

RESÍDUOS SÓLIDOS

O REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO E SUAS APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL

João Vitor Silveira Souza – joaovitor1501@gmail.com

Universidade FUMEC

Juliana da Silva e Mascarenhas Guedes – juliana@mascarenhas.eng.br

Universidade FUMEC

1. RESUMO

A mineração vem se tornando alvo da mídia dado aos recentes eventos em Mariana-MG, mas é seguro afirmar que essa atenção é tardia, visto que os danos ambientais da mesma acompanham o início dos seus trabalhos em massa no país. O rejeito do beneficiamento de minério de ferro (RBMf) é um subproduto da mineração do ferro que ocupa grandes áreas antes ocupadas por fauna e flora abundantes, demandando uma solução imediata para tal problema. Pensando nisso, nesse artigo são apresentados diversos estudos na aplicação do RBMF na construção civil, área que demandaria de grandes quantidades do produto, criando uma vazão adequada para o volume de produção do mesmo.

Os estudos mostraram resultados em sua grande maioria positivos quanto à aplicação do rejeito, melhorando variadas propriedades em solos e concretos, consoante à concentração e propriedades tanto do rejeito, quanto do material de mistura em questão.

2. INTRODUÇÃO/OBJETIVO

O Brasil detém uma grande diversidade geológica, propícia à existência de jazidas variadas e em abundância. Essas características colocam o país em destaque no cenário global no que tangem às reservas e produção mineral. Produção essa que atingiu cerca de 5% do PIB Industrial em 2014 (IBRAM, 2015).

Atualmente existem 8.400 minas em atividades no país, tendo 1.233 delas uma produção que pode chegar a 1 milhão de toneladas de minério ao ano (DNPM, 2015). O número de empresas mineradoras era de 8.870 em 2013, sendo mais de 5 mil delas localizadas nas regiões Sul e Sudeste (DNPM, 2015). O setor de mineração produziu em bens minerais 400 milhões de toneladas de minério de ferro, em 2014 (IBRAM, 2015). Todos estes resultados apresentados são de grande proveito para o crescimento social e econômico do país, mas por trás do lucro e do reconhecimento mundial existe um problema de proporções econômicas e ambientais.

No processo de beneficiamento do minério de ferro ocorre a produção de um subproduto chamado de “rejeito”, que é levado para armazenamento em barragens. Estas barragens ocupam áreas de grande dimensões que, muitas vezes antes ocupadas

por vegetação, passam a se tornar um local dedicado apenas para tal armazenamento. Além da questão ambiental local, recentemente vimos a dimensão das tragédias que podem ocorrer devido à quantidade de material que compõe tais bacias de disposição.

No momento atual todas as mineradoras de ferro tem que responsabilizar-se por um investimento constante para a manutenção de um material até então sem reaproveitamento e que, conseqüentemente, tem seu volume aumentado sem esperanças de mudança.

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010) apenas pode ser definido como rejeito:

“[...]resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.”

Por conseguinte, a disposição deste material nas barragens de rejeito deve ser considerada como algo temporário, de forma que a sua massiva atividade de armazenamento trabalhe em paralelo e com mesmo empenho que as pesquisas para o seu tratamento e recuperação.

Visto isso, a pesquisa bibliográfica apresentada aqui tem como objetivo reunir informações sobre as características e estudos já realizados sobre o rejeito de minério de ferro e sua aplicação na construção civil, com o âmbito de iniciar um projeto de pesquisa para o estudo aprofundado em laboratório e em campo da utilização do mesmo, propondo variadas soluções de engajamento social e econômico para o problema atual do rejeito na mineração.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. O REJEITO

O rejeito em estudo é um subproduto resultante do processo de lavra e beneficiamento do minério de ferro. Após a lavra, processo de escavação onde ocorre a

retirada do solo de encobrimento para o desmonte da rocha, é gerado o rejeito estéril composto do solo supracitado e agregado do interior da rocha (CAMPANHA, 2011). Posteriormente é realizado o processo de beneficiamento por meio da preparação granulométrica, concentração ou purificação do minério por métodos físicos ou químicos (MME, 2008), gerando um rejeito de minério com concentrações de ferro que podem chegar a 70% (PRESOTTI, 2002).

3.2. TEOR DE FERRO X RESISTÊNCIA

De forma a apresentar alternativas mais viáveis para o problema do rejeito, é essencial conhecer as propriedades do mesmo que influenciam na obtenção de resultados positivos em resistência mecânica. Sendo assim, a porcentagem de ferro, fator de extrema variância entre os tipos de rejeitos, é essencial a ser estudado.

Em uma análise granulométrica, é habitual notar-se um aumento das partículas finas proporcional ao aumento do teor de ferro, além de um aumento de massa específica na mesma proporção (PRESOTTI, 2002). A diminuição do diâmetro das partículas de ferro nos rejeitos é justificada pelo fato de que no processo de beneficiamento do minério, a separação magnética tende a retirar mais partículas de maior diâmetro, enquanto as de menor diâmetro ficam retidas entre as partículas sem propriedades magnéticas (HERNANDEZ, 2002). O aumento da massa específica alia-se ao fato de que as partículas de ferro são consideravelmente mais densas que minerais comuns como quartzos, granitos e gnaisses.

O aumento das partículas finas supracitado também causa a diminuição da porosidade da amostra, possibilitando a obtenção de uma relação entre a mesma e o ângulo de atrito efetivo, sendo o último responsável diretamente pelos resultados de resistência ao cisalhamento e à compressão triaxial. Sendo assim, para quaisquer incrementos na densidade pode-se esperar o diretamente proporcional em termos de resistência, desde que sejam utilizados solos granulares densos, onde a resistência de pico diverja da resistência residual (ESPÓSITO, 2000).

3.3. APLICAÇÕES

3.3.1. APRIMORAMENTO DA INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA E RODOVIÁRIA

A utilização do rejeito de minério para aprimoramento da resistência de solos granulares é uma alternativa extremamente importante de ser analisada, visto que a utilização destes solos para a construção de rodovias e ferrovias é massiva, promovendo uma vazão considerável para o rejeito produzido na mineração.

Em estudo realizado por (FERNANDES, 2005), utilizou-se dos materiais classificados como resíduos estéreis de itabiritos silicosos (EIS) e dolomíticos (EID), com característica granulométrica de areia e silte. Tal estudo foi dedicado à aplicação do rejeito e rejeito estéril de minério de ferro com solo granular areno-siltoso, na infraestrutura ferroviária. Além disso utilizou-se do rejeito de ferro (RF) proveniente do beneficiamento do minério, com características extremamente finas e com grãos uniformes apresentados como um silte arenoso.

Nos estudos de Fernandes (2005) foram realizados os ensaios de Granulometria, Limites Físicos, Densidade Real dos Grãos (massa específica), Índice de Vazios, Permeabilidade, Compactação de Solos e CBR, Cisalhamento direto e Compressão Triaxial Dinâmica.

Estudo similar foi realizado por (BASTOS, 2013), onde o rejeito de minério de ferro, estabilizado granulometricamente e quimicamente, foi submetido a ensaios como Granulometria, Densidade Real dos Grãos (massa específica), Compactação de Solos e CBR, Resistência à Compressão Simples, Absorção e Durabilidade.

3.3.2. APRIMORAMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E TRAÇÃO

Caracterizado habitualmente como um material de características granulométricas de silte e argila, o rejeito do minério de ferro se mostrou como uma componente adequada para preenchimento dos vazios no concreto (FIOROTTI *et al.*, 2016).

Utilizando-se do rejeito de barragem de minério de ferro (RBMF) como adição à composição do traço de concreto e também como substituição parcial ao agregado natural, (FIOROTTI *et al.*, 2016), produziu um relatório técnico onde foram ensaiados

corpos de prova de concreto com diferentes porcentagens de resíduos. Realizou-se os ensaios de Resistência à Compressão Uniaxial em ambos os estudos, e Resistência à Tração na Flexão para os corpos de prova cilíndricos.

4. METODOLOGIA

Este artigo trata-se de uma pesquisa bibliográfica onde foram reunidas informações provindas de periódicos, dissertações de mestrado e doutorado, com o objetivo de apresentar dados previamente levantados sobre a eficiência da aplicação do rejeito de minério de ferro na construção civil, de forma que o mesmo passe a se tornar um material reaproveitável.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. APRIMORAMENTO DA INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA E FERROVIÁRIA

Os rejeitos classificados como resíduos estéreis de itabiritos silicosos (EIS) e dolomíticos (EID), e rejeito de ferro (RF) foram inicialmente estudados para que fossem definidas misturas de melhor qualidade, apresentando os resultados da Imagem 1.

Imagem 1 - Caracterização preliminar de amostras.
Fonte: Fernandes (2005).

Propriedades		EIS	EID	RF
Índices de vazios	$e_{máx}$	0,61	0,72	1,40
	$e_{mín}$	0,34	0,35	0,90
Limite de liquidez		28,50	37,80	16,41
Limite de Plasticidade		NP	NP	NP
Índice de Plasticidade		NP	NP	NP
Distribuição granulométrica	% Argila	0	5	11
	% Silte	38	12	74
	% Areia	62	23	15
	% Pedregulho	0	60	0
$D_{10}(mm)$		0,035	0,02	0,001
$D_{30}(mm)$		0,059	0,2	0,019
$D_{60}(mm)$		0,075	15	0,04
IG (Índice de grupo)		0,6	0	10
Classificação HRB		A-2-4	A-2-4	A-4
Classificação USC		SM	SM	ML
Classificação expedita		Areia siltosa	Areia siltosa	Silte arenoso
% passante na #200		38,00	17,00	85,00

Após análise dos resultados e constatação de que o índice de grupo do EID indica um melhor comportamento estrutural e que seu limite de liquidez sugere uma condição adequada para mistura com solo fino local, decidiu-se que o estéril EID seria utilizado nos ensaios posteriores, em mistura com outros solos (FERNANDES, 2005).

Dessa forma, escolheram-se solos fino e argiloso, designado como SRA, para a mistura com o rejeito estéril, designado como ME. A Imagem 2 apresenta os resultados de densidade dos grãos, compactação, umidade ótima, CBR e expansão, onde os números que acompanham a sigla correspondente ao rejeito estéril (ME), representam a quantidade percentual de rejeito que foi substituída da quantidade total de SRA. No caso da utilização de cal e cimento, foi-se utilizado apenas o material ME, sendo a diferença percentual referente à quantidade de cal/cimento acrescida.

Imagem 2—Relação dos resultados de caracterização de amostras.

Fonte: Fernandes, 2005.

Amostras	Dens. Grãos	Dens. Máx	Umid. Ótima	CBR	Expansão
	g/cm ³	kN/m ³	%	%	%
EID	4,117	19,10	20,00	39	0,063
SRA	3,034	16,80	25,80	30	0,038
ME25	3,139	16,55	25,20	46	0,077
ME50	3,136	17,30	24,50	36	0,115
ME75	3,325	18,35	21,00	53	0,168
ME98-cal	3,153	22,70	8,50	73	0,029
ME94-cim	3,029	22,78	11,00	-	0,048
ME98-cim	3,015	22,71	11,60	131	0,043
RF	4,675	28,30	11,80	52,17	0,360

Pela análise dos resultados é possível verificar alguns fatores importantes:

- Houve um aumento diretamente proporcional da densidade real dos grãos em relação ao percentual de ferro presente.
- As misturas de ME25 e ME75 apresentaram valores de CBR maiores que a amostra de rejeito (EID) e solo (SRA) individualmente.
- As amostras ME98-cal e ME98-cim representaram o maior aumento de CBR, apesar de terem diminuído consideravelmente a umidade ótima do rejeito. A diminuição da umidade ótima na cal pode ser combatida com o uso de cal hidratada, ao invés da cal virgem.

No estudo em questão foi realizado também o ensaio de Compressão Triaxial Dinâmica em materiais a serem utilizados em pista ferroviária (cuja caracterização consta na Imagem 3), para cálculo do módulo de resiliência. Os resultados do ensaio, apresentados na Imagem 4, indicaram que os rejeitos de minério de textura fina (RF) apresentaram maiores módulos de resiliência que os outros materiais estudados, podendo-se sugerir que quando submetido a níveis de tensões abaixo da tensão de ruptura, no ensaio de cargas repetidas, as partículas uniformes e irregulares tendem a apresentar deslocamentos relativos menores, resultando em deformações menores (FERNANDES, 2005).

Imagem 3 - Relação de resultados de caracterização de amostras.

Fonte: Fernandes (2005).

Material	Sigla	Ensaio								
		Dens. Real	% Argila	% Silte	% Areia	% Pedreg.	HRB	CBR (%)	Exp. (%)	Umid. Ot (%)
Solo Granular Local	SG	3,193	16	29	39	16	A-5 Solo Siltoso	65,70	0,21	24,60
Material de pista	MP	4,290	11	31	51	7	A-2-4 Areia Siltosa	105,77	0,08	9,53
Estéril de Mina - Cascalho Laterídico	EL	3,950	8	35	40	49	A-1a Areia e Pedregulho	125,00	0,06	12,22
Resíduo de Minério de Ferro	RF	4,675	11	74	15	0	A-4 Silte	52,17	0,115	11,80

Imagem 4 - Resultados de módulos de resiliência.

Fonte: Fernandes (2005).

Amostras	$M_R(\text{MPa})$ p $\sigma_3=0,042M$	Parâmetro k		w(%)	$\gamma_{dm\max}$ (kN/m^3)	R^2
		K_1	K_2			
RF	200,63	557,36	0,3223	7,40	28,45	0,6896
	167,69	1016,4	0,5684	11,00	29,60	0,8935
EL	157,43	506,16	0,3684	10,80	24,52	0,4892
	97,62	366,84	0,4176	12,20	24,95	0,8340
SG	97,23	459,20	0,4897	23,50	16,55	0,8644
	92,72	228,80	0,2849	24,60	17,00	0,6051
MP	268,42	666,30	0,2868	6,80	27,80	0,4149
	150,21	604,67	0,4393	9,50	26,15	0,8375

4.2 – APRIMORAMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E TRAÇÃO

As dosagens de concreto produzidas foram definidas de forma nas classes de resistência C20, C30 e C40, utilizando-se de areia natural, brita, cimento Portland (CPV – ARI) e rejeito de minério de ferro (FIOROTTI *et al.*, 2016).

Conforme citado anteriormente, utilizou-se do rejeito de minério de ferro como adição (TRA) e como substituição (TRS) ao traço original (TN) utilizado como referência. Ambos os métodos de utilização do rejeito adotaram as porcentagens de 0,5%, 5%, 10% e 50% em relação à quantidade de agregado miúdo, em todas as variações de resistência desejada na dosagem. O resultado ensaio de abatimento do cone dimensionado foi de 80 mm (FIOROTTI *et al.* 2016).

As imagens 1, 2 e 3 representam os resultados à compressão uniaxial, conforme norma ABNT 5739:2007, encontrados no estudo.

Imagem 5 - Gráfico relativo aos resultados do traço natural, com adição e com substituição de rejeito, referentes à classe de resistência C20.

Fonte: Fiorotti *et al.* (2016).

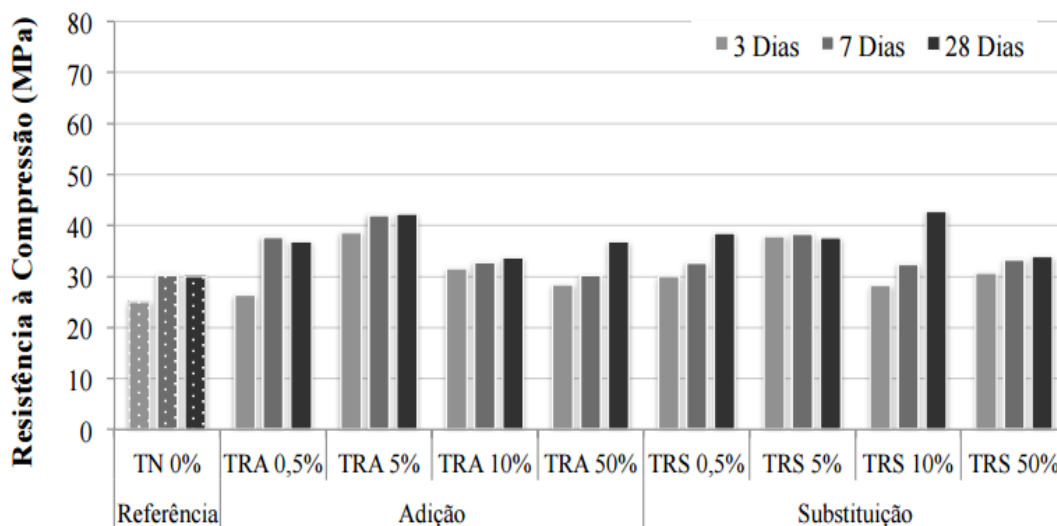


Imagem 6 - Gráfico relativo aos resultados do traço natural, com adição e com substituição de rejeito, referentes à classe de resistência C30.

Fonte: Fiorotti *et al.* (2016)

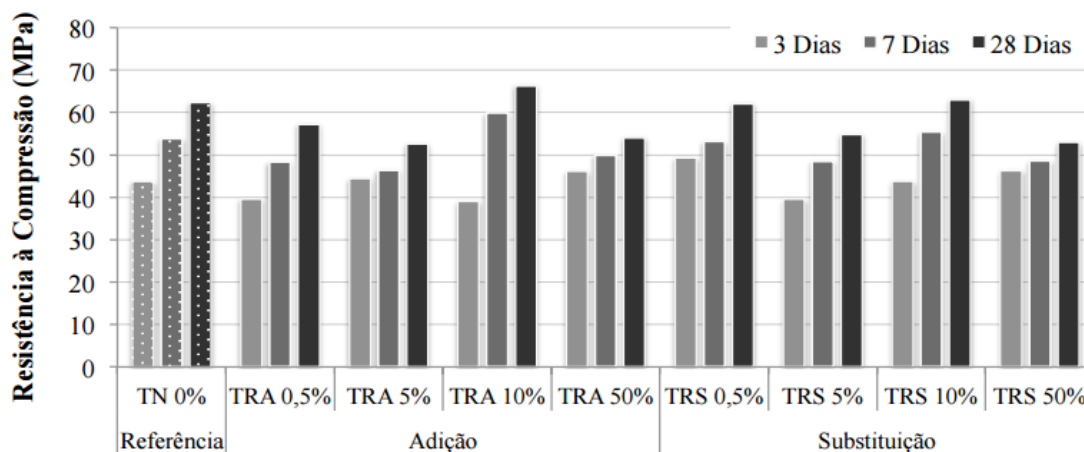
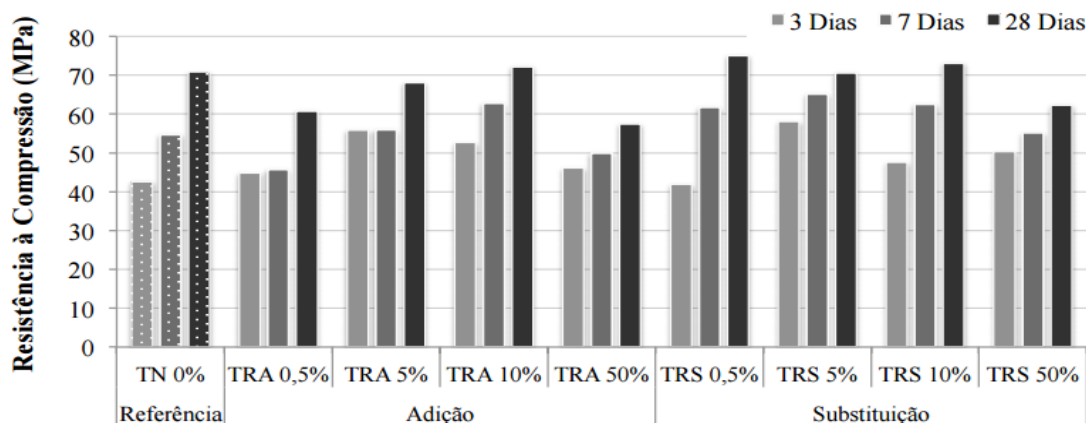


Imagem 7 - Gráfico relativo aos resultados do traço natural, com adição e com substituição de rejeito, referentes à classe de resistência C30.

Fonte: Fiorotti *et al.* (2016).



Observa-se que apesar da variação de resistência do concreto não ter acompanhado as proporções de rejeito utilizadas, a adição e substituição de 10% de rejeito apresentou todos os resultados superiores ao traço de referência, aos 28 dias. Todas as dosagens apresentaram resistência superior à mínima definida.

Em relação à resistência a tração, as imagens 4, 5 e 6 apresentam comparativo dos resultados com mesma metodologia do anterior. Os corpos de prova foram

moldados com dimensões 40 x 40 x 160 mm, submetidos à carga na razão de 50 ± 10 N/s, centralizada entre os apoios $100 \pm 0,5$ mm.

Imagem 8 - Gráfico relativo aos resultados do traço natural, com adição e com substituição de rejeito, referentes à classe de resistência C20.

Fonte: Fiotorri (2016)

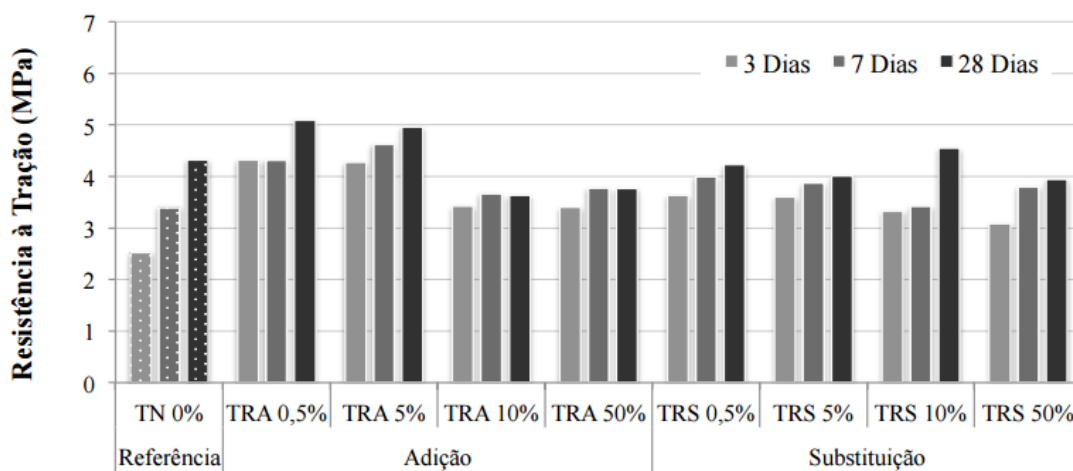


Imagem 9 - Gráfico relativo aos resultados do traço natural, com adição e com substituição de rejeito, referentes à classe de resistência C30.

Fonte: Fiorotti *et al.* (2016).

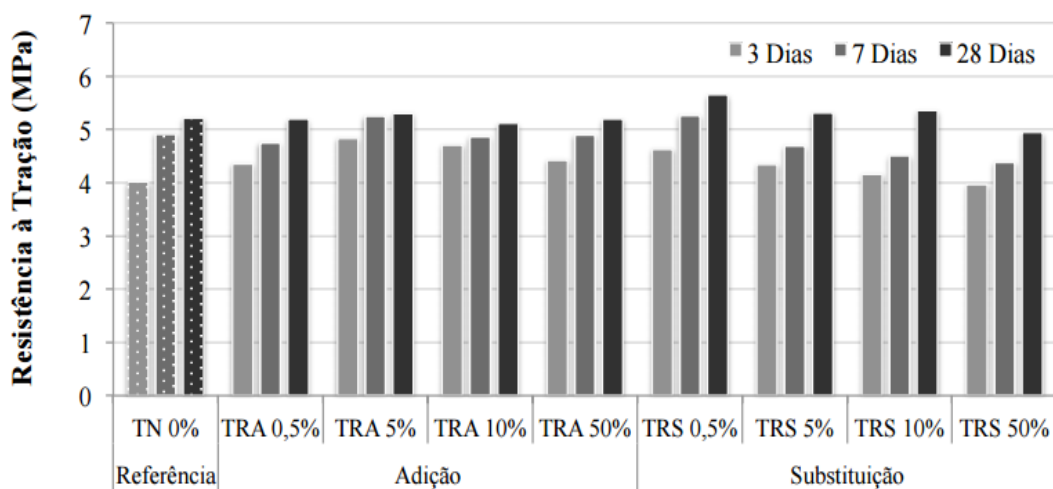
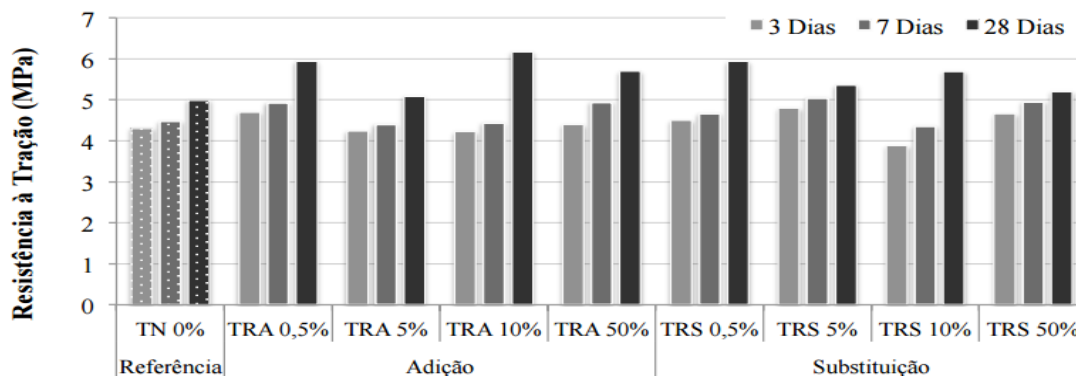


Imagem 10 - Gráfico relativo aos resultados do traço natural, com adição e com substituição de rejeito, referentes à classe de resistência C40.

Fonte: Fiorotti *et al.* (2016).



Os resultados encontrados foram, de forma geral, iguais ou superiores aos do traço de referência, onde método de adição se mostrou mais eficaz no aumento da resistência à tração em relação à substituição.

6. CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

A construção civil utiliza de solos granulares e agregados em quantidades comparáveis à produção de rejeito pelo beneficiamento do minério de ferro. Os resultados encontrados nos estudos apresentados, juntamente com vários outros que já foram e estão sendo desenvolvidos na área, nos permitem afirmar que o desenvolvimento de uma relação estreita entre a procura de material da construção civil, e a demanda pela retirada do rejeito de minério das barragens providas da mineração é algo necessário e impreterível.

Os resultados apresentados neste artigo sustentam tal relação, pois de forma geral os estudos foram positivos acerca dos benefícios do rejeito de minério de ferro na adição e substituição dos elementos de composição de solos granulares para infraestrutura rodoviária e ferroviária, e para composição de blocos de concreto.

Tais benefícios laboratoriais encontrados influenciam diretamente nos benefícios ambientais da utilização do rejeito. Os estudos aqui apresentados são relativos a áreas que, ao utilizarem o mesmo de forma corrente, apresentarão o escoamento colossal de

um material causador de danos irreparáveis ao ecossistema que o cerca, além da diminuição imediata dos custos de manutenção que acompanham seu armazenamento.

Não obstante, este artigo propõe como sugestão de estudos futuros a continuação dos estudos de aplicação do rejeito de ferro em laboratório e em campo, com respaldo científico e financeiro, e a possível reavaliação da utilização do termo “rejeito” para se referir ao subproduto do beneficiamento do minério de ferro.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações sobre a economia mineral brasileira –2015**. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/>>. Acesso em: 02 de abr. 2017.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral – 2015**. Disponível em: <www.dnpm.gov.br>. Acesso em: 02 de abr. 2017.

CAMPANHA, Ângela. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação**. 2011. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa – UFV, 2011.

MME – Ministério das Minas e Energia. **Beneficiamento do Minério de Ferro**. 2008. Disponível em: <http://www.redeaplmineral.org.br>. Acesso: 02 de abr. 2017.

PRESOTTI, Ednelson da Silva. **Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro**. 2002. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, 2002.

HERNANDEZ, Hector Maurício Osório. **Caracterização geomecânica de rejeitos aplicada a barragens de aterro hidráulico**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2002.

ESPÓSITO, Terezinha de Jesus. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico**. 2000. Tese de Doutorado em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2000.

FERNANDES, Gilberto. **Comportamento de estruturas de pavimentos ferroviários com utilização de solos finos e/ou resíduos de mineração de ferro associados à geossintéticos.** 2005. Tese de Doutorado em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2005.

PEIXOTO, Ricardo Fiorotti; BATISTA, Junio Oliveira dos Santos; COSTA, Ellen Cristine Pinto; SANTOS, Diego Haltyeri; FILHO, Joaquim Nery de Sant' Ana; BASTOS, Lucas Augusto de Castro; FONTES, Wanna Carvalho, MENDES, Julia Castro. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro na construção civil.** 2016. Relatório de Pesquisa. Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, Abril de 2016.