



# Aproveitamento do rejeito de minério de ferro (RMF) em materiais de construção civil

Daniela Evaniki Pedroso

Universidade Tuiuti do Paraná, Curitiba, Brasil, daniela.pedroso@utp.br

Cleber Luis pedroso

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, cleber.ped@gmail.com

Vsevolod Mymrine

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, seva6219@gmail.com

**RESUMO:** O rejeito de minério de ferro (RMF) é um resíduo sólido gerado durante o processo de beneficiamento do minério de ferro e é uma das principais preocupações de poluição na indústria de mineração. Na maioria dos países o armazenamento ainda é a maneira mais comum e econômica de administrar o RMF, no entanto, a enorme quantidade desse rejeito armazenado traz uma série de problemas ambientais e sociais. Sendo a geotecnia ambiental um ramo da geotecnia que tem por intuito proteger o meio ambiente contra impactos antrópicos, essa pesquisa buscou desenvolver um compósito a base de rejeito de minério de ferro, resíduo de concreto e resíduo da produção da cal para confecção de novos materiais a serem utilizados na construção civil com características que atendem as demandas das Normas Brasileiras. Os resultados demonstraram que quanto maior o consumo de RMF na composição maior foi a resistência à compressão axial, além disso, percebeu-se que o baixo custo desses resíduos tornam-se atraentes a sua utilização, ainda minimizam a extração de recursos naturais e evitam possível contaminação ao meio ambiente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Rejeito de minério de ferro, Resíduos industriais, Geotecnia Ambiental Palavras.

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos três anos houveram dois grandes desastres irreparáveis no Brasil, sendo um o rompimento da Barragem de Fundão em Mariana/MG em que aproximadamente 50 milhões de metros cúbicos de rejeito de minério de ferro (RMF) vazaram e atingiram o Rio Doce e depois o rompimento da Barragem 1 da Mina Córrego do Feijão em Brumadinho/MG que despejou aproximadamente 13 milhões de metros cúbicos de RMF sobre o Rio Paraopeba.

O RMF é um resíduo sólido gerado durante o processo de beneficiamento do minério de ferro e é uma das principais preocupações de

poluição na indústria de mineração.

O RMF é um material fino, denso e cristalino. Sua composição é formada principalmente por óxidos de ferro, sílica e alumina, e não apresentam características perigosas (GALVÃO *et al.*, 2018)

Estudos demonstram que o rejeito de minério de ferro tem potencial para ser utilizado na produção de cimento e compósitos cimentícios, além de propriedades mineralógicas, físicas e mecânicas, a disponibilidade e o baixo custo do RMF tornam atraente a utilização desse rejeito:

Luo *et al.*, (2016), relataram que o RMF pode substituir completamente a argila como uma matéria prima alternativa de alumina-



silicato para a produção de clínquer de cimento Portland. Além disso, o calor de hidratação do cimento Portland preparado com RMF é menor.

Shettima *et al.*, (2016), realizaram uma pesquisa utilizando o RMF como substituição parcial do agregado miúdo em concretos; obteve-se como resultados um ganho na resistência mecânica do concreto utilizando RMF, porém a trabalhabilidade foi reduzida.

Zhao *et al.*, (2014), investigaram a possibilidade de utilização de RMF na substituição do agregado miúdo natural para preparação de concreto de ultra alto desempenho sob dois diferentes regimes de cura. Verificou-se que a substituição de até 40% do rejeito ofereceu resultados satisfatórios em corpos de prova com 180 dias de cura padrão equiparados a cura a vapor em 2 dias.

Para Galvão *et al.*, (2018), a utilização do RMF na construção civil é uma alternativa vantajosa. Os autores pesquisaram sobre o uso de RMF como pigmento na produção de tintas sustentáveis para edifícios. A tinta sustentável apresentou cor avermelhada, opacidade adequada e resultados satisfatórios em relação à durabilidade a um custo significativamente menor.

Outro resíduo utilizado na pesquisa foi o resíduo de concreto (RC), composto de agregados naturais e argamassa aderida. As propriedades físicas dependem da qualidade e quantidade de argamassa aderida no agregado natural. O RC é um material poroso e a porosidade depende da relação *a/c* do concreto empregado (ETXEBERRIA *et al.*, 2007). Também possui maior absorção de água, devido à argamassa que se mantém ligada ao agregado (DE JUAN; GUTIÉRREZ, 2009).

O último resíduo incorporado na composição foi o resíduo da produção da cal (RPC). Para Garcia (2008), esse resíduo se origina da rocha calcária mal queimada, quando o processo de combustão ocorre de forma incompleta. Esses resíduos são, geralmente, comercializados como subprodutos, constituídos, essencialmente, de

elementos não calcários como:  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ , entre outros, em quantidade total superior a 12% (ABNT 6453:2003), e por isso se designam resíduos da produção da cal.

Neste sentido, grande parte dos resíduos produzidos por um determinado setor muitas vezes podem ser considerados como matérias-primas úteis para outras indústrias, reduzindo, desta maneira, o impacto ambiental, associado a aterros sanitários e preservação de recursos naturais não renováveis (FERREIRA e OLHERO, 2002).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Composições estudadas

Foram dosadas empiricamente 6 composições variando os teores de matérias primas: rejeito do minério de ferro (RMF), resíduos de concreto (RC) e resíduo da produção de cal (RPC) conforme Tabela 1:

Tabela 1. Composições utilizadas para confecção dos corpos de prova.

Composição	RMF (%)	RC (%)	RPC (%)
01	15	60	25
02	20	55	25
03	25	50	25
04	30	45	25
05	35	40	25
06	40	35	25

Foram moldados 5 corpos de prova para cada composição

### 2.2 Moldagem dos corpos de prova

Foram utilizados para o experimento moldes cilíndricos medindo 20 mm de altura e 20 mm de diâmetro, visando à utilização de menos materiais por experimento.

Os materiais que compuseram a mistura foram pesados em balança eletrônica, com precisão  $\pm 0,01g$ , de acordo com cada



composição previamente definida. As misturas foram homogeneizadas manualmente em um almofariz com o auxílio de um pistilo de porcelana de alta resistência.

A compactação foi realizada com prensa manual com capacidade de até 15 toneladas, a tensão aplicada foi de 100kgf/cm<sup>2</sup>, com tempo de permanência da tensão por 30 segundos.

### 2.3 Ensaios realizados

Foram realizados os seguintes ensaios de propriedades mecânicas e físico-químicas para caracterização das matérias-primas e das composições desenvolvidas: Fluorescência de Raios-X (FRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectrômetro Dispersivo de Energia (EDS) e resistência à compressão uniaxial.

Para ensaio de resistência à compressão axial foram moldados 5 corpos de prova para cada idade de rompimento, sendo: 3, 7, 14, 21, 28, 90 e 180 dias.

## 3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo serão descritos e analisados os resultados dos ensaios realizados com as matérias-primas e composições confeccionadas:

### 3.1 Caracterização do rejeito de minério de ferro

A análise química do rejeito de minério de ferro pelo método de fluorescência de raio X (FRX) mostra que o rejeito consiste principalmente em SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO e CaO.

### 3.2 Caracterização do resíduo de concreto

A composição química do RC, investigada através do método de FRX apresenta basicamente SiO<sub>2</sub> (47,8%), CaO (23%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (6%), MgO (3,4%) e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2,2%). Também

apresenta alto valor de perda ao fogo (P.F. =13,84%), esse valor exprime a perda de massa após aquecimento a 1000°C e pode ser explicado pela evaporação da água e ao dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente em concretos e argamassas em formas calcita e dolomita no resíduo de concreto.

### 3.3 Caracterização do resíduo da produção da cal

O RPC, determinada através do método de FRX, é composto basicamente por CaO e MgO com proporções de 51,6% e 29% respectivamente. Isso confirma que a produção da cal foi oriunda do calcário dolomítico (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) da região sul do Brasil. A presença de SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e outras impurezas pode ser explicada pelo processo de acumulação dos sedimentos calcários no fundo dos oceanos devido ao processo metamórfico de formação das rochas calcárias. O alto valor de perda ao fogo (17,49%) confirma alto teor de água e CO<sub>2</sub> nos carbonatos mal queimados.

### 3.4 Resistência à compressão axial das composições

O controle da resistência à compressão axial de um material tem por finalidade verificar a conformidade da resistência dos diferentes lotes empregados. Conforme Tabela 2, foram ensaiados cinco corpos de prova de cada composição nas seguintes idades de cura: 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180 dias e 1 ano.



Tabela 2. Resistência à compressão axial das composições.

Comp	RMF (%)	RC (%)	RPC (%)	Resistência à compressão (MPa)					
				3	7	14	28	90	180
01	15	60	25	1,2	2,4	3,2	4,5	7,2	7,5
02	20	55	25	1,2	2,2	3,7	4,3	6,9	7,6
03	25	50	25	1,3	2,7	3,5	5,4	7,3	8,2
04	30	45	25	1,5	2,6	3,6	5,4	7,4	7,5
05	35	40	25	1,5	2,7	4,2	5,1	7,7	8,4
06	40	35	25	1,6	3,1	4,4	5,5	7,8	8,7

Conforme observado na Tabela 2, há uma regularidade no ganho de resistência do compósito quando se aumenta a percentagem de rejeito de minério de ferro, além disso o aumento da resistência é diretamente proporcional ao aumento de suas idades.

Segundo a NBR 15270:2017, classificam-se os blocos cerâmicos em três classes de resistência: Classe A < 1,5 MPa, Classe B < 2,5 MPa e Classe C < 4,0 MPa. A NBR 15270:2017 especifica a mínima resistência de compressão (fb) para blocos cerâmicos de vedação igual à 4,0 MPa (classe VED 40) e para fins estruturais cinco classes (EST60 = 6,0 MPa; EST80 = 8,0 MPa; EST100 = 10,0 MPa; EST120 = 12,0 MPa e EST140 = 14,0 MPa). Conforme observado na Tabela 2, aos 28 dias de cura a resistência à compressão de todos os corpos de prova ultrapassaram as demandas da 15270:2017 para blocos cerâmicos de vedação igual à 4,0 MPa (classe VED 40) e aos 90 dias os mesmos ultrapassaram a demanda da classe EST60 = 6,0 MPa (classe estrutural).

Dentre todas as composições destaca-se a composição de número 3 (25% de RMF, 50% de RC e 25% de RPC), visto que aos 28 dias de cura sua resistência à compressão axial obteve 5,4MPa, resistência bastante semelhante a composição 6 (40% de RMF, 35% de RC e 25% de RPC), nesse sentido, os autores da pesquisa escolheram a composição 3 para realização de outros ensaios e acompanhamento do ganho de resistência, visto que há uma maior geração de resíduo de concreto, além deste ser mais abundante em todo o país.

Na Figura 1 é possível observar o rompimento de um corpo de prova à resistência à

compressão axial.

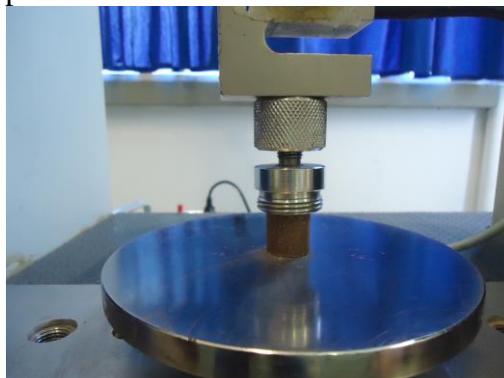


Figura 1. Rompimento de um corpo de prova à resistência à compressão axial.

Fonte: Autoria própria.

### 3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrômetro Dispersivo de Energia (EDS)

As estruturas morfológicas das composições e suas alterações foram verificadas através do MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) e EDS (Espectrometria de Energia Dispersiva). Na Figura 2, são apresentados os resultados obtidos para a mistura inicial (composição 3), constituído de 25% de rejeito do minério de ferro, 50% de resíduo de concreto e 25% de resíduo da produção da cal.

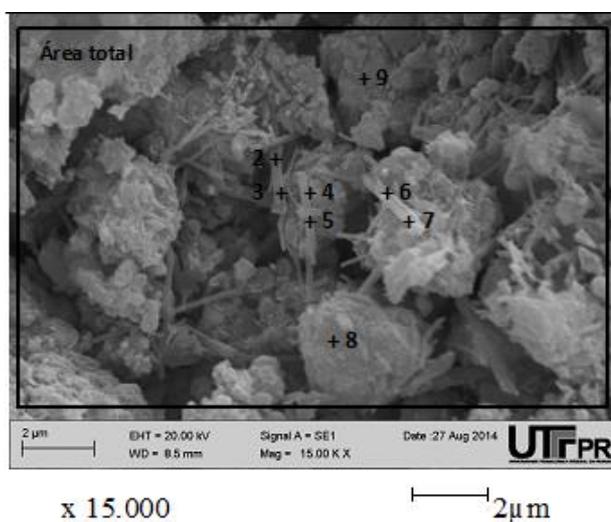


Figura 2. MEV e EDS da composição 3 – mistura inicial.

Fonte: Autoria própria.



Pode-se verificar na Figura 2, a existência de muitos poros entre as partículas. A ampliação da Figura 2 é de 15000X e ainda pode-se observar alguns elementos com formas cristalinas, isso pode se dar pelo início da formação de novas estruturas, pois a água incorporada no lodo do minério de ferro juntamente com o ambiente alcalino pode ter dado o início ao processo de hidratação da composição.

A composição microquímica realizada pelo EDS demonstra que se trata de um material amorfo, pois a percentagem dos elementos químicos da amostra varia bruscamente.

Na Figura 3, é apresentado a estrutura morfológica da composição 3 aos 28 dias de cura através do MEV e pontos da análise microquímica através do EDS.

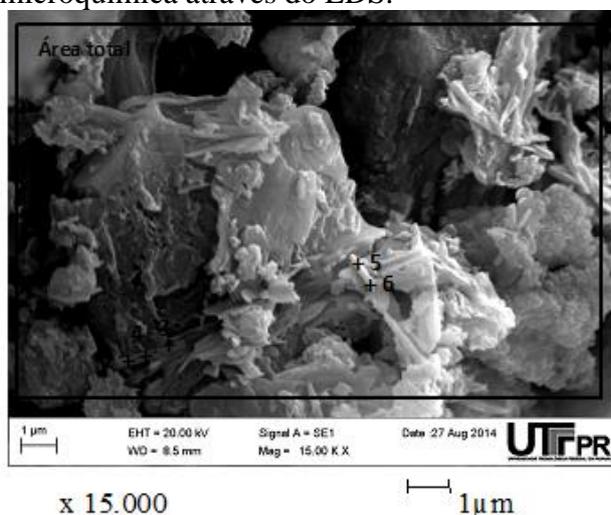


Figura 3. MEV e EDS da composição 3 – mistura 28 dias de cura.  
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 3, pode-se constatar algumas estruturas solidificadas, provenientes da interação entre os componentes da mistura. Através do EDS pode-se detectar a ausência de homogeneização dos componentes da mistura em micro nível, fator que esclarece a natureza essencialmente amorfa das novas formações pesquisadas. Nos pontos 5 e 6 houve grande variação entre os elementos carbono, silício e ferro.

Na Figura 4, é apresentado a estrutura morfológica da composição 3 aos 180 dias de cura através do MEV e pontos da análise microquímica através do EDS.

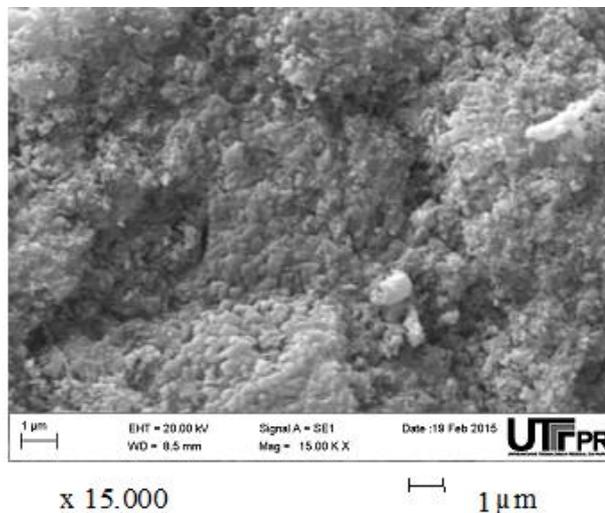


Figura 4. MEV e EDS da composição 3 – mistura 180 dias de cura.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4 é observado nas imagens que aos 180 dias de cura, a quantidade de poros é muito menor às primeiras idades e que há uma grande interação entre as partículas que constituem a amostra número 3.

#### 4 CONCLUSÃO

Foi experimentalmente provado que o desenvolvimento de um compósito a partir de rejeito do minério de ferro, resíduos de concreto e resíduo da produção de cal é viável e pode ser utilizado como matéria prima em materiais de construção civil, visto que suas características e propriedades sobressaem às de demandas de Normas Brasileiras.

Foram desenvolvidos 6 composições variando os teores de RMF entre 15 e 45% em peso e observou-se que os valores de resistência à compressão uniaxial aumentou em função do teor do RMF.

Por meio dos estudos através de métodos de



MEV com EDS foram determinadas as interações físico-químicas e as formações de estruturas morfológicas nos compósitos desenvolvidos, considerando o aumento da resistência mecânica durante os períodos de cura, quais ocorreram devido à dissolução em ambiente alcalino de superfícies das partículas sólidas de componentes com síntese de novas formações amorfas.

A utilização desses três resíduos industriais em substituição às matérias primas naturais é economicamente viável, devido ao baixo custo dos resíduos em comparação com as matérias primas tradicionais.

O maior beneficiado com a aplicação dos resultados obtidos nesta pesquisa é o meio ambiente, considerando a real possibilidade de utilização de resíduos industriais como matéria prima, aplicando uma destinação final adequada, prevenindo uma possível contaminação ao meio ambiente e, principalmente, minimizando a extração de recursos naturais.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Universidade Tecnológica Federal do Paraná e a Universidade Tuiuti do Paraná pela disponibilidade de materiais e laboratórios e pela confiança em nosso trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: NBR 6453 - Cal virgem para construção civil - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.
- DE JUAN M. S.; GUTIÉRREZ P. A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, v.23, p. 872-877, 2009.
- ETXEBERRIA M.; VÁZQUEZ E.; MARÍ A.; BARRA M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, v.37, p. 735-742, 2007.
- FERREIRA J.M.F.; OLHERO S.M. Al-rich sludge

treatments towards recycling. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 22, p. 2243-2249, 2002.

- GARCIA, A. Setor de fabricação de cimento e cal. *Inspeção geral do ambiente e do ordenamento do território*. Lisboa. 2008.
- GALVÃO, J. L. B.; ANDRADE, H. D.; BRIGOLINI, G. J.; PEIXOTO, R. A. F.; MENDES, J. C. Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. *Journal of Cleaner Production* 200 (2018) 412-422, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.313>
- LUO, L.; ZHANG, Y.; BAO, S.; CHEN, T. Utilization of iron ore tailings as raw material for portland cement clinker production, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2016 (2016), <https://doi.org/10.1155/2016/1596047>.
- SHETTIMA, A.U.; HUSSIN, M.W.; AHMAD, Y.; MIRZA, J. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete, *Constr. Build. Mater.* 120 (2016) 72–79, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.095>.
- ZHAO, S.; FAN, J.; SUN, W. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultrahigh performance concrete, *Constr. Build. Mater.* 50 (2014) 540–548, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.019>.