

Pavers Sustentáveis com Rejeito de Barragem de Minério de Ferro

Concepção e Objetivos

Nos últimos anos, o aumento na geração de resíduos sólidos pelas indústrias tem motivado reflexões a respeito da sustentabilidade de seus processos. A mineração de ferro tem grande importância para a economia brasileira, mas seus resíduos dão origem a graves questões sociais e ambientais, além de requererem um gerenciamento oneroso e complexo. Uma das formas de minimizar estes problemas é a reciclagem de rejeitos, cuja indústria da construção civil tem um grande potencial de absorção.

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral, dezenas de milhões de toneladas de rejeitos de minério de ferro são geradas anualmente, criando um considerável passivo ambiental. Os significativos volumes originados pelos processos de beneficiamento são comumente dispostos de forma direta sobre a superfície do terreno, em reservatórios, formando bacias conhecidas também como barragens de rejeitos.

As barragens de rejeitos são estruturas de contenção que retêm lama e líquido e permitem o controle de toda a água percolante. Entretanto, consomem grandes áreas para formação de seu reservatório. Assim, causam impactos diretos nos biomas, e ainda provocam insegurança às populações que as circundam. Além disso, esse tipo de deposição de resíduos apresenta elevados custos de manutenção e monitoramento.

Por sua vez, o crescimento da economia brasileira tem aumentando a demanda por agregados naturais para o uso na construção civil. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM, mais de 800 milhões de toneladas de agregados naturais foram consumidas apenas em 2015, principalmente na região Sudeste. Paralelamente, aumentam as restrições ambientais à sua exploração, bem como a distância de transporte do local de obtenção ao local de utilização, afetando o custo final da obra.

Destaca-se também a atual situação da malha rodoviária brasileira. Segundo dados do Plano Nacional de Viação de 2013, o território brasileiro possui atualmente uma malha viária composta por 1.561.381,9 km de rodovias que conectam as diversas regiões do país. De toda malha viária nacional apenas 202.589 km (13%) encontram-se pavimentadas.

Desta forma, a aplicação de rejeito de barragem de minério de ferro (RBMF) como matéria prima para elementos da construção civil e infraestrutura rodoviária pode representar alternativa viável para a redução dos passivos ambientais e sociais, ocasionados não somente pelos depósitos nas barragens de rejeito, mas também pela extração de agregados naturais. Uma solução de pavimentação de fácil aplicação, resistente e durável são os pisos intertravados.

Os pisos intertravados são pavimentos flexíveis formador por peças de concreto justapostas. As peças de concreto para pavimentação, ou pavers, são pequenos blocos de concreto produzidos industrialmente, o que indica custo relativamente reduzido e uniformidade. Devidamente assentados e compactados formam uma pavimentação intertravada, prática e altamente durável. O espaço entre os blocos promove permeabilidade ao sistema e permite que as águas pluviais se infiltrem no solo ou em bacias de armazenamento subterrâneo. Dessa forma, este material permite recarregar o lençol

freático, além de reduzir o escoamento direto e consequente sobrecarga sobre os cursos d'água.

Portanto, para contribuir com as ações que possam minimizar impactos ambientais, sociais e econômicos provocados pela atividade mineradora, bem como desenvolver novos materiais de base tecnológica aplicáveis no setor da construção civil, propõe-se o uso do RBMF como agregado miúdo na produção de blocos de pavimentação – pavers sustentáveis.

Escopo e desenvolvimento do trabalho

O presente estudo abrangeu etapas de caracterização mecânica, química e de impacto ambiental dos RBMF, e comparação com materiais comumente utilizados. A seguir, foram dimensionadas as dosagens ótimas para a produção de matrizes cimentícias. Os pavers foram produzidos em uma fábrica de pré-moldados especializada nestes elementos. Finalmente, determinou-se o desempenho mecânico e durabilidade dos compósitos produzidos. Essa sequência de testes é detalhada nas próximas seções.

Materiais

Para este trabalho, foram utilizados os seguintes materiais:

- Rejeito de Barragem de Minério de Ferro (RBMF), *in natura*, sujeito apenas à secagem.
- Areia de rio regional.
- Água potável.
- Brita de gnaiss regional.
- Cimento Portland tipo CPV-ARI.
- Aditivo plastificante.

Dosagens

As peças mais encontradas no mercado são as de 35 MPa, usadas em vias de tráfego leve, médio e pesado. Os blocos de 50 MPa são indicados para aplicações especiais em que o piso sofre também desgaste por atrito - caso de pátios de indústrias, portos, etc. O dimensionamento teórico partiu de uma mistura padrão para 50 MPa, chamada de blocos de Referência. Esta mistura foi confeccionada com cimento, areia natural, pedra britada, água e aditivo plastificante, no traço 1:1,78:0,75:0,17:0,02. Nas demais misturas, o agregado natural miúdo (areia) foi substituído parcialmente por RBMF, nas proporções 10%, 50% e 80%. Os blocos foram compactados em uma vibroprensa, e apresentaram aspecto visual satisfatório, similar ao produto comercial, sem rebarbas ou reentrâncias, como visto na Figura 1.

Origem e Fabricação

Os RBMF originam-se de uma mineradora no estado de Minas Gerais. Os pontos amostrados foram distribuídos uniformemente ao longo da costa da barragem de rejeito. Após a amostragem e o transporte, foi realizada secagem ao ar, seguida de destorroamento, e armazenamento em sacos plásticos hermeticamente fechados.

Foram produzidos blocos com 16 faces e 8cm de altura. A fabricação seguiu o processo industrial convencional: moldagem em vibroprensa com um sistema automático de desmoldagem e armazenados em paletes (Figura 2). Os elementos foram curados ao ar livre por 7 e 70 dias, sendo umedecidos diariamente nos primeiros 3 dias e protegidos sob folhas plásticas pelos primeiros 6 dias.

Ensaio Realizados

Ensaio com RBMF

Os materiais foram caracterizados de acordo com suas propriedades químicas e físicas. Na caracterização química, foram realizadas Fluorescência de raios-X (FRX), e Difração de raios-X (DRX), ambos em equipamentos Shimadzu 7000. A morfologia dos materiais foi analisada através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), com um equipamento SHIMADZU modelo 550X. A preparação de amostras incluiu secagem em estufa a 105°C durante 24 horas, e trituração num moinho de bolas de alta eficiência (Retsch PM100) durante 5 minutos a 300 rpm. Quanto aos parâmetros físicos, foram feitos ensaios de determinação de massa específica real e aparente e de distribuição granulométrica por meio de peneiramento e difração de laser.

Análises Ambientais

Foram realizados testes de lixiviação e dissolução nos blocos, em conformidade com as normas NBR 10005 e NBR 10006, para avaliar o nível de contaminação dos elementos potencialmente tóxicos presentes. Materiais sólidos podem ser classificados como Classe I - perigoso, ou Classe II - não-perigoso. Além disso, a Classe II é dividida em Classe II A – não perigosos e não inertes, e Classe II B – não perigosos e inertes, o que seria o melhor cenário possível.

Ensaio Físicos com os Pavers

Os blocos foram analisados também quanto à uniformidade dimensional, absorção de água após 42 dias de imersão, porosidade, bem como resistência à compressão e à abrasão. Para cada ensaio, foram avaliadas três amostras, exceto para a resistência à compressão e resistência à abrasão, que usaram seis.

Para avaliar a uniformidade dimensional, os blocos foram submersos em água por 42 dias. As variações dimensionais ocasionadas pela absorção foram determinadas por medição do comprimento entre pinos previamente afixados aos blocos. A porosidade dos blocos foi medida num equipamento de tomografia de raios X, automaticamente ajustado para o melhor contraste. Este equipamento informa diretamente a porosidade do objeto, em relação a um sólido homogêneo, com base na análise dos espaços vazios das suas seções.

Ensaio Mecânicos com os Pavers

Os testes de resistência à compressão foram realizados de acordo com a norma NBR 9780. Os valores característicos para a resistência à compressão mecânica foram determinados de acordo com a equação (1)

$$f_{pk} = f_p - (t * s) \quad (1)$$

Onde f_{pk} a resistência à compressão característica (MPa); f_p é a resistência média (MPa); s é o desvio padrão; e $t = 0,920$ é o coeficiente de Student (parâmetro estatístico para seis amostras, segundo NBR 9780).

A resistência à abrasão foi obtida de acordo com a norma ASTM G65-00 num aparelho de rodas de borracha utilizando a alumina comercial como partícula abrasiva.

Resultados Quantitativos

Cabe ressaltar que os valores exibidos nesta seção já são os valores significativos, segundo os tratamentos estatísticos aplicáveis da normalização de referência.

Resultados dos ensaios com o RBMF

Os resultados de FRX mostram que o rejeito de barragem de minério de ferro (RBMF) é composto principalmente por óxidos de silício (63%), óxidos de ferro (35%), e óxidos de alumínio (1,2%). O difratograma de raios-X mostrou principalmente a presença de Quartzo (SiO_2), hematita (Fe_2O_3) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) (Figura 3). A análise química não mostrou substâncias prejudiciais ou expansivas em concentração considerável.

Na figura 4 é mostrada a distribuição granulométrica dos agregados por peneiramento e laser. É notório que RBMF é um material particularmente fino, com aproximadamente 42% das partículas do material maiores do que $75\mu\text{m}$ (peneira #200); enquanto o agregado miúdo natural, areia de rio, apresentou mais que 99% do material retido na peneira #200.

O resultado da massa específica real resultou em $2,66\text{ g/cm}^3$ para a areia de rio e $3,88\text{ g/cm}^3$ para o RBMF, enquanto a massa específica aparente obtida foi $1,46\text{ g/cm}^3$ e $1,89\text{ g/cm}^3$, respectivamente. Essa diferença é principalmente devida à composição química do RBMF – maior teor de moléculas pesadas de óxidos de ferro.

No que diz respeito à microestrutura (Figura 5), as partículas de RBMF mostram uma morfologia irregular, com uma grande quantidade de finos. A finura do material, como também mostrado pela sua distribuição granulométrica, permite a sua utilização como pigmento e material de enchimento (filler), reduzindo, assim, os poros e aprimorando os aspectos estéticos da matriz. Como resultado da caracterização física e química, o RBMF é um material cristalino, fino e viável para ser utilizado como pigmento, filler e agregado miúdo, como também observado por Fontes et al. (2016) e Bastos et al. (2016).

Resultado das Análises Ambientais

Os testes de lixiviação e dissolução realizados com os blocos produzidos com RBMF confirmam a sua viabilidade ambiental. De acordo com as prescrições da norma NBR 10004, os blocos foram classificados como Classe II B, não perigosos e inertes. Assim, eles não apresentam características perigosas, como corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade ou inflamabilidade (NBR 10004).

Resultados Físicos dos Pavers

Para a determinação da porosidade dos blocos de pavimentação produzidos com rejeito de minério de ferro e com agregados naturais, utilizou-se técnica de imagens por tomografia computadorizada. Observa-se na Figura 6 que o traço referencial (REF) apresentou imagem com maior incidência de pontos escuros, que representam vazios, que vão diminuindo com a substituição do agregado natural por rejeito. Pode ser confirmado o efeito de fechamento dos poros (efeito filler) após a adição do RBMF em substituição da areia.

Outro parâmetro estudado foi a variação de massa e porosidade dos tratamentos com rejeito em relação ao testemunho de referência, como mostrado na Figura 7. A massa aumenta com a substituição de agregado natural por RBMF e está relacionada à maior ou

menor presença de poros, e também à constituição química dos agregados. Ou seja, para maior concentração de rejeitos, obtém-se maior concentração de ferro com maior massa específica. Por sua vez, a porosidade é resultante das análises da tomografia de raios X, e diminui conforme aumenta a porcentagem de finos de RBMF.

Para determinação da estabilidade dimensional dos blocos de pavimentação, segundo ciclos de molhagem e secagem, os corpos de prova tiveram pinos de aço inox fixados com graute em sua superfície. Após 24h de cura do graute, determinou-se medida inicial de referência. Estes corpos de prova foram imersos em tanque de água, em intervalos de 1 dia (24 horas), 3 dias (72 horas), 7 dias (168 horas), 21 dias (504 horas), 28 dias (672 horas) e 42 dias (1008 horas). As medidas para cada um dos intervalos foram obtidas e relacionadas à determinação inicial. Não houve expansibilidade dos blocos de pavimentação produzidos com agregados naturais nem dos produzidos com rejeito.

Para determinação da absorção de água (NBR 12118:2006), os blocos de pavimentação foram submetidos à saturação pelos períodos experimentais de 1, 3, 7, 21, 28 e 42 dias. Os resultados percentuais finais (aos 42 dias) estão indicados na Figura 8. Observa-se que, quanto maior a adição de resíduo de minério de ferro, maior o preenchimento dos poros, e, portanto, menor absorção de água.

Resultados Mecânicos dos Pavers

Os resultados obtidos do ensaio de resistência à compressão evidenciam que os blocos de pavimentação apresentam resistências mecânicas superiores a 50 MPa, para idades de 7 e 70 dias. Esses resultados qualificam os blocos para utilização como material de revestimento de vias de elevados esforços de abrasão, como pátios de indústrias e corredores de ônibus, de acordo com a NBR 9781. Como mostrado na Figura 9, as exceções são os blocos obtidos do tratamento com 80% de RBMF para as idades de 7 e 70 dias, e os obtidos do tratamento com 50% de RBMF para a idade de 7 dias.

No entanto, a resistência acima de 35 MPa ainda habilita os traços para uso como revestimento em vias de tráfego leve, normal e pesado, em vias de acesso primário, como ruas de condomínios e vias de tráfego vicinal. Todos os traços superaram este limite aos 7 dias.

Por sua vez, o ensaio de resistência à abrasão obedeceu aos requerimentos da norma americana ASTM G 65-00- 2001. Na Figura 10 são mostrados os valores médios de desgaste após 120 minutos de ensaio. A comparação permite observar que para valores intermediários de substituição de areia por RBMF (10% e 50%), há uma menor perda de massa, o que indica uma maior durabilidade destes blocos. Essa perda de massa inferior ao convencional é provavelmente devida à maior integridade da matriz a partir do efeito filler do RBMF. Por sua vez, a perda de massa superior do bloco com 80% de substituição deve-se provavelmente à queda na resistência mecânica dessa matriz. Em todos os casos, contudo, a perda de massa relativa (em relação à massa dos blocos) não foi superior à do bloco convencional de referência.

Resultados Qualitativos

Cor

Os blocos de RBMF são naturalmente de cor avermelhada, devido ao grande teor de óxidos de ferro na sua composição. Isso significa que a cor não se esvai com o tempo, intempéries, ou com o desgaste superficial. Assim, os blocos de RBMF, além de possuírem valor estético sem a necessidade de pigmentos artificiais, podem ser utilizados em conjunto com blocos convencionais para demarcar o limite de faixas de trânsito (com os blocos convencionais como linha de demarcação). Essa configuração não se desgasta nem perde o contraste com o tempo; proporcionando, assim, segurança para os motoristas durante toda a vida útil do pavimento.

Impactos sociais e ambientais

Os blocos de concreto intertravado são materiais amplamente utilizados na infraestrutura rodoviária no mundo. De 380.000 a 650.000 blocos, dependendo do sua área, são usados para pavimentar 1 km de uma estrada padrão de largura 13,2m (com 2 pistas e 2 acostamentos). Isso significa que, apenas o Brasil tem o potencial de consumir cerca de 700 bilhões de blocos na pavimentação de suas estradas, removendo rejeitos da natureza, aprimorando o sistema de transporte rodoviário e criando oportunidades econômicas para as populações afetadas pelas barragens de rejeitos.

Além disso, garante-se a segurança do ecossistema onde o paver é instalado e do trabalhador, pois o RBMF é um resíduo classe II B – não perigoso e inerte.

Produtividade e Viabilidade

O novo paver não impõe modificações ao processo produtivo vigente, altamente mecanizado e produtivo. Cabe mencionar que esta indústria não requer aquecimento do material, tal qual as indústrias cerâmicas e o cimento asfáltico de petróleo, apresentando, assim, um reduzido consumo de energia.

O RBMF é um resíduo disponível em grandes quantidades na região de maior consumo de agregados do Brasil – a região Sudeste. Não são requeridos processos de beneficiamentos do material, além da secagem (nos casos onde houver necessidade). Além de abundante, o RBMF é um material fino, cristalino e inerte, conforme comprovou a caracterização físico-química, e, portanto, apto para ser utilizado como material de construção civil.

Grau de Inovação

A reutilização do RBMF como matéria-prima para matrizes cimentícias vem sendo amplamente estudada nos últimos anos. Luo et al. (2016), Duan et al. (2016), entre outros, avaliaram seu uso como aglomerante; Bastos et al. (2016), como infra-estrutura para pavimentação; e Fontes et al. (2016), Yellishetty et al. (2008) e Shettima et al. (2016) como agregado para concretos e argamassas moldados *in loco*.

No entanto, não foram encontradas na literatura nacional ou internacional, bem como depósitos de patentes, trabalho tão abrangente em relação ao uso de RBMF em elementos pré-moldados de concreto. Assim, o presente trabalho mostra a viabilidade deste material na fabricação em massa de elementos industrializados. Os novos pavers de RBMF não apresentaram toxicidade, variação dimensional, fissuras ou instabilidade química; e ainda

demonstraram desempenho superior aos convencionais em aspectos como absorção de água e resistência à abrasão.

Conclusão

Os pavers sustentáveis produzidos com rejeito de barragem de minério de ferro (RBMF) apresentaram-se estáveis relativamente à variação dimensional; são, ainda, menos porosos e absorvem menos água do que os blocos produzidos com o traço de referência, o que sugere maior durabilidade. São naturalmente coloridos, e sua cor não se desgasta com o tempo.

Os blocos produzidos com 10% e 50% de RBMF em substituição ao agregado miúdo atendem aos requisitos mínimos para utilização em vias de tráfego convencional e em locais sujeitos a elevados esforços de abrasão, como pátios de indústrias e corredores de ônibus. O traço com 80% de substituição ainda pode ser empregado em vias de tráfego convencional - leve, médio e pesado.

Adicionalmente, os pavers sustentáveis foram classificados como Classe II B, não perigosos e inertes. Assim, eles não apresentam características perigosas para os seres humanos ou o meio ambiente, como corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade ou inflamabilidade.

Os resultados da caracterização física, química e ambiental demonstram a viabilidade técnica e ambiental dos pavers sustentáveis de RBMF. Assim, este novo material busca contribuir para a mitigação dos impactos ambientais e sociais da indústria de mineração de ferro, reduzir a exploração de agregados naturais, aprimorar o conhecimento técnico de compósitos cimentícios e desenvolver materiais de alta performance e responsabilidade ambiental.

Principais Referências

Bastos LAC, Silva GC, Mendes JC, Peixoto RAF. Using iron ore tailings from tailing dams as road material. *Journal of Materials in Civil Engineering* (in press), 2016.

Duan P., Yan C., Zhou W., Ren D. Fresh properties, compressive strength and microstructure of fly ash geopolymer paste blended with iron ore tailing under thermal cycle, *Construction and Building Materials* 118 (76-88).

Fontes, WC, Mendes, JC, Silva, SN, Peixoto, RAF. Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams, *Construction and Building Materials*, Volume 112 (2016)

Luo L., Zhang Y., Bao S., Chen T. "Utilization of Iron Ore Tailings as Raw Material for Portland Cement Clinker Production," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2016, Article ID 1596047, 6 pages, 2016.

Shettima A.U., Hussin M.W., Ahmad Y., Mirza J. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete, *Construction and Building Materials* 120 (72-79).

Yellishetty M., Karpe V., Reddy E.H, Subhash K.N. Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: a case study – resources, *Conserv. Recycl.* 52 (2008) 1283–1289.