Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais
Porto Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020

ANÁLISE DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO[1]

MORAIS, C. F. (1), BELO, B. R. (2), BESSA, S. A. L. (3), PORTO, M. P. (4), LOURA, R. M. (5)

(1) Universidade Federal de Minas Gerais, email1
(2) Universidade Federal de Minas Gerais, baahbelo@gmail.com
(3) Universidade Federal de Minas Gerais, sofiabessa@ufmg.br
(4) Universidade Federal de Minas Gerais, matheusporto@ufmg.br
(5) Universidade Federal de Minas Gerais, rejaneml@gmail.com

RESUMO

O Estado de Minas Gerais é responsável por quase metade do valor gerado pela indústria extrativa mineral. No entanto, essa atividade gera milhares de toneladas por dia de diferentes resíduos. Neste trabalho, como objetivo principal pretendeu-se avaliar as propriedades mecânicas e térmicas de argamassas de revestimento coloridas produzidas com rejeito de minério de ferro (RMF), in natura e calcinado, como substituto do cimento Portland. As argamassas foram produzidas com cimento, cal hidratada e areia natural, em traços 1:2:9 e 1:1:6. O RMF foi caracterizado por ensaios de granulometria a laser e difração de raios x. As amostras de RMF foram usadas no estado in natura e calcinadas a 500 °C e 750 °C. Todas as amostras foram moídas por 10 minutos para homogeneização. O cimento foi substituído por RMF nas seguintes porcentagens: 0%, 10% e 20%. A relação água/aglomerante foi mantida fixa, no valor de 0,95 para todas as argamassas. A análise da condutividade térmica foi analisada por meio do balanço de energia. Após a moldagem, a massa específica das argamassas no estado fresco e no estado endurecido foram aferidas. Os resultados mostraram que as argamassas produzidas com RMF em substituição ao cimento Portland apresentaram condutividade térmica semelhante às argamassas de referência.

Palavras-chave: *propriedades térmicas, propriedades físicas, argamassas.*

ABSTRACT

The State of Minas Gerais is responsible for almost half of the value generated by the mining industry. However, this activity generates thousands of tons per day of different wastes. In this work, the main objective was to evaluate the mechanical and thermal properties of colored coating mortars produced with iron ore tailings (IOT), raw and calcined, as a substitute for Portland cement. Mortars were produced with cement, hydrated lime, and natural sand, in 1:2:9 and 1:1:6 traces. IOT was characterized by laser particle size tests and x-ray diffraction. The IOT samples were used in the raw state and calcined at 500 °C and 750 °C. All samples were ground for 10 minutes for homogenization. The cement was replaced by IOT in the following percentages: 0%, 10%, and 20%. The water/binder ratio was kept fixed at 0.95 for all mortars. The thermal conductivity analysis was analyzed using the energy balance. After molding, the specific mass of the mortars in the fresh and hardened state were measured. The

[1] MORAIS, C. F., BELO, B. R., BESSA, S. A. L., PORTO, M. P., LOURA, R. M. Análise de condutividade térmica de argamassas de revestimento com rejeito de minério de ferro. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2020.

results showed that the mortars produced with IOT to substitute Portland cement presented thermal conductivity like the reference mortars.

***Keywords**: thermal properties, physical properties, mortars.*

1 INTRODUÇÃO

A indústria extrativa mineral é um setor de destaque na economia nacional, tendo relevante participação na composição do Produto Interno Bruto (PIB). A participação de minério de ferro corresponde a 64,8% das exportações da Indústria Extrativa Mineral, no primeiro semestre de 2019. Os estados com as maiores arrecadações de Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) foram Minas Gerais (44,7%) e Pará (44,7%), os maiores produtores de minério de ferro. Ainda no primeiro semestre de 2019, esses estados concentram quase 90% da arrecadação dos *royalties* da mineração (ANM, 2019).

A extração mineral gera grande volume de resíduos e seu armazenamento, além de dispendioso, gera significativo passivo ambiental e risco elevado de acidentes, como o que ocorreu em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), ambas cidades de Minas Gerais (SEMAD, 2019a; SEMAD, 2019b). A demanda de grandes áreas para sua deposição, o potencial de contaminação do solo, das águas superficiais e subterrâneas, bem os riscos de ruptura e falha nas barragens capazes de provocar danos ambientais e sociais são alguns dos problemas associados a extração do minério de ferro. A destinação adequada dos rejeitos tem se tornado cada vez mais urgente.

Como o beneficiamento do minério de ferro tem como subproduto o rejeito de minério de ferro, e este vai continuar sendo gerado, seja com mais ou menos ferro, precisa de uma destinação adequada. Seu uso em componentes construtivos poderá implicar numa redução de consumo de agregado miúdo no concreto. Isso é relevante, uma vez que se pode enumerar vários danos causados pela mineração de areia e pela produção do cimento (VIEIRA e REZENDE, 2015).

A indústria da construção civil é responsável pelo consumo de 50% dos recursos naturais globais, sendo gerador de significativo impacto ambiental (DAMINELI, 2013). A utilização de rejeitos de minério de ferro (RMF) na construção pode ser considerada como uma alternativa eficaz tanto para uma destinação adequada ao grande volume de resíduos gerado, quanto para reduzir o consumo de recursos naturais e não renováveis, na medida em que permite reintroduzir os resíduos em outras cadeias produtivas, como é o caso da indústria da construção civil (GALVÃO, et al., 2018; CARVALHO et al., 2019).

As argamassas de revestimento desempenham importantes funções na alvenaria e pode ser responsável por até 30% do isolamento térmico do sistema de vedação, a depender da sua espessura, composição e características da parede de vedação (CARASEK, 2010). Tendo em vista a influência da envoltória no desempenho térmico e nas condições de habitabilidade das edificações, a análise do desempenho térmico dos componentes de vedação e de revestimento se torna bastante relevante, ainda mais com a incorporação de novos materiais (FONTES et al., 2016; MENDES et al., 2019).

Por serem largamente utilizadas na construção civil, principalmente produzidas em obra, foram utilizadas para esse estudo argamassas de revestimento do tipo mistas. Foram avaliadas as propriedades térmicas das argamassas com substituição do

cimento por RMF (in natura e calcinado) em diferentes teores, através do método transiente.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a produção das argamassas, foram utilizados os seguintes materiais: i) cimento Portland tipo CP IV 32, ii) cal hidratada tipo CH-I, iii) areia média comercialmente disponível na cidade de Belo Horizonte, MG. Os traços 1:2:9 e 1:1:6 (cimento : cal : areia - em massa) foram escolhidos por serem os mais comumente utilizados em rebocos interno e externo, respectivamente (DUBAJ, 2000; BESSA et al., 2018; MENDONÇA et al., 2019).

O rejeito de minério de ferro (RMF), utilizado em substituição parcial ao cimento, foi fornecido pela Vallourec Mineração, em seu estado *in natura* e calcinado a 500 °C e a 750 °C (em forno rotativo). Todas as amostras de RMF foram secas em estufa a 100 °C por 24h e, posteriormente, cominuídas em moinho planetário de alto desempenho, com quatro recipientes de moagem (FRITSCH, modelo Pulverisette 5). Os recipientes e as esferas utilizadas são compostos por óxido de Zircônio, 94,2% ZrO_2, com densidade de 5,7 g/cm³.

Após a moagem, a distribuição granulométrica das amostras de rejeito foi realizada por granulômetro a *laser* Cilas 1090 *Laser Particle Size Analyzer*. A mineralogia da amostra foi determinada por meio da técnica de difração de raios X, realizada com equipamento SHIMADZU, modelo XRD-7000, gerada a 40kV e 30mA, usando radiação de Cu. A velocidade angular foi de 2°/min e o intervalo de varredura foi de 2θ = 10° a 80°.

A cal usada foi do tipo CH-I e o ensaio de finura para aferimento foi realizado segundo a NBR 7175 (ABNT, 2003). O agregado miúdo utilizado foi a areia média, disponível na cidade de Belo Horizonte, e as amostras foram caracterizadas quanto à granulometria (NBR NM 248), volume de vazios e massa unitária (NBR NM 45) e massa específica (NBR NM 52). A areia média foi peneirada e seca em estufa antes da caracterização.

Os teores de substituição utilizados nas medições de condutividade térmica (0%, 10% e 20%), foram definidos em estudos anteriores (BESSA et al., 2018; MENDONÇA et al., 2019), assim como o fator água/aglomerante de todas as argamassas, que foi fixado em 0,95. Foram moldados traços de referência sem resíduo (G-Ref) e com substituição, em massa, do cimento por RMF em teores de 10% e 20%, com rejeitos *in natura* e calcinados a 500 °C e 750 °C, conforme Tabela 1. Após a moldagem, a massa específica no estado fresco foi determinada, de acordo com a NBR 13278 (ABNT, 2005).A densidade de massa aparente também foi aferida, aos 28 dias, por meio de 4 corpos de prova, tamanho Ø 10 x 20 cm, para cada traço (NBR 13280/1995).

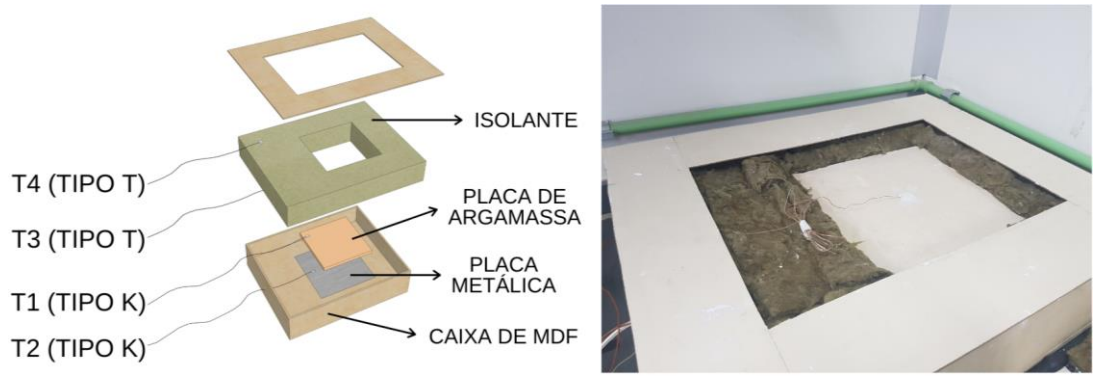
As argamassas foram produzidas em betoneira convencional e, posteriormente, moldadas em formas de 30 x 30 cm com espessura de 2 cm. O tamanho do molde foi definido em conformidade com a montagem experimental para medição de condutividade térmica. A montagem experimental já havia sido utilizada pelo Laboratório de Termometria (LabTerm/UFMG) para determinação da emissividade LWIR (*Long-wavelength Infrared*) total-direcional da superfície de módulos fotovoltaicos (FERREIRA et al., 2019).

Tabela 1 - Argamassas - Grupos e materiais utilizados

Tratamento/ Traço		**G1 – 1:2:9**				**G2 – 1:1:6**			
		Cimento	**Cal**	**Areia**	**RMF**	**Cimento**	**Cal**	**Areia**	**RMF**
Sem resíduo	REF	1	2	9	-	1	1	6	-
RMF *in natura*	IN-10	0,9	2	9	0,1	0,9	1	6	0,1
	IN-20	0,8	2	9	0,2	0,8	1	6	0,2
RMF calcinado 500 °C	500-10	0,9	2	9	0,1	0,9	1	6	0,1
	500-20	0,8	2	9	0,2	0,8	1	6	0,2
RMF calcinado 750 °C	750-10	0,9	2	9	0,1	0,9	1	6	0,1
	750-20	0,8	2	9	0,2	0,8	1	6	0,2

A montagem é composta por um varivolt, um sistema de aquisição de dados (Agilent), uma caixa de MDF (onde foram posicionadas as placas de argamassa), o isolante (lã de rocha) e uma placa metálica conectada a uma pastilha Peltier. Foram utilizados também quatro termopares (T1, T2, T3 e T4) posicionados sobre e sob a placa de argamassa e o isolante.

Figura 1 - Montagem experimental de medição de condutividade



A voltagem e a corrente constantes fornecidas pelo varivolt à pastilha Peltier resultam em dissipação de energia na forma de calor, provocando o aquecimento da placa metálica e, subsequentemente, da placa de argamassa. De modo a facilitar a transferência do calor dissipado para a placa de argamassa, através da diminuição das resistências térmicas, foi utilizada pasta térmica em todas as superfícies.

O tempo necessário para as placas de argamassa atingirem regime permanente foi, em média, de 5,5 horas, em ambiente com temperatura e umidade controladas. Após atingido o regime permanente, foram mensuradas as temperaturas nos termopares da placa de argamassa e do isolante, além da voltagem e da corrente utilizadas para dissipação de calor na pastilha Peltier.

O cálculo da condutividade considerou os diferentes tipos de perdas térmicas envolvidos no processo de aquecimento da placa de argamassa (condução, radiação e convecção), sendo realizado por meio de um balanço energético do sistema de montagem experimental. Consideradas as perdas térmicas, as temperaturas na parte inferior e superior da placa de argamassa e a potência dissipada na pastilha Peltier (calculada através da corrente e da voltagem a ela fornecidas), a condutividade térmica de cada uma das placas de argamassa testadas foi calculada a partir da equação de Fourier.

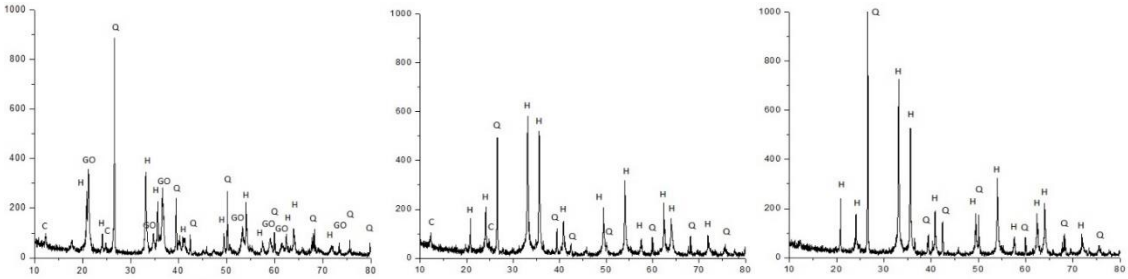
A equação relaciona a potência dissipada com a área e a espessura das placas de argamassa, sua condutividade e o delta de temperatura entre as extremidades pelas quais o calor flui (entre a menor e a maior temperatura).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em relação à caracterização do RMF, pode-se observar a estrutura predominantemente cristalina das amostras (*in natura* e calcinada) na Figura 2.

Pela análise dos difratogramas, percebe-se a transformação da goethita (GO) em hematita (H) que ocorre entre 200 °C e 300 °C (MAGALHÃES et al., 2017). Os picos de hematita se acentuam na medida em que a temperatura de calcinação aumentou. Essa mudança pode ser a responsável pela alteração da coloração das amostras, o que reflete na tonalidade das argamassas. Outra mudança observada é o desaparecimento dos picos de caulinita (C) na amostra calcinada a 750 °C.

Figura 2 - Difratogramas das amostras de RMF in natura (esq.) e calcinadas 500°C (centro) e 750°C (dir.)



Na Tabela 2, pode-se observar os resultados da caracterização da areia e da cal. Esses ensaios foram necessários para obter um controle das características dos materiais convencionais utilizados nas argamassas. Observa-se que a finura da cal (6,67%) está compatível com a norma correlata (< 10%).

Tabela 2 - Caracterização - Areia e cal

Material	Areia	Cal
Métodos de caracterização	• Volume de Vazios e Massa Unitária *(0,11%; 1,39 g/cm³)* • Massa Específica *(2,49 g/cm³)* • *Módulo de Finura (3,21)* • *Dimensão máxima característica (2,40 mm)*	• Finura (% retida acumulada) na #0,075 - 6,67%

Fonte: Autores

Pela granulometria a *laser*, pode-se observar que a amostra de RMF *in natura* apresentou 90% das partículas com diâmetro inferior a 36,31 µm, enquanto a amostra calcinada a 500 °C apresentou o valor de 27,67 µm, e a amostra calcinada a 750 °C apresentou o valor de 35,79 µm, resultados muito próximos.

Os valores de massa específica no estado fresco não diferiram muito entre si e ficaram entre 1900 e 2000 kg/m^3. Os valores obtidos no ensaio de densidade de massa aparente também ficaram bastante próximos entre si, variando entre 1590 e 1610 kg/m^3, para todas as argamassas.

A calcinação do RMF e a substituição pelo cimento não alteraram significativamente a massa específica das argamassas, excetuando-se uma leve tendência de que, nas

argamassas produzidas com RMF calcinado a 750 °C, os valores se apresentaram maiores que na argamassa de referência.

Os resultados das medições da condutividade térmica estão apresentados nas Tabelas 3 e 4. Como os valores ficaram bastante próximos entre si, foi realizada uma análise estatística para avaliar as diferenças entre as variâncias (teste variância) e um teste entre as médias dentro de uma mesma faixa de tratamento do RMF (teste médias independentes t-student) para um mesmo tipo de traço. As análises foram realizadas utilizando o software Excel e com nível de significância de 5%. Em todas os testes, não se pode deixar de rejeitar a hipótese de igualdade entre as variâncias e as médias entre os teores 10% e 20% para um mesmo tipo de tratamento térmico (IN, 500 e 750).

Da mesma forma, foi realizada uma análise estatística entre todos os valores (REF, IN, 500 e 750) para um mesmo grupo (G1 ou G2), do tipo anova fator único. As análises foram realizadas utilizando o software Excel e com nível de significância de 5%. Como resultado, para o grupo G1, o valor P ficou em 0,8823, o valor de F em 0,380 e o F-crítico no valor de 2,661. Para o grupo G2, o valor P ficou em 0,3301, o valor de F em 1,245 e o F-crítico no valor de 2,661. Portanto, em ambos os casos, a hipótese de igualdade não pode ser rejeitada.

Segundo a norma brasileira de desempenho térmico, a NBR 15220 (ABNT, 2005), os valores de condutividade térmica para argamassas do tipo comum, com densidade aparente entre 1800-2100 kg/m^3, ficam em 1,15 W/(m·K). Essa norma, apesar de ser amplamente utilizada, não faz distinção entre as argamassas mistas (cimento/cal) das que usam apenas cimento. A quantidade de agregado nas argamassas também pode variar bastante, de 2 a 9 vezes a quantidade de cimento.

Os valores de condutividade térmica obtidos pelo balanço energético do sistema utilizado ficaram abaixo dos valores de norma, mas cabe enfatizar que todas as perdas térmicas do sistema foram mensuradas, o que é importante para não subestimar os valores aferidos.

Ainda assim, pode-se observar que a substituição de cimento por RMF não alterou a condutividade térmica das argamassas, fato também observado por Mendes et al. (2019), que avaliaram argamassas mistas produzidas com o RMF como agregado miúdo. No referido trabalho, os valores de condutividade das argamassas de referência 1:2:9 e 1:1:6 ficaram em 0,82 e 0,98 W/(m·K), respectivamente. O cimento CPV foi utilizado na produção dos corpos de prova, apesar de não ser comumente utilizado em argamassas de assentamento. Os corpos de prova (placas com dimensões 30 x 30 x 5 cm) foram mantidos em estufa por 24h em temperatura de 80 °C.

Tabela 3 - Argamassas G1 – Valores de condutividade térmica

Argamassas	Média W/(m·K)	Desvio Padrão	Coeficiente de variação
REF	0,54	0,052	9,733
IN 10 %	0,56	0,066	11,672
IN 20 %	0,54	0,034	6,355
500 10%	0,56	0,069	12,215
500 20%	0,58	0,081	14,070
750 10%	0,59	0,077	13,101
750 20%	0,57	0,051	8,885

Tabela 5 - Argamassas G2 – Valores de condutividade térmica

Argamassas	Média W/(m·K)	Desvio Padrão	Coeficiente de variação
REF	0,63	0,021	3,276
IN 10 %	0,60	0,024	4,045
IN 20 %	0,63	0,065	10,297
500 10%	0,57	0,058	10,307
500 20%	0,62	0,065	10,345
750 10%	0,57	0,018	3,120
750 20%	0,61	0,059	9,663

Essa condição não representa o que se observa no ambiente, uma vez que as argamassas de revestimento estão sempre em equilíbrio com a umidade do entorno ou, até mesmo, úmidas por conta das intempéries (no caso de revestimentos externos).

4 CONCLUSÕES

Após as análises, foi possível concluir que a incorporação de RMF, como substituto parcial do cimento Portland, não interferiu na condutividade térmica de argamassas de revestimento do tipo mistas.

Além disso, o método utilizado para aferição da condutividade (balanço de energia) pode ser tido como adequado, uma vez que considerou os diferentes tipos de perdas térmicas envolvidos no processo.

Ao utilizar o RMF na produção de argamassas e não serem observadas alterações no seu comportamento mecânico e térmico, pode-se afirmar que há um ganho ambiental envolvido. No caso ora apresentado, houve uma diminuição do uso do cimento, o que reduz o consumo e a exploração de novos recursos, além da minoração dos impactos ambientais negativos associados ao armazenamento do RMF em barragens.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 7175:** Cal hidratada - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR 13278:** Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

____. **NBR 13280: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Rio de Janeiro, 1995.

____. **NBR15220-5:** Desempenho térmico de edificações - Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico.

____. **NBR NM45:** Agregados - determinação de massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

____. **NBR NM52:** Agregado miúdo - determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR NM248:** Agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ANM. **Informe Mineral 1º/2019** – Agência Nacional de Mineração (ANM). Disponível em http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/informe-mineral/publicacoes-nacionais/informe_mineral_1_2019.pdf>. Acesso em 05 mai. 2020.

BESSA, S.; MENDONÇA, I.; VIMIEIRO, J.; GURGEL, G.; MAGALHÃES, L.; BEZERRA, A.; LOURA, R. Análises de argamassas de revestimento produzidas com rejeito de minério de ferro. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2018.

CARASEK, H. Argamassas. In: **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** Org. G.C. Isaia, 2ª ed., IBRACON, S. Paulo (2010).

CARVALHO, J.M.F., MELO, T.V., FONTES, W.C., et al. More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials, **Construction and Building Materials.** v. 206, 2019.

DUBAJ, E. **Estudo comparativo entre traços de argamassa de revestimento utilizadas em Porto Alegre.** 2000. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

FERREIRA, R. A. M.; POTTIE, D. L. F.; DIAS, L. H. C.; CARDOSO FILHO, B. J., PORTO, M. P. A directional-spectral approach to estimate temperature of outdoor PV panels. **Solar Energy,** v. 183, 2019, p. 782–790.

FONTES, W. C.; MENDES, J. C. SILVA, S. N.; PEIXOTO, R. A. F. Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. **Construction and Building Materials,** v. 112, 2016.

GALVÃO, J.L.B., ANDRADE, H.D., BRIGOLINI, G.J., et al. Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. **Journal of Cleaner Production**, v. 200, 2018.

MAGALHÃES, L. F.; MORAIS, I. S.; ESTEVES JUNIOR, M. A.; MELO, A. C.; MAIA, A. L. F.; BEZERRA, A. C. S. Resistência ao ataque ácido de cimento Portland com adição de rejeito de minério de ferro. **Anais...** Bento Gonçalves: IBRACON, 2017.

MENDES, J. C.; BARRETO, R. R.; DE PAULA, A. C. B.; ELÓI, F. P. F.; BRIGOLINI, G. J.; PEIXOTO, R. A. F. On the relationship between morphology and thermal conductivity of cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, 2019.

MENDONCA, I. K. ; VIMIEIRO, J. I. C. ; BELO, B. R. ; LOURA, R. M. ; Bessa, S. A. L. ; BEZERRA, A. C. S. . Absortância solar de argamassas coloridas produzidas com rejeito de minério de ferro. In: VI Congresso de Engenharia Civil, 2019, Juiz de Fora. **Anais do VI CONENGE**. Juiz de Fora: UFJF, 2019.

SEMAD. **Desastre Ambiental em Mariana e Recuperação do Rio Doce**. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais. Disponível em <http://www.meioambiente.mg.gov.br/component/content/article/13-informativo/2879-desastre-ambiental-em-mariana-e-recuperacao-da-bacia-do-rio-doce>. Acessado em dez. 2019. 2019a.

____. **Nota de esclarecimento 15** – desastre barragem B1. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais. Disponível em: <http://www.meioambiente.mg.gov.br/noticias/1/3759-nota-de-esclarecimento-15--barragem-b1>. Acessado em dez. 2019. 2019b.

VIEIRA, E. G.; REZENDE, E. N. Mineração de areia e meio ambiente: é possível harmonizar? **Revista do Direito Público,** Londrina, v.10, n.3, p.181-212, set./dez.2015.