

Revestimentos Hidráulicos de Rejeito de Barragem de Minério de Ferro

Cement tile with iron ore tailing of the dams

Wanna Carvalho Fontes (1); Ellen Cristine Pinto da Costa (2); Ana Carolina de Paula Matias (3)
Aline Santana Figueiredo(4), Guilherme Jorge Brigolini Silva(5); Ricardo André Fiorotti Peixoto(6).

(1) *Arquiteta e Urbanista, MSc. Ciências da Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto.*

(2) *Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto.*

(3) *Graduanda em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Ouro Preto.*

(4) *Engenheira Civil, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.*

(5) *Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto.*

*Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro. Ouro Preto-MG, Brasil. CEP 35400-000.
email: wannarquit@gmail.com*

Resumo

O aumento da geração de resíduos sólidos pela indústria extrativa mineral, bem como seu descarte inadequado, tem despertado reflexões acerca da sustentabilidade de seus processos, em virtude, principalmente, dos representativos impactos socioambientais e econômicos as quais suas atividades implicam. Nesse contexto, o uso de rejeito de barragem de minério de ferro (RBMF) como agregado na produção de revestimentos hidráulicos sustentáveis (RHS) poderá contribuir para a destinação adequada do resíduo e mitigação destes impactos. Este trabalho tem como objetivo investigar as propriedades físicas dos RHS para averiguar seu potencial tecnológico em relação aos revestimentos hidráulicos convencionais (RHC). Contudo, antes foram investigadas as propriedades físico-químicas de interesse dos materiais dos revestimentos, sendo esses cimento portland, pigmento inorgânico marrom, aditivo superplastificante, areia de rio e RBMF. Os resultados revelam que o RBMF é constituído por partículas finas e cristalinas, tecnicamente adequado ao uso como agregado quando acompanhado de pigmentos escuros nos ladrilhos, devido sua grande concentração de óxidos de ferro. Análises comparativas entre os revestimentos comprovam as vantagens tecnológicas dos RHS em relação aos convencionais, por apresentar menor variação dimensional, maior resistência a abrasão e resistência a flexão de acordo com os requisitos normativos.

Palavra-Chave: revestimento hidráulico; sustentabilidade; rejeito de barragem de minério de ferro; agregado.

Abstract

The increase in ore tailings generated by the mineral extraction industry as well as its inadequate disposal, has awakened concerns over the sustainability of its processes and products, mainly due to the underlying social, environmental and economic issues. In this context, use of iron ore tailings (IOT) from tailing dams as aggregate in the production of sustainable cement tiles (SCT) can contribute to the proper disposal of the waste and mitigation of these impacts. The aim of this work is to investigate the physical properties of the SCT to ascertain its technological potential in relation to conventional cement tiles (CCT). The physicochemical properties of Portland cement, inorganic pigment, superplasticizer, river sand and IOT were investigated. The results showed that the IOT consist of fine crystalline particles, being appropriate to use as aggregate accompanied with dark pigments in cement tile, due to their concentration of iron oxides. Comparative analyzes between the cement tiles demonstrate the technological advantages of the SCT in relation to the CCT, because they present smaller dimensional variation, greater resistance to abrasion and resistance to bending according to the Brazilian normative requirements.

Keywords: cement tile; sustainability; iron ore tailing dams; aggregate.

1 Introdução

A mineração é uma atividade de suma importância econômica para o Brasil. O minério de ferro corresponde a 87,7% dos bens primários exportados pelo país e a 4% do PIB nacional. As reservas lavráveis brasileiras, com um teor médio de 49,0% de ferro, representam 11,9% das reservas mundiais. Entre os estados brasileiros detentores de reservas de minério de ferro os principais são Minas Gerais (72,5%), Mato Grosso do Sul e Pará (DNPM, 2016).

Paralelamente ao grande número de reservas, o processo de beneficiamento do ferro, aliado à lavra da matéria-prima, produzem um volume de rejeitos de aproximadamente 40% do volume de minério extraído (PORTES, 2013). Esses rejeitos de minério de ferro são dispostos em barragens, estruturas de contenção que retêm lama e líquido e permitem o controle de toda a água percolante. No Brasil, existem 663 barragens de rejeitos, das quais 445 estão localizadas no estado de Minas Gerais (FEAM, 2014). Essas estruturas consomem grandes áreas para formação de seu reservatório e apresentam significativos impactos: desmatamento na fase de construção; poluição da água superficial e subterrânea durante a operação e após o fechamento da mina; geração de poeira na praia de rejeito; impacto visual em toda a vida útil; e severos prejuízos ambientais e humanos em caso de rompimento (SILVA, 2007; DUARTE, 2008; CASTRO et al, 2011). Ademais, recentemente, como resultado dos elevados volumes de produção e do mau gerenciamento dos resíduos, uma barragem rompeu-se em Bento Rodrigues, MG, no que foi considerado um dos maiores desastres ambientais do Brasil e do mundo. Este ocorrido levou à liberação de 62 milhões de metros cúbicos de RBMF, 19 vítimas e um impacto expressivo sobre os ecossistemas ao longo de um raio de 100 km (G1, 2015).

Em razão desse contexto, busca-se hoje maneiras de promover um desenvolvimento sustentável da indústria extrativa mineral (BASTOS, et al, 206; FONTES et al, 2016; SANT'ANA FILHO et al, 2017). O que significa atender às necessidades do mercado sem prejudicar o meio ambiente e conseqüentemente o desenvolvimento das futuras gerações. Em virtude dessa busca, visa-se avaliar o potencial tecnológico do uso de RBMF em substituição ao agregado natural na produção de ladrilhos hidráulicos, como alternativa para a destinação adequada do resíduo e mitigação de seus impactos. Segundo a norma NBR9457 (2013), ladrilho hidráulico é definido por uma "placa cimentícia paralelepípedica de dupla camada, com a superfície exposta ao tráfego lisa ou em baixo relevo".

É importante ressaltar que o Brasil é um dos grandes players mundiais do revestimento (ANFACER, 2015). A retomada dos ladrilhos ao mercado favorece a novas possibilidades de negócio, bem como o aprimoramento de sua técnica produtiva e desenvolvimento de novas padronagens coerentes a necessidades atuais. Pois existe uma forte vertente de movimentos em diversas áreas resgatando elementos do passado e associando-os à contemporaneidade. Tanto na mídia, na moda, quanto na arquitetura, as produções antigas estão ganhando novas conotações e, aliadas às tendências contemporâneas, retomam um lugar de destaque e ganham ainda mais espaço no mercado (MARQUES, 2012).

2 Materiais e métodos

2.1 Amostragem e preparação dos materiais e revestimentos

A amostra composta de RBMF é constituída pela soma de parcelas individuais do resíduo obtido de diferentes pontos e profundidades da barragem de uma usina de processamento do estado de Minas Gerais, Brasil. Estas parcelas após coletadas foram secas ao ar, fragmentadas por um triturador de mandíbulas (RETSCH, modelo BB 200), peneiradas (150 μ m) e misturadas de forma a se obter uma amostra homogênea que, posteriormente, foi armazenada em sacos de plástico hermeticamente fechados e identificados.

O RBMF e outros materiais, sendo esses a areia de rio (partículas menores que 300 μ m), cimento Portland tipo CPV-ARI, pigmento inorgânico marrom, aditivo superplastificante e água, foram utilizados na produção de placas de revestimentos hidráulicos, dimensão de 10x10x2cm. Foram produzidos dois tipos de argamassas compostas por suspensões concentradas de partículas sólidas (pigmento com areia ou RBMF) em um líquido bastante viscoso no estado fresco (pasta de cimento aditivada) no intuito de manter a trabalhabilidade constante durante a moldagem das placas (RHC e RHS). Devido à finura e a alta superfície específica resultante, a argamassa com RBMF requer mais água para obter consistência semelhante à da convencional, propriedade que foi averiguada por um viscosímetro. Na Tabela 1 são apresentadas as dosagens dos materiais constituintes dessas argamassas.

Tabela 1 – Dosagem dos materiais das argamassas dos revestimentos

Placas	Traços	Materiais
RHC	1:1:0,1:0,02:0,6	areia : cimento : pigmento : aditivo : água
RHS	1:1:0,1:0,02:0,68	RBMF : cimento : pigmento : aditivo : água

A utilização de fôrmas metálicas com a base revestida com um plástico possibilitou uma rigidez adequada para moldagem, bem como uma superfície lisa e brilhante nos revestimentos hidráulicos, conforme apresentado na Figura 1. Além de suportar um grande número de ciclos de moldagem. Após moldadas, depois de 8h foi procedida a desforma das placas, cura por imersão em água durante 24h, prosseguida por cura em câmara úmida até a idade de 14 dias.

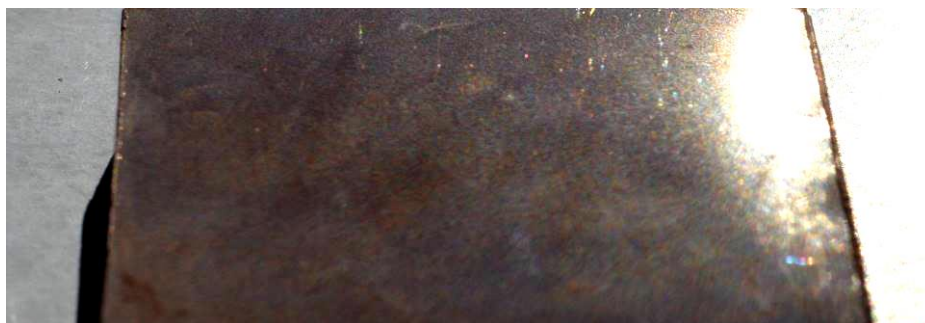


Figura 1 – Superfície lisa e brilhante do RHS.

2.2 Caracterização dos materiais

A caracterização física dos agregados, areia e RBMF, foi procedida por ensaios de massa específica (ABNT NBR NM 52, 2009), massa unitária (ABNT NBR NM 45, 2006), teor de umidade (ABNT NBR 9939, 2011); distribuição granulométrica por difração a laser (Bettersize 2000). Antes, as amostras foram preparadas por meio de secagem em estufa a 105°C, durante 24h.

Os elementos químicos que compõem as amostras de agregados, areia e RBMF, foram identificados por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), o equipamento utilizado foi da marca Shimadzu, modelo EDS-720. Enquanto as imagens obtidas por um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da Shimadzu, Superscan SSX-550, permitiram analisar a morfologia e microestrutura do rejeito.

Os demais materiais utilizados neste trabalho (cimento, aditivo químico e água) foram os mesmos utilizados na produção de elementos pré-moldados de concreto. São materiais que já cumprem todas as exigências estabelecidas pela ABNT NBR 9457 (2013).

2.3 Caracterização dos revestimentos

Foram procedidos ensaios para verificar as propriedades das argamassas dos revestimentos, no estado endurecido, a fim de compreender e correlacionar as propriedades físicas e mecânicas dos mesmos. Todo o plano experimental foi fundamentado em análises comparativas, onde a areia, assim como o revestimento produzido com matriz cimentícia convencional (RHC) foi tomado como referência.

A absorção de água por imersão, o índice de vazios e a massa específica das argamassas dos revestimentos foi determinada segundo as especificações de ensaio da ABNT NBR9778 (2005). Enquanto a resistência mecânica das placas foi verificada de acordo com a ABNT NBR 13818 (1997), conforme recomendação da ABNT NBR 9457 (2013). A resistência a abrasão das placas foi procedida por uma adaptação à norma NBR13818 (1997). Nesse ensaio utilizou-se uma politriz, na qual o disco possui 180 mm de diâmetro e 2,35mm de espessura. Com um suporte fixo, a politriz utilizada possuiu a mesma função do disco rotativo de aço e do material abrasivo, especificados pela norma. Como contrapeso foi utilizado um corpo de prova cilíndrico de massa 4241,1g, sua função foi a de promover uma pressão constante nos ladrilhos durante o ensaio. Os ladrilhos foram posicionados de forma perpendicular à direção de corte da politriz. O tempo de 10s foi cronometrado para todos os testes, devido ao rápido desgaste causado pela politriz que possui uma velocidade de 1720 rpm. Foram realizados quinze testes em cada tratamento para obter-se maior precisão. Para o cálculo dos resultados, assim como a norma dita, foi medido o volume do material removido por cada tratamento, depois foi calculada a média entre eles.

As análises da variação dimensional e do aspecto visual consistiram na comparação das dimensões das placas em distintas condições, secas em estufa (100°C até a estabilização

da massa) e saturadas (submersas em água por 72h), assim como a qualidade da superfície aparente e diferenças de tonalidades, respectivamente.

3 Resultados e discussão

3.1 Caracterização físico-química dos materiais

Parte dos resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados, areia e RBMF, utilizados na produção dos revestimentos hidráulicos estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Massa específica, massa unitária e teor de umidade dos agregados.

Agregado	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)	Teor de umidade (%)
Areia	2,69	1,54	0,06
RBMF	3,37	1,80	0,14

Através dos resultados obtidos pode-se verificar que a massa específica do rejeito é 21,2% superior à da areia, enquanto a massa unitária do RBMF 14,4% superior ao da areia, em função da grande concentração de finos e composição química do rejeito (ver Tabela 4 e Figura 4). O RBMF apresentou um teor elevado de umidade em comparação a areia.

A Figura 2 mostra a distribuição de tamanho de partículas dos agregados. As dimensões características, D10, D50 e D90 podem ser vistas na Tabela 3 (onde DN corresponde ao diâmetro hipotético da peneira, em milímetros, acima do qual passou N% do material). Ao analisar os resultados, é perceptível que o RBMF, assim como a areia, é um material particularmente fino, com 90% de suas partículas menores que 0,17 mm e as da areia 90% são menores que 0,19 mm.

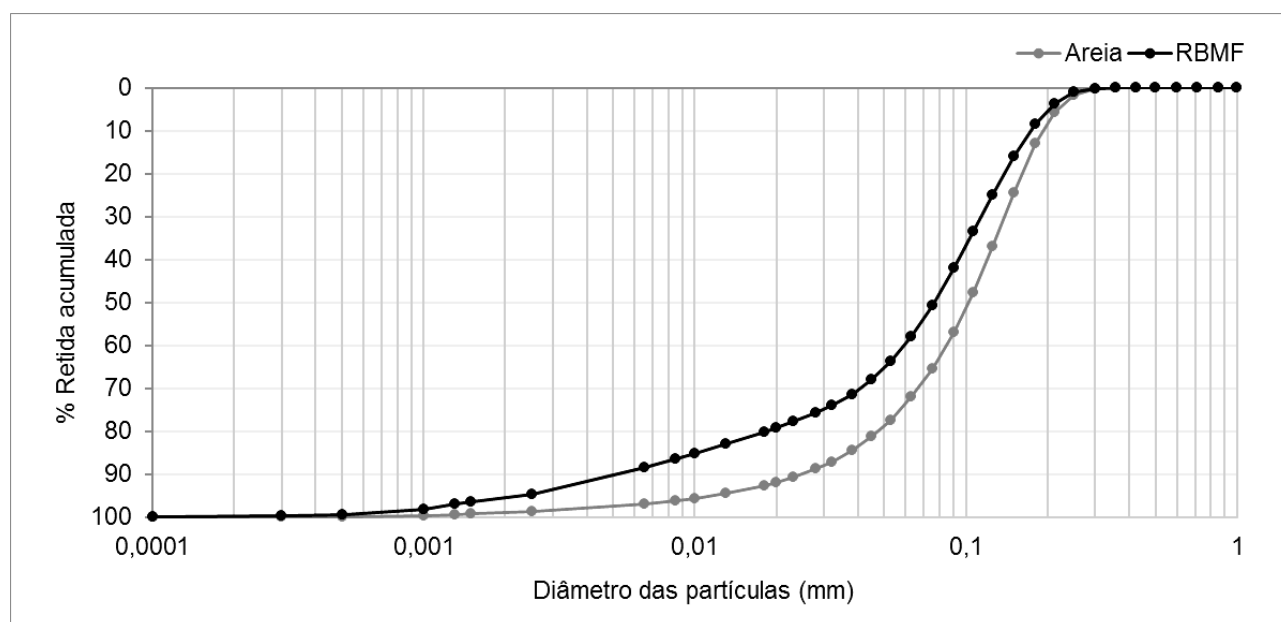


Figura 2 – Distribuição granulométrica dos agregados.

Tabela 3 – Dimensões características dos agregados.

Dimensões características	Areia	RBMF
D10 (mm)	0,02	0,005
D50 (mm)	0,10	0,07
D90 (mm)	0,19	0,17

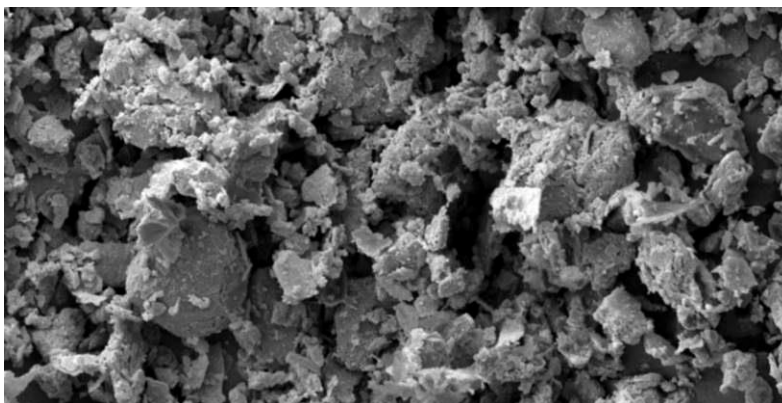


Figura 3 – Imagem de MEV do RBMF, 500X.

A Figura 3 permite analisar a morfologia das partículas de RBMF. Esta imagem indica a existência de um sistema volumétrico compreendendo grãos particulares com distintas formas e vários tamanhos.

Os resultados da FRX indicam que o RBMF consiste basicamente em hematita, sílica e alumina, contendo quantidades menos representativas de manganês e potássio. Acredita-se que esta quantidade inexpressiva não afete a durabilidade da argamassa. A porcentagem média dos componentes químicos é mostrada na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição dos agregados (% molar) obtida por FRX.

Componentes	Areia	RBMF
MgO	-	0,179
Al ₂ O ₃	31,251	8,781
SiO ₂	59,615	40,095
P ₂ O ₅	-	0,554
SO ₃	0,961	-
K ₂ O	1,662	0,297
CaO	0,499	0,144
TiO ₂	1,156	0,139
MnO	0,079	0,427
Fe ₂ O ₃	4,706	48,979
Eu ₂ O ₃	-	0,174
V ₂ O ₅	0,037	-
ZrO ₂	0,018	-
P.P.M	0,017	0,231

3.2 Caracterização física e mecânica dos revestimentos

Os resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica seca, saturada e real das placas de revestimentos hidráulicos, RHC e RHS, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Absorção de água e índice de vazio e massa específica das placas de revestimentos hidráulicos.

Placas	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (g/cm ³)		
			Amostra seca	Amostra saturada	Amostra real
RHC	17,11	30,04	1,76	2,06	2,51
RHS	21,18	36,46	1,72	2,09	2,71

A absorção de água é uma propriedade de suma importância as placas de revestimentos, pois ela indica a porosidade da peça que, conseqüentemente, irá influenciar na sua variação dimensional e desempenho mecânico. Entretanto, é necessário correlacioná-la a outras propriedades. Então, verifica-se, a partir da análise dos dados da Tabela 5, que o RHS é um pouco mais poroso do que o revestimento convencional por apresentar maiores teores de absorção de água e índice de vazios, cerca de 4,07% e 6,42% a mais, respectivamente. A diferença entre a massa específica do RHS seco e a saturado, também evidenciam essa porosidade da placa cimentícia. Provavelmente em função da grande concentração de partícula finas e morfologia heterogênea do rejeito (ver Fig.3 e 5), o que exige um maior consumo de água para obter a consistência necessária a argamassa (ver Tabela 1), sendo que, posteriormente, com a cura, irá formar espaços vazios entre suas partículas. Contudo, existe uma proximidade quanto a porosidade dos revestimentos hidráulicos sustentável e convencional.

Na figura 4 são apresentadas as áreas das superfícies aparentes dos revestimentos hidráulicos, após serem secos em estufa a 100°C e submersos em água por 72h.

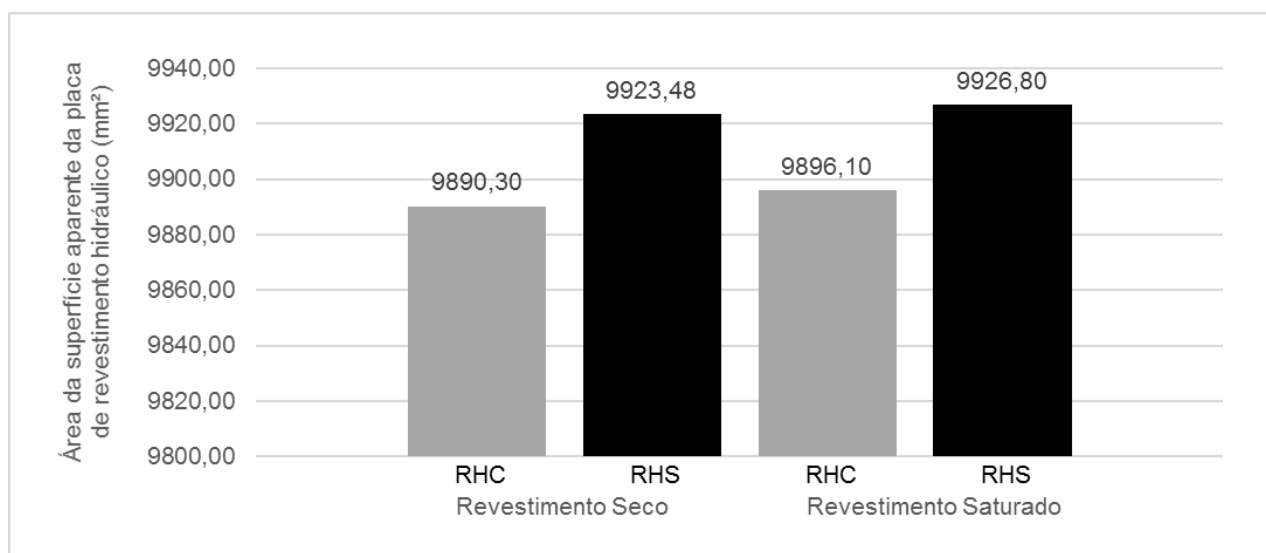


Figura 4 – Áreas da superfície aparente das placas de revestimento hidráulicos, antes e após saturação.

Observa-se, a partir da Figura 4, que tanto o RHC, quanto o sustentável (RHS), não apresentaram variações significativas de sua geometria. Isso indica a viabilidade de um

uso versátil a esses revestimentos (ambientes secos e molhados) por apresentar pouca retração por aumento de temperatura e expansão por umidade. Ainda, quando saturadas, as placas permaneceram íntegras e com tonalidade homogênea, porém mais intensa.

Quanto a resistência à flexão das placas, de acordo com os resultados apresentados na Figura 5, nota-se que a resistência encontrada para o RHS está abaixo da resistência do revestimento convencional. No entanto, o revestimento hidráulico sustentável possui um resultado satisfatório, com 3,56 Mpa, e ambas estão dentro dos padrões normativos da ABNT.

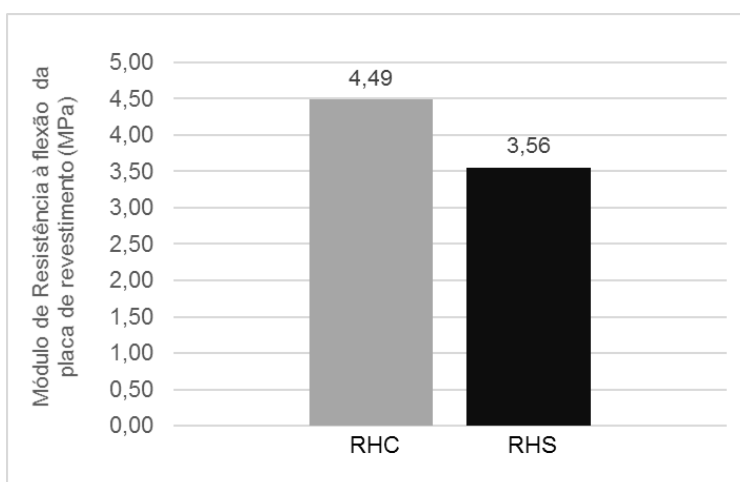


Figura 5 - Resistência característica à flexão das placas de revestimentos hidráulicos.

O resultado de resistência a abrasão profunda das placas, realizado a partir de uma adaptação da norma NBR13818: 1997, estão apresentados na Figura 6.

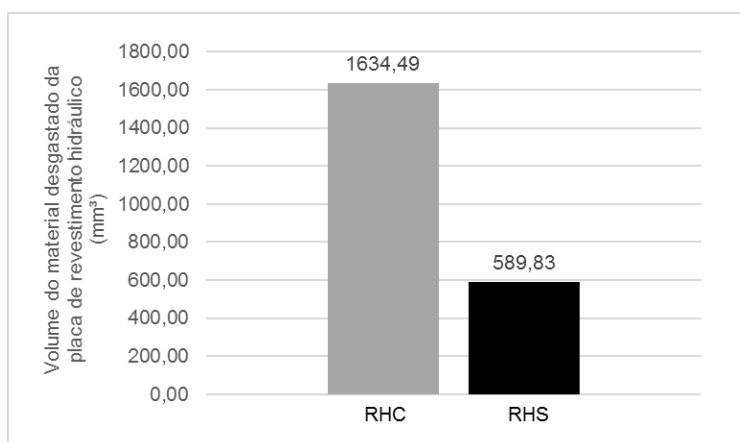


Figura 6 - Resistência a abrasão profunda das placas de revestimentos hidráulicos.

Através da análise comparativa entre os volumes de material desgastado por abrasão, apresentados na Figura 6, percebe-se que o RHS apresentou maior resistência a abrasão em relação ao RHC. Esse resultado pode ser justificado pelo fato do RBMF ter maior concentração de finos e ser mais denso em relação a areia, proporcionando ao revestimento uma superfície mais resistente e menos porosa.

4 Conclusões

Como resultado da caracterização física e química dos agregados, conclui-se que o RBMF é um material fino, estável, cristalino. Características que contribuíram para uma maior resistência a abrasão do RHS em relação ao revestimento convencional. Ademais, outras análises comparativas entre as propriedades físicas dos revestimentos, permitiram concluir que apesar do RHS ser um pouco mais poroso do que o RHC, ele apresentou pouca variação dimensional quando submetido a um aumento de temperatura e submerso em água, assim como resistência a flexão compatível aos padrões normativos da ABNT. Sendo, portanto, tecnicamente viável o uso do RBMF como agregado fino na produção de placas de revestimentos à base de cimento.

5 Agradecimentos

Agradecemos às instituições FAPEMIG, CNPq, CAPES, UFOP e Fundação Gorceix pela prestação de serviços e apoio financeiro. Agradecemos também ao Laboratório de Microscopia Eletrônica Nanolab, da Redemat, UFOP, pelo fornecimento de suporte técnico envolvendo microscopia eletrônica de varredura e a infraestrutura e colaboração do Grupo de Pesquisa de Resíduos Sólidos - RECICLOS-CNPq.

6 Referências

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9457: Ladrilhos hidráulicos para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 9939: Agregados – Determinação do teor de umidade total, por secagem**. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 13818: Placas cerâmicas para revestimento – Especificações e métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, 1997.

Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres (ANFACER). **Cerâmica na atualidade**. Disponível em: <http://www.anfacer.org.br/site/default.aspx?idConteudo=157&n=Hist%C3%B3ria-da-Cer%C3%A2mica#atualidade>. Acesso em: 10 abr. 2015.

BASTOS, L. A. C.; SILVA, G. C.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. (2016). **Using iron ore tailings from tailing dams as road material**. J. Mater. Civ. Eng.,04016102.

CASTRO, T. A.; NALINI JUNIOR, H. A.; LIMA, H. M. **Entendendo a Mineração no Quadrilátero Ferrífero**. Belo Horizonte: Ecológico. 93 p. 2011.

Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). **Sumário Mineral 2015**. V.35. Brasília, 2016b.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. 2008. 130f. Tese (doutorado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2008

FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais). **Gestão de barragens, 2014**. Disponível em <http://www.feam.br/monitoramento/gestao-de-barragens>, acessado em 07 de julho, 2016.

FONTES, W. C; MENDES, J. C; SILVA, S. N; PEIXOTO, R. A. F. (2016). **Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. Construction and Building Materials**.112, 988–995.

G1 (2015). **Lama de barragens atinge áreas a até 100 km de distância em MG**. Disponível em <http://g1.globo.com/minas-gerais/noticia/2015/11/hidreletrica-100-km-e-afetada-por-lama-do-rompimento-de-barragens.html>, acessado em 20 de setembro de 2016.

MARQUES, J. S. **Estudo do processo de produção de ladrilhos hidráulicos visando à incorporação de resíduos sólidos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2012.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta**. 2013. 180f. Tese (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais. 2013.

SANT'ANA FILHO, J. N; SILVA, S. N.; SILVA G. C.; MENDES J. C.; PEIXOTO, R. A. F. (2017). **Technical and environmental feasibility of interlocking concrete pavers with iron ore tailings from tailings dams**. Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers. 04017104,1-6.

SILVA, J. P. S. **Impactos ambientais causados por mineração**. Revista Espaço da Sophia. n.8. 2007.