

ESTUDO DO APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO NA PRODUÇÃO DE PAVERS¹

Camila Gonçalves Castro²

Fabiane Leocádia da Silva³

Fernando Gabriel da Silva Araújo⁴

Fernando Leopoldo von Krüger⁵

Jefferson Januário Mendes⁶

Resumo

Este trabalho estuda o potencial uso de rejeitos de concentração como parte do traço de blocos intertravados de concreto, em substituição à areia de sílica. Com isto, além de uma destinação ambientalmente correta para os resíduos, espera-se propiciar material de baixo custo para o estímulo de novos negócios na comunidade impactada pela atividade mineradora. Para os primeiros experimentos, devido à grande variedade de traços e dosagens de blocos de concreto encontrados como referência, partiu-se de uma composição básica contendo agregados finos e graúdos, os quais foram sistematicamente substituídos por rejeitos de concentração oriundos de testes piloto. As amostras foram divididas quanto à granulometria e processo de procedência, consistindo de rejeitos de flotação, rejeitos finos de separação magnética e rejeitos grossos de separação magnética. Os rejeitos de concentração de minério de ferro mostraram-se como materiais viáveis na substituição de agregados finos e grossos de bloco intertravados de concreto (Pavers), no que diz respeito à resistência mecânica após cura de 28 dias. Quanto à hermeticidade, os corpos de prova com a adição de resíduos passaram a ter maior porosidade o que é um bom indicador para a confecção dos blocos de concreto. Verificou-se também, através de testes de lixiviação, que a adição dos rejeitos aos blocos de concreto não representa risco ao meio ambiente quando submetidos a intempéries.

Palavras-chave: Pavers; Resíduo; Minério de ferro.

RECOVERY AND RECYCLING OF TAILINGS IN MINING PRODUCTION OF PAVERS

Abstract

This paper studies the potential use of tailings as part of the trace concentration of interlocking concrete blocks, replacing the silica sand. With this, plus a destination for environmentally friendly waste is expected to provide low cost material to stimulate new business in the community impacted by mining activity. For the first experiments, due to the wide variety of traits and strengths of concrete blocks found as a reference, broke a basic composition containing coarse and fine aggregates, which were systematically replaced by concentration tailings from pilot testing. The samples were divided as to the merits and grinding process, consisting of flotation tailings, fine tailings of magnetic separation and magnetic separation of coarse tailings. The tailings concentration of iron ore materials as shown in viable replacement of fine and coarse aggregates interlocking concrete block (pavers), with regard to mechanical strength after curing of 28 days. As for the leak, the specimens with the addition of waste now have greater porosity which is a good indicator for the manufacturing of concrete blocks. It was found also by leaching tests that the addition of tailings to the concrete blocks poses no risk to the environment when subjected to weathering.

Keywords: Pavers; Tailings; Iron ore.

¹ *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Designer. Mestre. Professora. Cefet. Belo Horizonte, MG, Brasil,*

³ *Física. Mestranda em Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

⁴ *Físico. Dr. Professor. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil.*

⁵ *Engenheiro metalúrgico. Dr. Engenheiro, Fundação Gorceix, Ouro Preto, MG, Brasil.*

⁶ *Engenheiro de Produção. Mestre. Professor. IFMG. Ouro Preto, MG, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A atividade de mineração tem como característica a geração de materiais estéreis e de resíduos de processamento. Tais materiais, usualmente, são dispostos em pilhas de estéreis e bacias de rejeitos, sendo que as primeiras, no fechamento de mina, podem ser depositadas novamente na cava, para a recomposição ambiental. Os resíduos de concentração, por sua vez, embora inertes, têm composição química e granulometria muito distintas do solo original, demandando outras destinações no sentido de redução de seu impacto sobre o meio ambiente.⁽¹⁾

O volume de rejeitos produzidos varia com o tipo e teor de minério extraído e a eficiência do processo de beneficiamento utilizado. Assim, o beneficiamento de minério de baixo teor, como os itabiritos, contribui com toneladas de resíduos finos, que geralmente são depositados em barragens de rejeito. Conforme o processo industrial e o minério processado, os rejeitos gerados adquirem diferentes características físico-químicas e mineralógicas. Estima-se que 1/3 da produção mundial de fosfatos, 1/6 da de cobre, 1/5 da de tungstênio, 1/2 da produção boliviana de estanho, 1/4 da produção de ferro, junto com milhões de toneladas de outros minerais são perdidas nas etapas de processamento.⁽²⁾

No caso de minérios de ferro, do qual trata este trabalho, os resíduos do processo de concentração são materiais finos compostos majoritariamente por sílica, seguida de hematita, alumina e ainda alguns minerais minoritários. Esta constituição coloca tais resíduos como potenciais materiais agregados de argamassa e concreto, na indústria da construção civil.^(3,4)

O presente estudo tem como objetivo verificar o potencial uso de rejeitos de concentração de minério de ferro como parte do traço de blocos intertravados de concreto (*Pavers*), em substituição à areia de sílica, com vistas a diminuir ou eliminar a disposição desses resíduos no ambiente e estimular novos negócios em comunidades impactadas pela atividade mineradora.

A abordagem da investigação parte de uma caracterização dos resíduos a serem utilizados na fabricação dos blocos intertravados (*Pavers*), observando as características granulométricas químicas, mineralógicas e as propriedades mecânicas dos blocos. Foram realizados ensaios de densidade e superfície específica.

Os experimentos foram realizados a partir de uma composição básica contendo agregados finos e graúdos, devido à grande variedade de traços e dosagens de blocos de concreto encontrados como referência, os quais foram sistematicamente substituídos por rejeitos de concentração oriundos de testes piloto com minério de ferro. As amostras foram divididas quanto à granulometria e processo de procedência, consistindo de rejeitos de flotação, rejeitos finos de separação magnética e rejeitos grossos de separação magnética.

2 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

Os resíduos foram separados para uma caracterização inicial, para determinar as melhores formas de aproveitamento e reutilização do material recebido. Foram realizadas, inicialmente, análises granulométricas, mineralógicas e químicas, conforme descrição a seguir.

2.1 Granulometria

A caracterização granulométrica dos materiais foi feita por peneiramento até 44 μ m e abaixo desse valor pelo cyclosizer. Observa-se, na Figura 1.a, que a maior parte dos rejeitos da flotação fica retida entre as aberturas entre 105 μ m e 53 μ m.

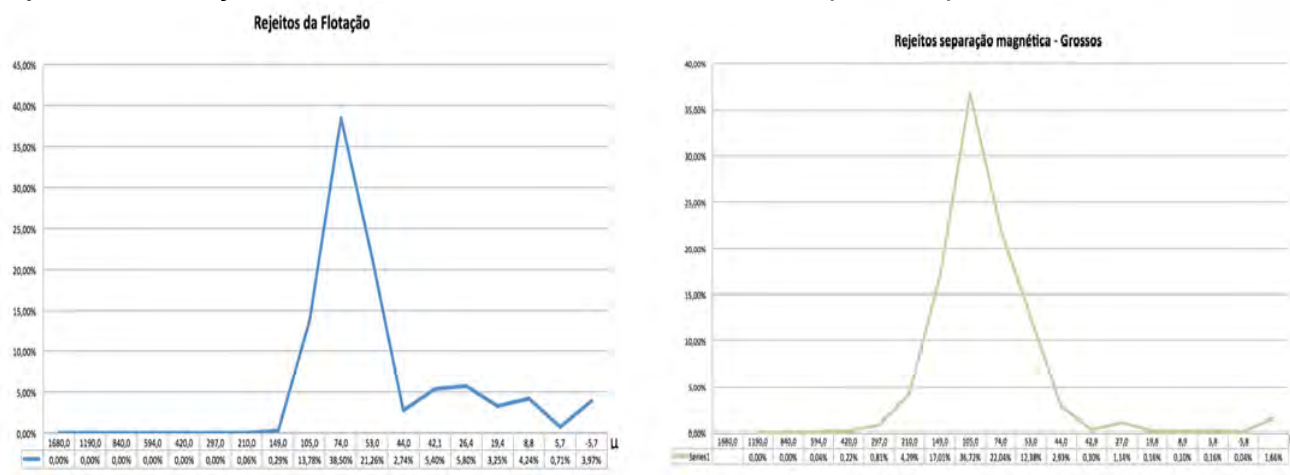


Figura 1. (a): Distribuição granulométrica de rejeitos de flotação de minérios de ferro e (b): de rejeitos grossos de separação magnética de minérios de ferro.

A maior fração granulométrica dos rejeitos grossos da separação magnética, Figura 1.b, encontra-se entre 149 μ m e 53 μ m, semelhante ao rejeito da flotação quanto ao tamanho de partículas.

Os rejeitos finos da separação magnética (Figura 2), têm distribuição granulométrica concentrada abaixo do limite operacional do cyclosizer, representando frações de partículas com diâmetro menor que 5 μ m, com pequena porcentagem acima desse diâmetro.

Rejeitos separação Magnéticas - Finos e deslamagem.

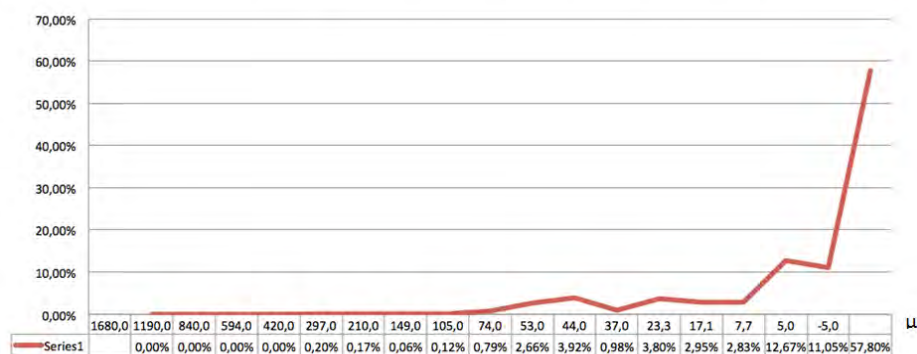


Figura 2. Distribuição granulométrica de rejeitos finos de separação magnética de minérios de ferro.

2.2 Caracterização Mineralógica

Pela análise mineralógica observa-se que o rejeito da flotação apresenta quantidade predominante de quartzo e com alto grau de liberação na faixa maior que 0,105mm, Figura 3.

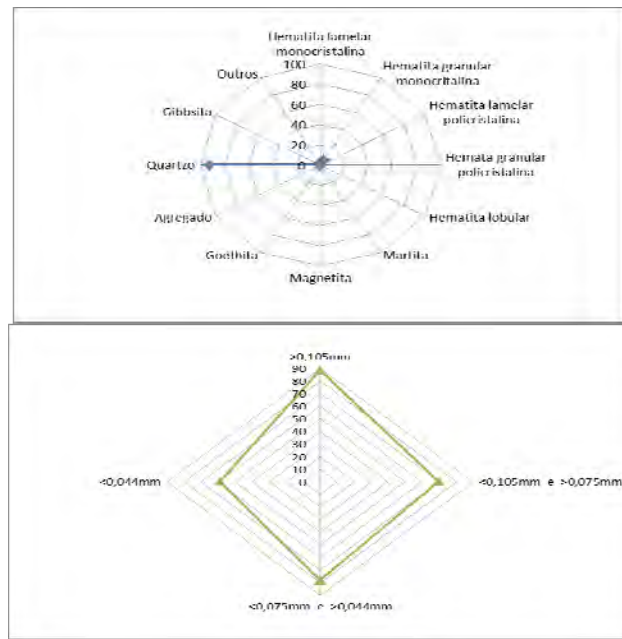


Figura 3. Análise mineralógica do rejeito da flotação.

Já os rejeitos da separação magnética grossos, finos e deslamagem apresentam quantidade predominante de quartzo e com alto grau de liberação na faixa menor que 0,044mm, Figuras 4 e 5.

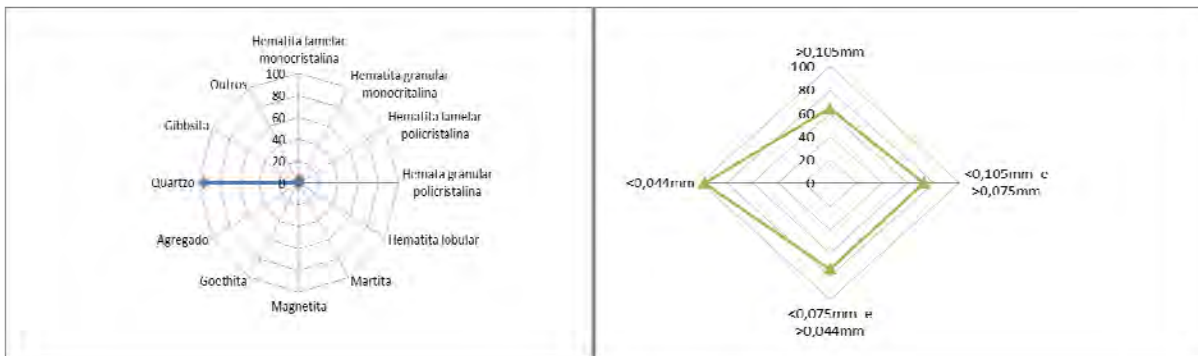


Figura 4. Análise mineralógica do rejeito da separação magnética - Grossos .

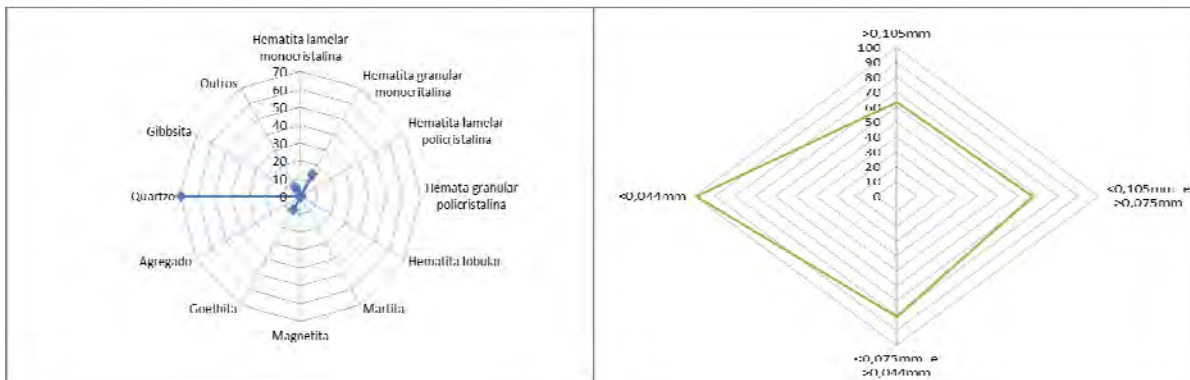


Figura 5. Análise mineralógica do rejeitos separação magnética - Finos e deslamagem.

2.3 Caracterização Química

A análise química das amostras iniciais pode ser observada na Tabela 1. A Sílica (SiO_2) está presente como constituinte majoritário em todas as amostras, porém, no rejeito da flotação e no rejeito grosso da separação magnética, ela é ainda mais preponderante. No rejeito fino de separação magnética, a sílica representa 48% do total da amostra, enquanto a hematita (Fe_2O_3) representa 42% do total, ainda com uma presença significativa de alumina, usual nas frações ultrafinas. Outros óxidos são encontrados em pequenas quantidades nas amostras.

Tabela 1. Composição Química de rejeitos de concentração de minério de ferro.

	Massa	SiO_2	Al_2O_3	CaO	TiO_2	MgO	K_2O	Fe	P	Mn	Fe_2O_3	LOI	FeO
	g	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Rejeitos de flotação	56	84,4	0,45	0,07	0,02	<0,1	0,03	10,9	0,024	0,02	15,1	0,09	0,52
Rejeitos finos de separação magnética e deslamagem	64	47,9	5,61	0,13	0,07	<0,1	0,22	29,8	0,214	0,33	42,4	2,77	0,27
Rejeitos Grossos de Separação Magnética	74	90,4	0,43	0,06	<0,01	<0,1	0,01	6,07	0,035	0,06	8,38	0,22	0,28

2.4 Densidade

As densidades dos materiais foram determinadas por picnômetro a hélio. Os valores encontrados condizem com as composições encontradas, sendo a maior correspondente aos rejeitos finos de separação magnética, com densidade de $3,325 \text{ g/cm}^3$, em função de seu maior teor de ferro, os rejeitos de flotação com $2,875 \text{ g/cm}^3$ e os rejeito grossos de separação magnética com densidade de $2,757 \text{ g/cm}^3$.

2.5 Superfície Específica Blaine (BSA)

Foram determinadas também as superfícies específicas dos materiais pelo método Blaine. Os valores encontrados condizem com as granulometrias encontradas, e correspondem, a $744 \text{ cm}^2/\text{g}$ nos rejeitos de flotação, a $3063 \text{ cm}^2/\text{g}$ nos rejeitos finos de separação magnética e $405 \text{ cm}^2/\text{g}$ nos rejeitos grossos de separação magnética.

2.6 Procedimento Experimental

As amostras recebidas foram peneiradas para a desagregação do material e secadas à temperatura ambiente durante 6 horas, sendo revolvidas a cada hora, Figura 6. Areia comercial usada como referência passou pelo mesmo processo, para a perda da umidade natural.



Figura 6. Fotografia mostrando secagem de areia comercial e de rejeitos de concentração de minério de ferro, sendo (a) rejeitos finos da concentração magnética, (b) rejeitos da flotação, (c) areia comercial e (d) rejeitos grossos da concentração magnética.

3TRAÇOS DAS MISTURAS DE CONCRETO

Para a confecção dos corpos de prova, primeiramente foi determinado um traço padrão para servir de marco comparativo, contendo somente materiais usuais, quais sejam, cimento, brita e areia comerciais.

A proporção entre os componentes foi: 1:3:2 (cimento : agregado fino : agregado graúdo). Os constituintes agregados finos usados foram areia comercial e o rejeito fino da concentração magnética; os agregados graúdos usados foram pedrisco com diâmetro de 4,8 a 9,5mm e os rejeitos grossos da concentração magnética, uma vez que são mais grossos que os rejeitos da flotação. A proporção foi determinada pelo método volumétrico.

A proporção do traço permaneceu sempre a mesma, variando a porcentagem de sua composição conforme diagrama da Figura 7. A quantidade de cimento e água utilizada permaneceu constante.

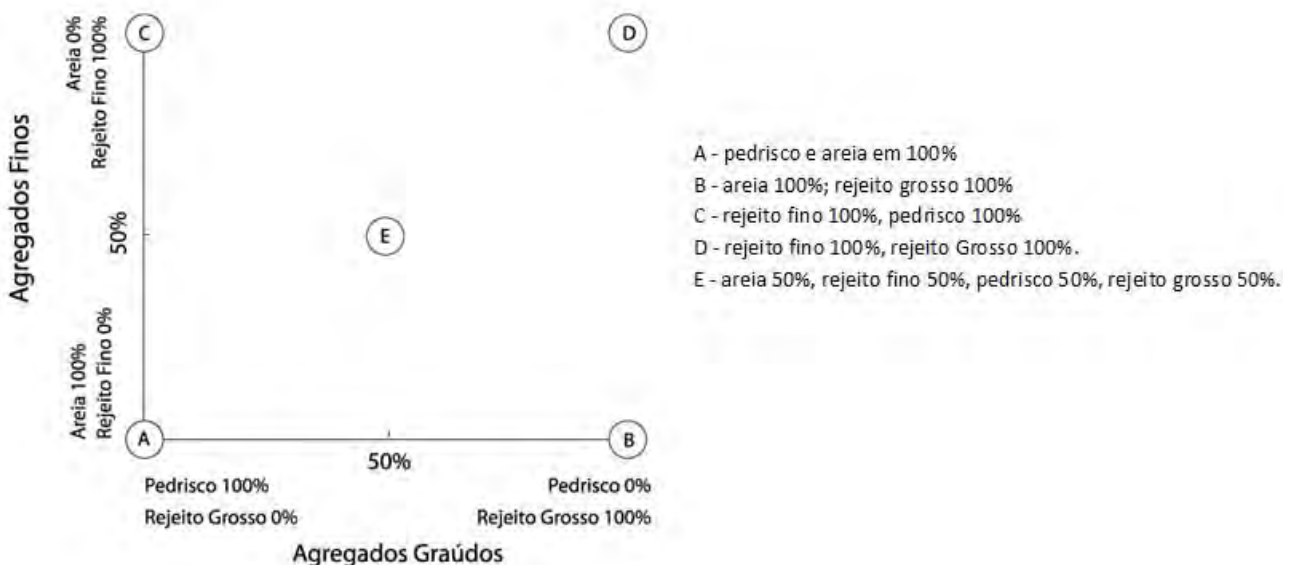


Figura 7. Diagrama representando as participações dos rejeitos finos e grossos de concentração magnética, pedrisco e areia nos traços das argamassas para blocos de concreto.

3.1 Confeção dos Corpos de Prova de Concreto

Após a separação nas suas proporções necessárias, os materiais foram misturados em recipiente inerte, de polipropileno, sendo adicionados na ordem: agregados graúdos, agregados finos, cimento e água. A quantidade prevista de água era de 0,1 na proporção do traço, porém foi necessário maior quantidade para uma plasticidade mais adequada ao método de compactação utilizado.

De acordo com a NBR 05738/1994, o molde cilíndrico foi confeccionado em material não reagente com o concreto (PVC), com diâmetro de 50mm, maior que o dobro do agregado de maior diâmetro, e altura de 100mm, o dobro do diâmetro. Os moldes foram untados com pasta mineral.⁽⁵⁾

A compactação do material foi feita com haste de extremidade semi-esférica, em 3 camadas e 20 golpes por camada. Os corpos de prova foram armazenados em local com umidade, temperatura e luz controlados durante 24 horas, desmoldados e armazenados imersos num tanque com água. O primeiro lote foi retirado com 7 dias para o primeiro ensaio de resistência à compressão, o segundo com 28 dias.

4 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO

4.1 Resistência à Compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados no laboratório de ensaios destrutivos do departamento de engenharia de materiais do Cefet-MG. Os corpos selecionados para o teste foram rompidos aleatoriamente, em triplicata, aumentando o grau de confiança do experimento. A Figura 8 mostra a resistência mecânica dos blocos de concreto em função das proporções dos agregados, para 7 dias de cura e a Figura 9 a resistência mecânica dos blocos com 28 dias de cura, respectivamente.

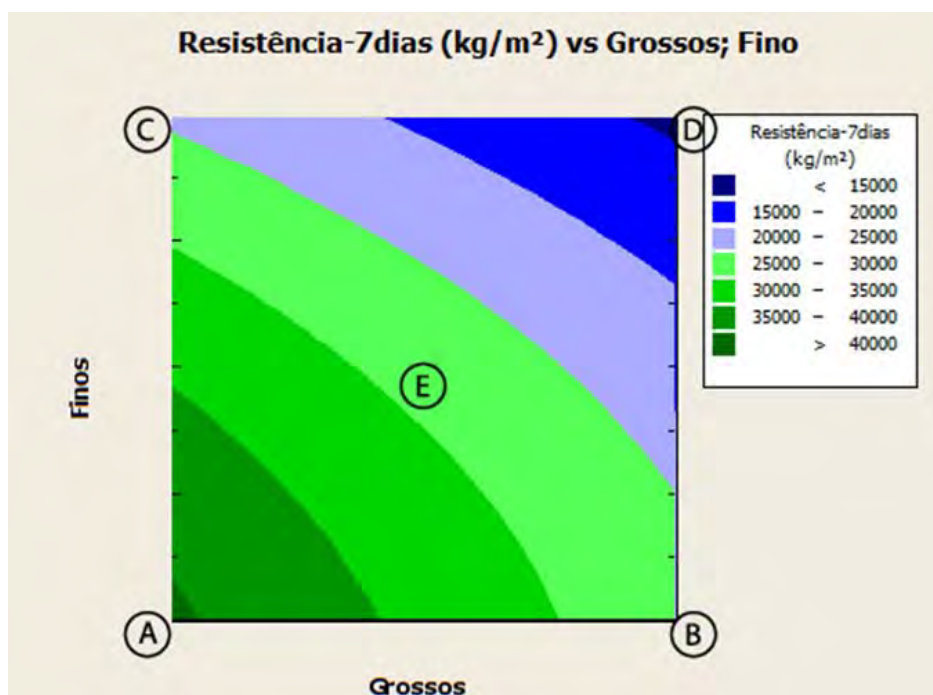


Figura 8. Resistência mecânica, após 7 dias de cura, dos blocos de concreto em função das proporções dos agregados, onde a composição A contém 100% de areia comercial e pedriscos, B contém 100% de areia comercial e rejeitos grossos, C contém 100% de rejeitos finos e pedriscos, D contém 100% de rejeitos finos e rejeitos grossos e E é uma composição intermediária.

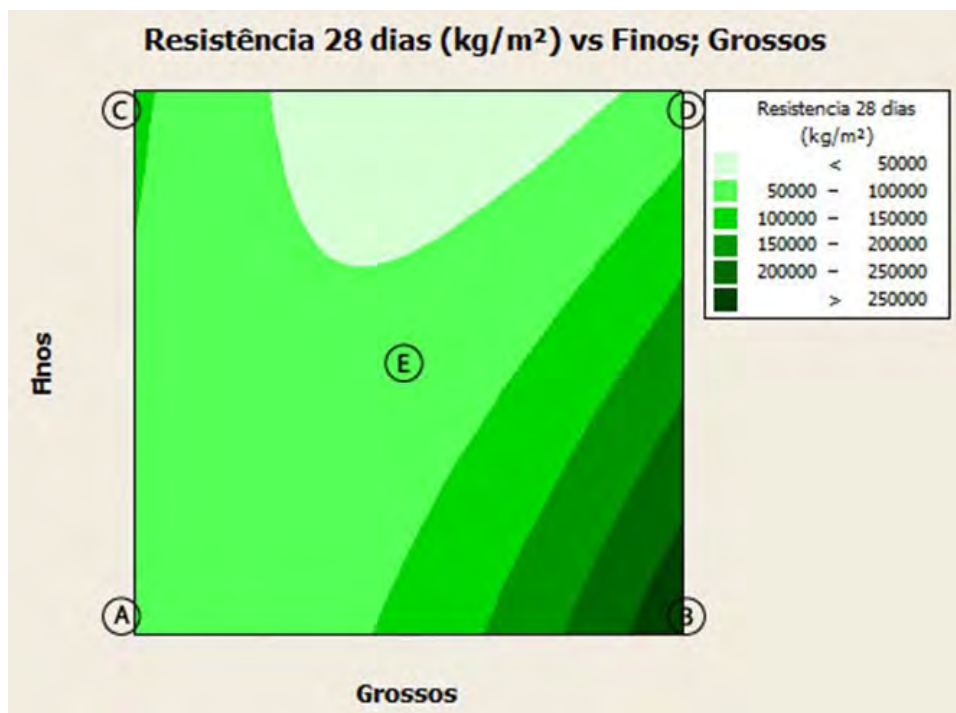


Figura 9. Resistência mecânica, após 28 dias de cura, dos blocos de concreto em função das proporções dos agregados, onde a composição A contém 100% de areia comercial e pedriscos, B contém 100% de areia comercial e rejeitos grossos, C contém 100% de rejeitos finos e pedriscos, D contém 100% de rejeitos finos e rejeitos grossos e E é uma composição intermediária.

A resistência à compressão dos blocos com rejeitos com a cura inicial de 7 dias não suficientemente alta e, como mostrado pelo gráfico da Figura 8 a composição com a maior resistência inicial foi a padrão, sem adição de resíduos. Das composições com adição de resíduos, a B (areia 100%; rejeito grosso 100%) obteve o melhor desempenho. O pior desempenho encontrado foi pela composição D (rejeito fino 100%, rejeito Grosso 100%).

Portanto, após a cura inicial de 7 dias, a presença de rejeitos finos e de rejeitos grossos de concentração de minério de ferro provocou a redução da resistência mecânica dos corpos de prova de concreto, com relação a misturas padrão. Provavelmente isto se deu em função da granulometria mais fina dos rejeitos, comparada à dos agregados tradicionais. A granulometria mais fina dos rejeitos, na cura inicial de 7 dias, pode ter representado maior dificuldade de contato da água com os componentes do cimento, retardando suas reações com o silicato tricálcico (alita – C_3S) e com o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). Tais reações formam os cristais de silicato de cálcio hidratados e os de hidróxido de cálcio, que promovem o aumento da resistência mecânica. A granulometria mais fina, inicialmente, pode ainda ter dificultado o crescimento dos silicatos de cálcio hidratados, que formam os cristais aciculares responsáveis pela coesão do concreto. A resistência à compressão dos blocos com rejeitos em sua composição, com a cura de 28 dias, foi extremamente satisfatória, e como mostrado pelo gráfico da Figura 9, a composição com a maior resistência inicial foi a com adição de 100% de rejeitos grossos, em substituição ao pedrisco. As demais composições com adição de resíduos, por sua vez, apresentaram aproximadamente o mesmo desempenho da mistura com os agregados tradicionais.

Portanto, após a cura de 28 dias, a adição de rejeitos finos e de rejeitos grossos de concentração de minério de ferro demonstrou-se tecnicamente viável, com respeito

à resistência mecânica dos corpos de prova de concreto, podendo ainda ser promovido o seu aumento, com a simples substituição do pedrisco pelo rejeito grosso.

Desta feita, na cura de 28 dias, a granulometria mais fina dos rejeitos, principalmente dos rejeitos grossos com respeito aos pedriscos, tem o efeito contrário do que apresenta na cura inicial. Isto porque, após 28 dias, toda a reação de hidratação do cimento já aconteceu e o cimento já cumpriu sua função, de maneira tal que o concreto final é um material compósito com dispersão mais fina de 2ª fase, o rejeito grosso, quando comparado ao pedrisco.

4.2 Desmoldagem e Qualidade Superficial

Observou-se que a adição de rejeito fino à formulação inicial dos blocos dificultou a desmoldagem dos corpos de prova, deixando grande quantidade de resíduos nas paredes do molde, como mostrado na Figura 10.



Figura 10. Paredes internas dos moldes de PVC para blocos de concreto, mostrando material aderido após desmoldagem de misturas contendo rejeitos finos da concentração de minério de ferro. Fotografia mostrando os blocos de concreto produzidos nas formulações de A a E, destacando o acabamento superficial após desmoldagem.

A dificuldade de desmoldagem pode resultar em acabamento superficial de menor qualidade, como mostrado na Figura 9. Essa característica só não foi encontrada na formulação B, no qual o pedrisco é substituído em 100% pelos rejeitos grossos de concentração magnética de minério de ferro. A dificuldade de desmoldagem com adição de rejeitos finos pode ser explicada justamente pela grande área superficial total do concreto com agregados de granulometria muito fina. A área superficial alta resulta em maior contato mecânico com o molde e conseqüente maior adesão.

4.3 Ensaio de Porosidade

Os ensaios de determinação da porosidade foram realizados em todos os corpos de prova após a cura de 28 dias a fim de caracterizar quanto à hermeticidade. Pela Figura 11 observa-se que, as composições B, C, D e E com adição de resíduos possuem maior porosidade em relação à composição A em que não há adição de resíduos. Assim, as composições B, C, D e E, são menos herméticas facilitando a drenagem de água.

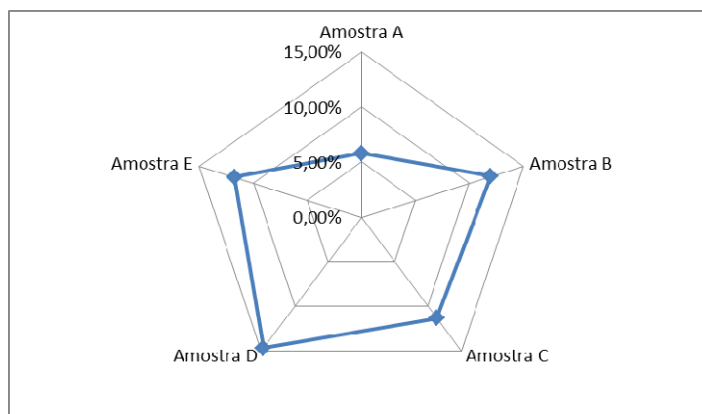


Figura 11. Porosidades dos corpos de prova (A,B,C,D,E).

4.5 Ensaio de Lixiviação

Os procedimentos aplicados no processo de lixiviação do material cerâmico confeccionado seguiram a norma ABTN NBR 10005:2004.⁽⁵⁾

Após o ensaio de resistência aos 28 dias, as amostras resultantes foram moídas a uma granulometria inferior a 9,5 mm, uniformizadas e quarteadas para a lixiviação. Na Tabela 2 tem-se, os valores do pH para as polpas formadas inicialmente. Já na Tabela 3, tem-se os valores de pH das polpas após adição de 3,5 mL de HCl em um aquecimento à 50°C.

Tabela 2. Valores de pH para as polpas formadas

Amostras de Cerâmicas	pH da polpa (4,9 % m/m)
A	12
B	12
C	10
D	9
E	9

Tabela 3. Valores de pH das polpas após adição de 3,5 mL de HCl e aquecimento à 50°C, de acordo com ABNT NBR 10005:2004

Amostras de Cerâmicas	pH da polpa (4,9 % m/m), com adição de 3,5 mL de HCl 1 N e aquecimento à 50° C.
A	10
B	10
C	8
D	7
E	7

Os valores de pH das polpas formadas, através das amostras de materiais cimentícios constituídos de resíduos de mineração, apresentaram valores de pH iguais e superiores a 8 como observa-se na Tabela 4. A justificativa para a maior alcalinidade das polpas é dada pela existência de hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , presente nas amostras, após a reação entre o cimento e água. Como o Ca(OH)_2 é uma espécie alcalina, é justificado os valores elevados de pH presentes nas polpas lixiviadas.

Tabela 4. Valores de pH das polpas, após processo de lixiviação por um período de 16 horas, realizados em triplicata

Identificação da amostra/triplicata	Porcentagem de sólidos em 200 mL da solução extratora	pH da polpa após 16 horas de lixiviação
A ₁	5,02%	11,0
A ₂	4,99%	11,0
A ₃	4,99%	11,0
B ₁	5,00%	10,0
B ₂	5,02%	10,0
B ₃	4,99%	10,0
C ₁	5,01%	10,0
C ₂	5,05%	9,5
C ₃	5,02%	9,0
D ₁	5,02%	8,0
D ₂	5,00%	8,0
D ₃	5,01%	8,0
E ₁	5,00%	8,0
E ₂	5,03%	8,0
E ₃	5,02%	8,0
Branco	0,00%	2,9

Na análise química em triplicata dos extratos lixiviados realizada pela SGS Geosol, foram quantificados quarenta elementos pelo método analítico ICP (Inductively Coupled Plasma) de leitura direta.

A análise mostrou grande presença de Ferro e sílica, já esperados devido a origem das lamas. Alumínio e Magnésio também foram encontrados em quantidades superiores a de Ferro. Segundo a Norma NBR 10004,⁽⁵⁾ Resíduos sólidos – Classificação, os constituintes perigosos a serem observados na produção de ferro e aço são cromo, chumbo, cádmio, que tem limite máximo no lixiviado fixado por esta norma em 5,0mg/L, 1,0mg/L e 0,5mg/L, respectivamente. Na análise recebida estes três elementos ficaram abaixo do limite de detecção do ICP, que é 0,05, 0,05 e 0,03mg/L, respectivamente.

Outros metais pesados analisados que poderiam também significar alguma periculosidade ao meio ambiente não foram detectados.

4.6 Modulação de Cor

Os dados exibidos pelo StellarNet, através do software SpectraWiz, foram convertidos no Photoshop para gerar a imagem comparativa da Figura 12, onde observa-se as diferenças obtidas principalmente pela adição de rejeito com conteúdo ferroso nas formulações. As cores variam principalmente em direção ao vermelho (eixo a), e não possuem grande saturação. Somente a composição B apresenta cor com maior adição de amarelo (eixo b).



Figura 12. Modulação de cor dos corpos de prova (A,B,C,D,E).

5 CONCLUSÃO

Os rejeitos de concentração de minério de ferro mostraram-se como materiais viáveis na substituição de agregados finos e grossos de bloco intertravados de concreto (Pavers), no que diz respeito à resistência mecânica após cura de 28 dias. Especificamente, a simples substituição de pedriscos pelos rejeitos grossos de concentração de minério de ferro tem potencial para aumentar a resistência mecânica dos blocos de concreto. E a adição de rejeitos finos de concentração de minério de ferro pode dificultar a desmoldagem, questão que deve ser ainda estudada, no sentido de também viabilizar este resíduo como agregado de bloco de concreto. Quanto à hermeticidade, os corpos de prova com a adição de resíduos passaram a ter maior porosidade conseqüentemente menor hermeticidade o que é um bom indicador para a confecção dos blocos de concreto.

A adição dos rejeitos aos blocos de concreto não representa risco ao meio ambiente quando submetidos às intempéries como foi comprovado através do ensaio de lixiviação.

A variação de cor dos blocos pode ser um diferencial para venda, pois podem ser utilizados em diferentes áreas, aumentando as possibilidades de combinação arquitetônica.

REFERÊNCIAS

- 1 FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente, Inventário Estadual de Barragens do Estado de Minas Gerais – Belo Horizonte – 2010.
- 2 ROSA, J. J. O condicionamento em alta intensidade e a recuperação de finos de minérios por flotação. Rio Grande do Sul: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 1997
- 3 ROCHA, L., PERES, A.E.C. Aproveitamento econômico de lama de ferro - REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 291-295, jul. set. 2009.
- 4 VIEIRA, J. E. and NETO, A. N. R., Recuperation of ultra-fine iron ore from tailing ponds as an economically and technically feasible and environmentally correct alternative method. 2_International Symposium on Iron Ore. São Luís, MA. pp. 408–415. 2008.
- 5 ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 10005:2004, NBR 05738/1994, NBR 10004.