

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DA EXPLORAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO EM ARTEFATOS DE CIMENTO.

S. S. Pereira Júnior^{*1}; C. B. Freire²; C. C. O. Tello¹.

Comissão Nacional de Energia Nuclear/Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, SEGRE, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP 30 161-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

schubertsoares@yahoo.com.br

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear¹
Rede Temática em Engenharia de Materiais²

RESUMO

Este trabalho tem como foco a utilização do resíduo gerado na exploração mineral brasileira, com destaque na produção de minério de ferro, do qual o Brasil é o segundo produtor mundial. O itabirito é uma fonte de minério de ferro, cuja exploração gera um volume muito grande de resíduo de característica arenosa, rico em sílica e hematita. Visando seu aproveitamento e alto consumo em argamassas desenvolveram-se formulações variando-se: as relações resíduo:cimento (2,0:1 ; 2,5:1), a/c (0,75 ; 0,80) além do tipo de cimento (CP II E ; CP V). Os resultados dos ensaios nas argamassas com 28 dias indicam que o tipo de cimento e a quantidade de areia influenciam na resistência à compressão, com 95% de confiabilidade. A melhor formulação obtida foi com cimento CP V e com proporção de resíduo:cimento 2:1, apresentando resistência de 19,22 MPa.

Palavras-chave: Itabirito, Resíduo arenoso, Minério de ferro, Argamassa.

INTRODUÇÃO

A indústria mineral tem papel primordial no desenvolvimento sócio econômico brasileiro. Em 2008 o crescimento da indústria extrativa mineral foi de 11% e o saldo estimado (exportações - importações) do setor mineral (bens primários, sem transformação, excluídos Petróleo e Gás) em 2008 alcançou novo recorde de US\$ 13 bilhões, representando 52% do saldo total do comércio exterior do País, que foi de US\$ 25 bilhões ⁽¹⁾.

A indústria da mineração está presente em aproximadamente 1.500 cidades, sendo que o total de mão de obra empregada (empregos diretos) na mineração em 2008 alcançou 161 mil trabalhadores. Estudos feitos pelo Serviço Geológico Brasileiro mostram que o efeito multiplicador de empregos é de 1:13 no setor mineral, ou seja, para cada posto de trabalho da mineração, são criadas 13 outras vagas ao longo da cadeia produtiva ⁽¹⁾.

O Brasil é o segundo produtor mundial de minério de ferro, tendo Minas Gerais a maior produção. No Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais encontra-se em grande quantidade o itabirito, que é uma rocha constituída de camadas com predominância de sílica (quartzo) e óxido de ferro (principalmente a hematita). A exploração do itabirito como minério de ferro para a indústria siderúrgica gera, entre outros, uma quantidade de resíduo arenoso da ordem de milhares de toneladas diárias.

Estes resíduos apresentam características físicas e químicas uniformes, o que associadas à grande disponibilidade, fazem com que eles possam ser considerados como possíveis matérias-primas para vários segmentos industriais, sendo um deles a fabricação de artefatos de cimento.

O segmento de artefatos de cimento é uma das muitas indústrias que compõem o macrossetor da construção, sendo que a produção de blocos de concreto responde por 13,4% desse segmento. Um dos aspectos que tem sido importante para a sustentabilidade do setor é a racionalização do uso dos recursos naturais e aumento da durabilidade dos seus produtos ⁽²⁾.

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e a avaliação do desempenho de argamassas contendo o resíduo arenoso da exploração do itabirito, antes e após ataques químicos, simulando corrosão ou desgaste provocado por ambientes agressivos. A avaliação das argamassas será realizada com base em suas propriedades e características intrínsecas, como porosidade, microestrutura, resistência à compressão etc.

Finalmente estas características serão relacionadas entre si, na busca da formulação ótima, visando seu uso na fabricação de artefatos de cimento, uma vez que a avaliação do comportamento de um novo material, levando em consideração o ambiente em que será submetido é importante para sua aceitação e ampla utilização. A substituição da areia natural pelo resíduo arenoso da mineração na fabricação de artefatos de cimento para a construção civil vem de encontro aos princípios da sustentabilidade nestes dois setores socioeconômicos, reduzindo por

um lado o impacto gerado pelos resíduos acumulados no meio ambiente, e por outro, aquele causado pela extração de recursos naturais.

EXPERIMENTAL

Materiais

Os materiais utilizados na confecção das argamassas obtidos de fontes comerciais foram: cimento Portland CII-E 32, cimento Portland CPV ARI, solução aquosa de policarboxilato (aditivo Viscocrete 3535). A água empregada foi coletada do sistema urbano de água. O agregado miúdo foi um resíduo arenoso da exploração de minério de ferro do itabirito e foi obtido e classificado segundo as normas da ABNT ^{(3), (4), (5), (6)}.

Procedimentos

Os cálculos para a medida das quantidades de água, resíduo e cimento foram feitos considerando-se a massa de um corpo-de-prova de 450 g e as proporções pré-estabelecidas. Com as quantidades determinadas, foram adicionados em uma bateadeira G. Paniz modelo BG 8000, ligada, água e, logo em seguida, o cimento escolhido. Por três minutos a mistura de água e cimento foi agitada. Em seguida foi adicionado, em um minuto, o resíduo arenoso. A mistura foi agitada por dois minutos. O tempo total de agitação foi de seis minutos.

Os corpos-de-prova moldados neste trabalho são cilíndricos com dimensões de aproximadamente 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Inicialmente os moldes são preparados, medidos e pesados. Imediatamente após o amassamento da argamassa é realizada a moldagem. Com o auxílio de uma espátula, a argamassa é transferida para os moldes em três camadas de alturas aproximadamente iguais recebendo cada camada três golpes uniformes com um soquete para uniformizar a distribuição da massa no molde e eliminar o ar aprisionado durante a transferência da argamassa para o molde. A operação de moldagem é encerrada pela rasadura do topo do corpo de prova com uma régua que o operador faz deslizar sobre as bordas da forma. Após a moldagem os corpos-de-prova, ainda nos moldes e com a face superior protegida, são armazenados até completar os 28 dias de cura, de

modo a estarem protegidos da perda de umidade da superfície, podendo também, após o endurecimento da pasta, ser guardados em plásticos fechados.

Ensaio no produto solidificado

Para calcular a densidade dos corpos-de-prova foram realizadas quatro medidas da altura e duas do diâmetro utilizando um paquímetro Mitutoyo, modelo universal. A medida da massa foi realizada com uma balança Marte, modelo AC10K. A resistência à compressão dos corpos-de-prova foi obtida utilizando-se uma prensa hidráulica EMIC, modelo PCI 150 de acordo com o procedimento descrito pela literatura ⁽⁷⁾.

Formulações

As formulações confeccionadas para a primeira batelada de experimentos foram escolhidas de modo a utilizar grande quantidade de resíduo obtendo-se boa resistência e baixo custo.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o conjunto de formulações seguindo o planejamento fatorial 2^3 com dois níveis para cada fator principal, que são o tipo de cimento, traço e razão de água/cimento (a/c). O fator de resposta é a resistência à compressão aos 28 dias.

Tabela 1. Formulações confeccionadas

Experimento	Tipo de cimento	Traço ^a	a/c ^b
1	CPII	1:2	0,75
2	CPII	1:2	0,80
3	CPII	1:2,5	0,75
4	CPII	1:2,5	0,80
5	CPV	1:2	0,75
6	CPV	1:2	0,80
7	CPV	1:2,5	0,75
8	CPV	1:2,5	0,80

a traço cimento/areia (c/a); b razão cimento/água.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise do resíduo arenoso

A caracterização do resíduo da exploração do itabirito foi realizada por ativação neutrônica. Os elementos analisados e suas respectivas concentrações são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização do resíduo arenoso por ativação neutrônica.

Concentração dos elementos presentes / (mg/kg).							
Al	NA			Mn		NA	
As	0,48	±	0,03	Mo		<	2
Ba		<	61	Na	29	±	1
Ca		<	10000	Nd		<	5
Ce		<	1	Rb		<	10
Co	0,14	±	0,02	Sb	0,26	±	0,01
Cr	5	±	1	Sc	0,12	±	0,01
Cs		<	1	Se		<	2
Dy		NA		Sm	0,05	±	0,01
Eu		<	0,02	Sr		<	1000
Fe	139000	±	4911	Ta		<	0,1
Ga		<	2	Tb		<	0,1
Hf		<	1	Th		<	0,2
Hg		<	2	U		<	0,10
Ho		<	1	W		<	1
K	25	±	5	Yb		<	0,1

Ensaio de Lixiviação

A caracterização do extrato lixiviado do resíduo da exploração do itabirito foi realizada por absorção atômica. Os elementos analisados e suas respectivas concentrações são apresentados na Tabela 3. Os teores de arsênio e selênio foram menores que seus limites de detecção pela técnica de absorção atômica, portanto não foram apresentados.

Tabela 3. Caracterização do extrato lixiviado por absorção atômica

Amostra	Ba / (mg/L)	Cd / (mg/L)	Cr / (mg/L)	Ag / (mg/L)	Pb / (mg/L)	F ⁻ / (mg/L)	Hg* / (mg/L)
Resíduo arenoso	20	0,1	1,0	1,0	0,1	2	0,1

* absorção atômica com geração de vapor frio.

Ensaio de solubilização

A princípio a caracterização do extrato solubilizado do resíduo da exploração do itabirito foi realizada por ICP/AES. Alguns elementos foram analisados e suas respectivas concentrações são apresentadas na Tabela 4. Outros elementos, exigidos pela ABNT 10006⁽⁵⁾, possuem limites menores que os limites de detecção pela técnica ou não estão presentes no resíduo, portanto não foram apresentados.

Tabela 4. Caracterização do extrato solubilizado por ICP/AES

Amostra	Al / (mg/L)	Zn / (mg/L)	Cu / (mg/L)	Fe / (mg/L)	Mn / (mg/L)
Resíduo arenoso	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1

Tendo em vista os resultados prévios de lixiviação e solubilização e sabendo-se que o itabirito é constituído em grande parte por hematita e sílica, tem-se que o resíduo pertence à classe II B (inerte), considerando-se apenas os elementos químicos até aqui estudados de acordo com a NBR 10004⁽³⁾.

Resistência à compressão aos 28 dias para argamassas confeccionadas com CP II E-32

Embora tenha sido feito um planejamento fatorial 2^3 na escolha das formulações, o tratamento dos dados de resistência à compressão foi feito seguindo um fatorial 2^2 . Assim foram tratados dois fatoriais 2^2 diferindo-se, entre eles, o tipo de cimento. Em seguida foram comparados os resultados em relação ao tipo de cimento.

Na Tabela 5 podemos ver a média da resistência à compressão aos 28 dias, em MPa, para as quatro formulações confeccionadas com o cimento Portland tipo CP II-E 32 e os fatores em questão são a relação água/cimento (a/c) e a proporção de cimento:areia (traço). Cada média foi obtida a partir da medida da resistência à compressão de quatro réplicas.

Tabela 5. Resistência à compressão em MPa, para as argamassas confeccionadas com cimento Portland CP II-E 32 aos 28 dias de idade

Fatores	Traço	
a/c	1:2,0	1:2,5
0,75	12,08	11,37
0,80	13,62	13,16

Com os resultados obtidos de resistência à compressão foi efetuada a análise de variância, ao nível de 5 % de significância, para checar a influência dos fatores em relação à resistência à compressão aos 28 dias e também para selecionar as melhores formulações.

Na hipótese nula (H_0) nenhum fator nem a interação entre eles influenciam sobre a resistência à compressão. Na hipótese alternativa (H_1) algum dos fatores ou a interação entre eles ou todos influenciam sobre a resistência à compressão. Sendo H_1 definido pelas seguintes regiões de rejeição:

$$R: \{F | F_A > F((1,12); 0,05)\}$$

$$R: \{F | F_B > F((1,12); 0,05)\}$$

$$R: \{F | F_{AB} > F((1, 12); 0,05)\}$$

Os resultados da análise de variância para as argamassas confeccionadas com CP II E-32 estão apresentados na Tabela 6.

A partir dos resultados calculados para as argamassas confeccionadas com CP II E-32, a decisão é de rejeitar H_0 , para o traço, ao nível de significância de 5%, uma vez que o F calculado para este fator foi maior que o teórico. Sendo assim as melhores formulações para este tipo de cimento foram as com traço de 1 : 2,0, pois

obtiveram resistência à compressão superior às confeccionadas com traço 1 : 2,5, com 95% de confiabilidade. Em relação ao fator a/c nada podemos afirmar ao nível de significância de 5%, portanto não há diferença significativa entre os níveis deste fator para estas argamassas.

Tabela 6. Análise de variância dos dados da Tabela 5.

Fonte de variação	Gl	Soma quadrática	Média quadrática	F	F _t
Traço	1	11,156	11,156	13,749	
a/c	1	1,346	1,346	1,658	
Traço x (a/c)	1	0,060	0,060	0,074	F(1;12;0,05) = 4,75
Residual	12	9,736	0,811		
Total	15	22,297	1,486		

Resistência à compressão aos 28 dias para argamassas confeccionadas com CP V ARI

Na Tabela 7 podemos ver a média da resistência à compressão aos 28 dias, em MPa, para as quatro formulações confeccionadas com o cimento Portland tipo CP V ARI e os fatores em questão são a relação água/cimento (a/c) e a proporção de cimento:areia (traço). Cada média foi obtida a partir da medida da resistência à compressão de quatro réplicas.

Os resultados obtidos para a resistência à compressão, das argamassas com este tipo de cimento, foram tratados da mesma forma que os resultados anteriores, com CP II E-32 e são apresentados na Tabela 8.

Analisando-se os resultados calculados para as argamassas confeccionadas com CP V ARI, a decisão é de rejeitar H_0 , para o fator água/cimento, ao nível de significância de 5%, uma vez que o F calculado para este fator foi maior que o teórico. Sendo assim as melhores formulações para este tipo de cimento foram as

com a/c 0,80, pois obtiveram resistência à compressão superior às confeccionadas com a/c 0,75, com 95% de confiabilidade. Em relação ao fator traço nada podemos afirmar ao nível de significância de 5%. Portanto não há diferença significativa entre os níveis deste fator para estas argamassas. O F calculado para a interação entre os fatores é maior que o F teórico, porém a diferença entre eles é pouco significativa, sendo assim não foi mencionada a interferência dessa interação.

Tabela 7. Resistência à compressão em MPa, para as argamassas confeccionadas com cimento Portland CP V aos 28 dias de idade

Fatores	Traço	
a/c	1:2,0	1:2,5
0,75	16,22	15,47
0,80	19,22	14,20

Tabela 8. Análise de variância dos dados da Tabela 7

Fonte de variação	Gl	Soma quadrática	Média quadrática	F	F _t
Traço	1	3,010	3,010	0,794	
a/c	1	33,178	33,178	8,754	
Traço x (a/c)	1	18,276	18,276	4,822	F(1;12;0,05) = 4,75
Residual	12	45,480	3,790		
Total	15	99,944	6,663		

Comparação da resistência entre os diferentes tipos de cimento

A comparação entre das argamassas em relação ao tipo de cimento utilizado foi feita por meio de um teste de amostras emparelhadas, que também é um tipo de teste de hipóteses. Para isso foi calculado o t-student das médias de resistência à compressão das argamassas com formulações diferentes em relação ao tipo de cimento.

As hipóteses testadas foram as seguintes:

H_0 as médias da resistência à compressão das formulações que diferem apenas o tipo de cimento são iguais.

H_1 as médias da resistência à compressão das formulações que diferem apenas o tipo de cimento são maiores com o uso do cimento CPV ARI.

Sendo a região de rejeição de H_0 para $\alpha = 0,05$, $n = 4$ e $t(3;0,025) = 2,356$:

$R = \{T/ t > 2,356\}$.

Tabela 9. Comparação entre as resistências dos cimentos e t-student calculado para as formulações que diferem no tipo de cimento

	(1) a/c = 0,75 traço 1:2	(2) a/c = 0,80 traço 1:2	(3) a/c = 0,75 traço 1:2,5	(4) a/c = 0,80 traço 1:2,5
CPII	12,08	13,62	11,37	13,16
CPV	16,22	19,22	15,47	14,20
t_{calculado}	3,511	7,046	14,623	1,218
t_{teórico}	$t(3;0,05) = 2,356$			

Na tabela 8 estão apresentados os dados de resistência à compressão para todas as formulações, os valores de t-student calculados e o t-student tabelado. Comparando-se os valores de t calculado com o tabelado, 2,356, tem-se que para as formulações indicadas por 1,2 e 3, rejeita-se H_0 . Assim o uso cimento CP V ARI nestas formulações resultou, ao nível de significância de 5%, em argamassas com maior resistência à compressão do que as que tiveram o uso do cimento CP II E-32.

Para a formulação indicada por 4, nada se pode afirmar em relação ao tipo de cimento ao nível de significância de 5%. Assim a argamassa que apresentou maior resistência à compressão aos 28 dias de idade, com 95% de confiabilidade, foi a confeccionada com CP V ARI, traço (1:2,0) e a/c (0,80).

CONCLUSÕES

Os estudos iniciais mostram que o resíduo obtido pela exploração do itabirito, como era esperado, é bastante rico em ferro, cerca de 140 g/kg. Os ensaios e as análises realizadas até aqui no resíduo apontam para classificá-lo como inerte, Classe II B, uma vez que os valores dos elementos quantificados, lixiviados e solubilizados, estão abaixo dos limites máximos permissíveis pela norma de classificação de resíduos sólidos.

A análise das formulações das argamassas indica, com 95% de confiabilidade, mostra que nas confeccionadas com CP II E-32, a quantidade de resíduo influencia na resistência à compressão. Para as confeccionadas com CP V ARI a relação água/cimento é o fator que influencia na resistência à compressão. Em relação ao tipo de cimento a maioria das formulações testadas obtiveram maior resistência com o cimento CP V ARI. Ao cruzar os estudos estatísticos, tem-se que a melhor formulação apresentou resistência à compressão aos 28 dias de 19,22 MPa. Esta foi confeccionada com cimento tipo CP V ARI, traço (1:2,5) e a/c (0,80).

Com base nesses resultados será possível confeccionar as primeiras argamassas, em escala piloto, para a fabricação de blocos intertravados com aplicação em calçadas, estacionamentos, pátios, entre outros.

REFERÊNCIAS

1. IBRAM. **Instituto Brasileiro de Mineração. Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira.** Disponível em: <http://www.ibram.org/sites/1300/1382/00000273.pdf>. Acesso em 15/10/2009.
2. FIEMG. **Guia de sustentabilidade do setor de artefatos de cimento.** Belo Horizonte: FIEMG, 2009.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT- NBR 10004. Resíduos Sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT-NBR 10005. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.

5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT-NBR 10006**. *Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, 2004.

6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT-NBR 10007**. *Amostragem de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, 2004.

7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT-NBR 7215**. *Cimento Portland: Determinação da Resistência à compressão*. Rio de Janeiro, 1991.

USE OF WASTE FROM EXPLOITATION OF IRON ORE IN CEMENT ARTIFACTS.

ABSTRACT

This paper focuses the use of the waste generated in mineral exploration in Brazil, especially in the production of iron ore which Brazil is the second largest producer. Itabirite is a source of iron ore, that process generates a large amount of sandy characteristic waste, rich in silica and hematite. Searching its high utilization in mortar, formulations were developed varying: the waste:cement rate (2,0:1), a/c (0,75;0,80) and cement kind (CP II E-32; CPV). The tests results show cement kind and quantity of sand influence on compressive strength, with 95% reliability, on 28 days. The best formulation was obtained with cement CP V and waste: cement rate 2:1, showing strength of 19.22 MPa.

Keywords: itabirite, sandy waste, iron ore, mortar.