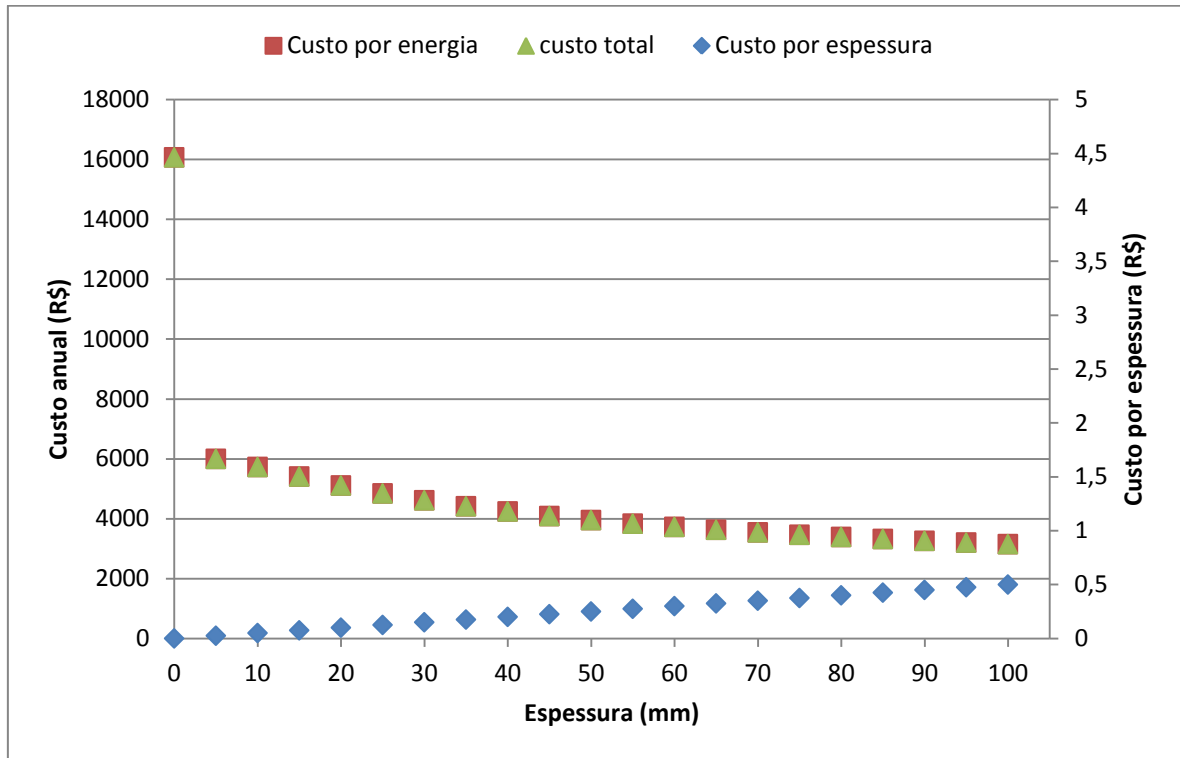


Figura 26 - Espessura ótima EO1 para a pressão de 1,1 Kgf/cm².

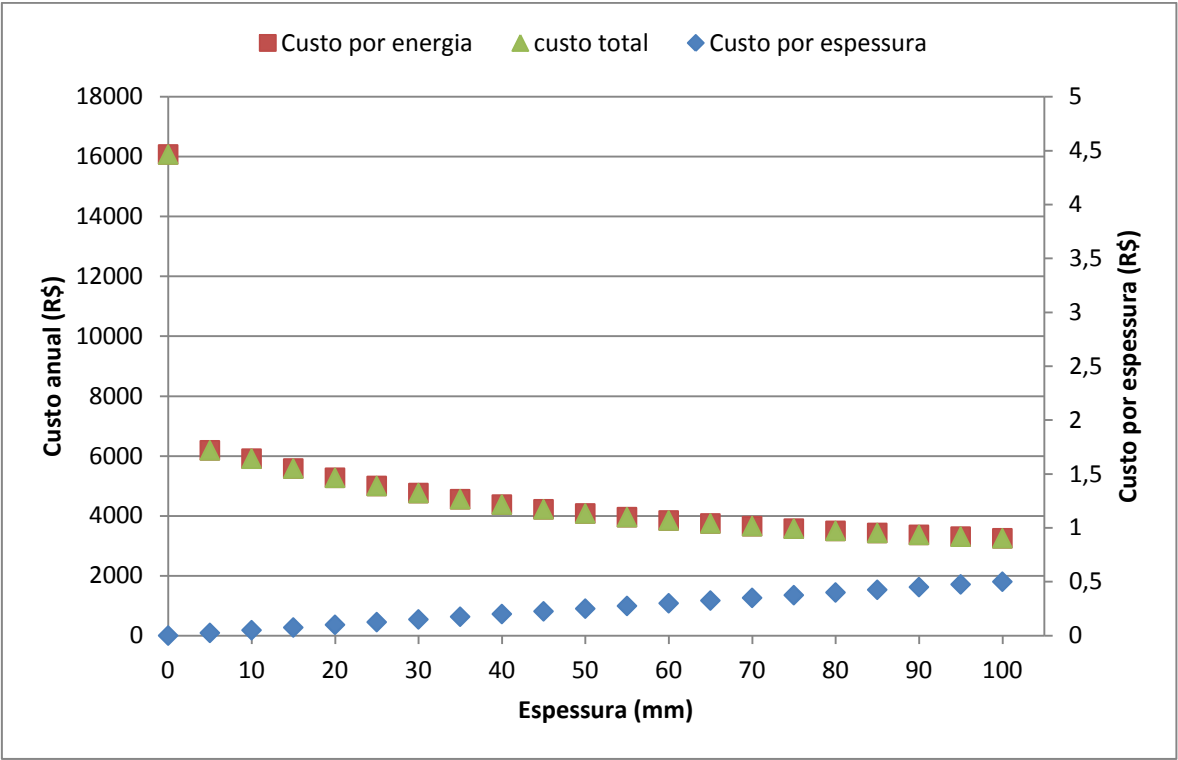


Figura 27 - Espessura ótima EO2 para pressão de 1,2 Kgf/cm².

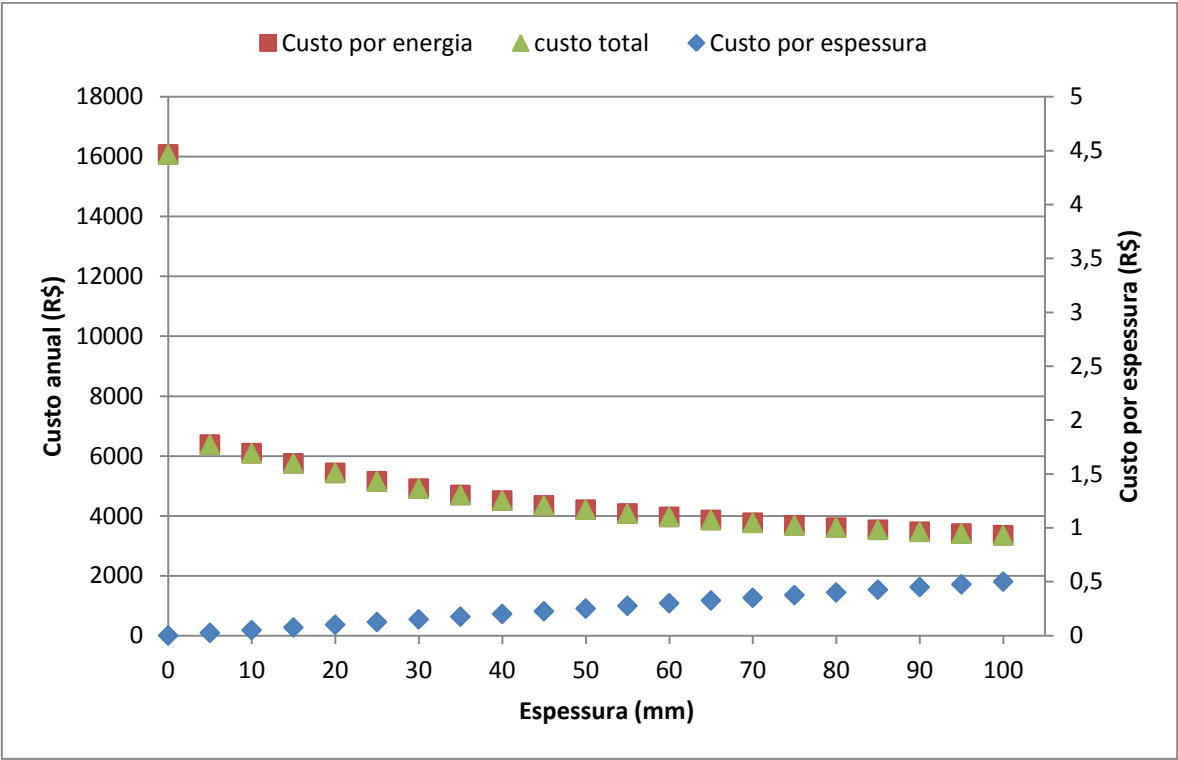


Figura 28 - Espessura ótima EO3 para pressão de 1,3 Kgf/cm².

Em atenção às Figuras 26 a 28, o custo do fosfogesso praticamente não influenciou no custo total do isolamento, respeitando as condições analisadas. Isto só foi possível pelo baixo custo de aquisição de fosfogesso, citado anteriormente. Desta forma, não é recomendável determinar a espessura ótima em razão, apenas, dos valores apresentados. Sendo assim, outro fator determinante deve ser exaltado, sendo este o peso do isolamento. Caracterizado o peso do isolamento de fosfogesso a partir de sua densidade média de 2300 Kg/m^3 , deve ser minuciosamente estudada sua influência no cálculo estrutural dos suportes de tubulações e equipamentos, uma vez que, ainda em comparação ao silicato de cálcio, de densidade aproximada de 270 Kg/m^3 , possui peso 8,5 vezes superior. Outro fator comumente não considerado nestes cálculos que certamente influenciará a densidade do isolamento é a adição de água para a moldagem. A razão adotada neste estudo, de 1 kg de água para 2 kg de fosfogesso, e a perda de água por evaporação, reduziram a densidade média do isolamento de 2300 Kg/m^3 para aproximadamente 1950 Kg/m^3 . Ilustra-se na Figura 29 o peso por espessura do isolamento, para cada densidade do fosfogesso, em comparação com o silicato de cálcio.

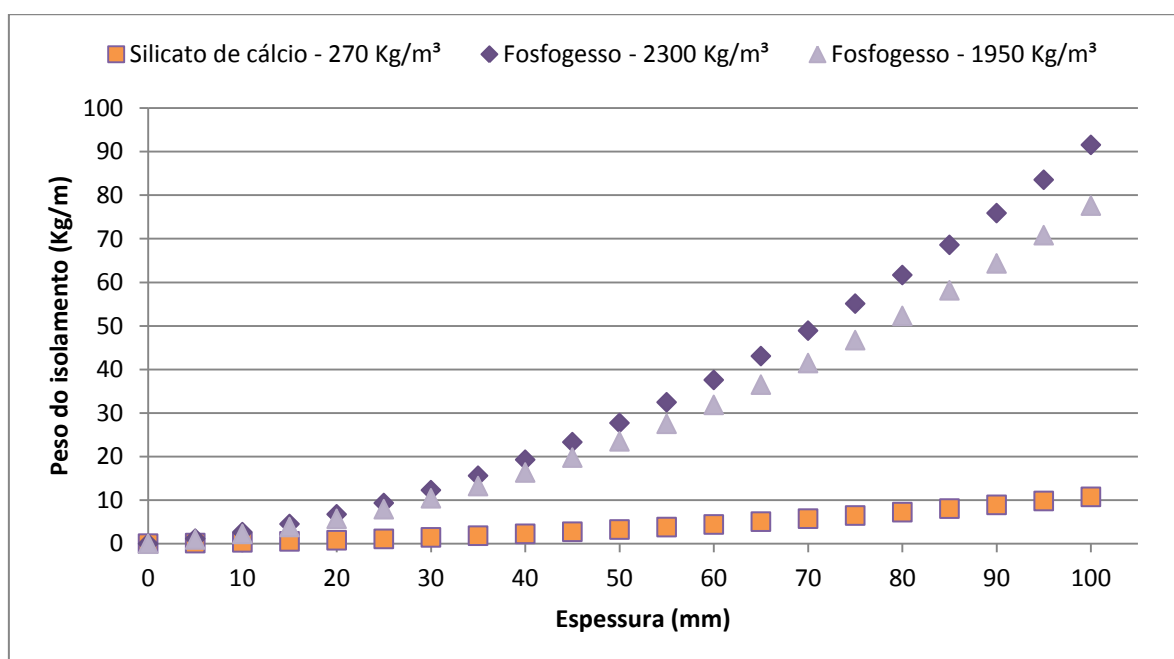


Figura 29 - Comparação entre silicato de cálcio e fosfogesso (peso).

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu concluir que:

- a) A eficiência de cominuição do fosfogesso será maior se a rotação do moinho de bolas for mantida entre 26% e 62% da velocidade crítica por até 10 minutos, faixa na qual o índice de trabalho de Bond está entre 3,5 e 8,8 kWh/t, o que corresponde ao um menor consumo de energia;
- b) O índice de trabalho de Bond varia conforme a rotação do moinho de bolas e o tempo de operação, em oposição aos índices constantes disponibilizados na literatura. Para os tempos de 10, 20 e 30 minutos, o índice de trabalho pode ser encontrado conforme as Equações:

- d) Tempo de 10 minutos ($R^2 = 0,8202$):

$$w_{i,10min} = 0,0078.N^2 - 1,1108.N + 51,776 \quad (27)$$

- e) Tempo de 20 minutos ($R^2 = 0,8385$):

$$w_{i,20min} = 0,002.N^2 - 0,2185.N + 14,235 \quad (28)$$

- f) Tempo de 30 minutos ($R^2 = 0,9768$):

$$w_{i,30min} = 0,0022.N^2 - 0,2531.N + 10,679 \quad (29)$$

- c) O uso de fosfogesso como isolante térmico de tubulações é viável para temperaturas de 30 °C a 314 °C, com condutividade térmica prevista pela Equação 30, com T em K:

$$k = -2.10^{-6}.T^2 + 0,0021.T - 0,3498 \quad (30)$$

- d) É necessário se atentar a influência do peso do fosfogesso como isolante na estrutura ou equipamento, devido à sua densidade elevada.

5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de promover a continuação dos estudos, sugere-se:

- a) Utilizar fosfogesso de outras regiões do mundo;
- b) Realizar ensaios de resistência mecânica nas peças de fosfogesso;
- c) Variar a granulometria do fosfogesso empregado na confecção das peças;
- d) Misturar o fosfogesso com aditivos ou outros isolantes.

6 REFERÊNCIAS

BOND, F. C., **The third theory of comminution**. Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 193: p. 484–494. 1952.

BRUNATTO, M. L. **Eficiência da moagem de pó cerâmico em moinho agitador de esferas**. 2017. 87 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2017.

CANUT, M. M. C. **Estudo de viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção**. 2006. 154 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

ÇENGEL, Y.A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. Trad. Luiz Felipe Mendes de Moura, Revisão técnica de Kamal A. R. Ismail. São Paulo: McGraw-Hill, 2009.

FERRARI, F. O. S. **Utilização de fosfogesso, resíduos da produção de cal e areia da extração de ouro para produção de materiais da construção civil**. 2012. 86 f. Dissertação (Mestrado em concentração de engenharia e ciência dos materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

GOMIDE, R., **Operações Unitárias, v.1 Operações com Sistemas Sólidos Granulares**, 1ª edição. São Paulo: Ed. do Autor. 1983.

HINCAPIÉ, A. M., CINCOTTO, M. A. **Efeito de retardadores de pega no mecanismo de hidratação e na microestrutura do gesso de construção** Ambiente Construído, 1997; 1(2):07-16.

INCROPERA, F.P. ; DEWITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Livro. Ed 5. Rio de Janeiro: Técnicos e Científicos Editora S.A. 2008.

MAIA, M. F. C. B. **Eficiência da aplicação do fosfogesso como isolante térmico industrial**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do ABC, Programa de Pós-Graduação em Energia, Santo André, 2016.

MORAES Jr, D.; MORAES, M. S. **Laboratório de Operações Unitárias I**. Santos: Ed. dos autores, 2011

MORAES Jr, D.; MORAES, M. S. **Laboratório de Operações Unitárias II**. Santos: Ed. dos autores, 2011.

NOGUEIRA, L. A. H., NOGUEIRA, F. J. H, ROCHA, C. R. **Eficiência Energética no Uso de Vapor**. Eletrobrás, 2005.

NUERNBERG, N.J.; RECH, T.D.; BASSO, C. **Usos do gesso agrícola**. 2.ed. Florianópolis: Epagri, 2005. 36p. (Epagri. Boletim Técnico, 122).

GREEN, D. W., SOUTHARD, M. Z. **Perry's Chemical Engineer's Handbook**. 9th Ed. McGraw-Hill, 2018

RUTHERFORD, P. M. ; DUDAS, M. J. ; SAMEK, R. A. **Environmental impacts of Phosphogypsum**. The science total environmental, v. 149, p. 1-38, 1996.

SANTOS, Wilson N. dos et al . **Método de fio quente na determinação das propriedades térmicas de polímeros**. Polímeros, São Carlos, v. 14, n. 5, p. 354-359, 2004.

SAUEIA, C. H. R. **Caracterização radioquímica do fosfogesso e implicações radiológicas de sua utilização como material de construção** Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1998

VILLAVERDE, L. FREDDY. **Avaliação da exposição externa em residência construída com fosfogesso**. Instituto de pesquisas energéticas e nucleares. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

<https://www.conjur.com.br/2017-nov-29/supremo-proibe-producao-venda-amianto-brasil> - Acesso em 11/11/2019.