

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
técnica

IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas

IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens

VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens

XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia

23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Estudo Teórico sobre o Aproveitamento Geotécnico do Rejeito de Minério de Ferro

Paula Rosa Monteiro

Graduada em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, e paula.monteiro@engenharia.ufjf.br

Cátia de Paula Martins

Professora Adjunta, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, catia.martins@ufjf.edu.br

Heraldo Nunes Pitanga

Professor Associado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, heraldopitanga@ufjf.br

Vivian Bignoto da Rocha Cândido

Mestranda em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, vivian.bignoto@engenharia.ufjf.br

RESUMO: A necessidade de se buscar métodos ambientalmente corretos, socialmente justos e economicamente viáveis na Engenharia afetou também a área da mineração, deixando evidente a demanda por processos mais sustentáveis. Além disso, a escassez de agregados naturais, devido às restrições ambientais, despertaram a possibilidade em se usar os rejeitos de mineração como agregados para Engenharia. Os acidentes de Brumadinho e Mariana fizeram com que temas relacionados a disposição final dos rejeitos de mineração comesçassem a ser questionados, além de terem despertado sentimentos de insegurança na população que vive ao redor de barragens. Assim, esta pesquisa busca fazer uma revisão bibliográfica sobre o aproveitamento geotécnico do rejeito de minério de ferro e analisar possíveis tendências nesses estudos, como o local que mais pesquisa sobre o assunto, os ensaios que vem sendo mais realizados e o tipo de aplicação estudada por cada autor encontrado. Ao final do estudo, foi possível perceber que as áreas que mais pesquisam sobre o tema são justamente as que se destacam no cenário mineral brasileiro. Os ensaios mais realizados por cada autor, o tipo de aplicação mais estudado e quais materiais vem sendo misturados ao rejeito também demonstraram algumas tendências.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeito de Minério de Ferro (RMF), Aproveitamento Geotécnico de RMF, Geotecnia Ambiental.

ABSTRACT: The need to seek environmentally correct, socially fair and economically viable methods in Engineering also affected the mining area, making evident the demand for more sustainable processes. Furthermore, the scarcity of natural aggregates, due to environmental restrictions, aroused the possibility of using mining tailings as aggregates for Engineering. The accidents at Brumadinho and Mariana caused issues related to the final disposal of mining waste to begin to be questioned, in addition to having aroused feelings of insecurity in the population living around dams. Thus, this research seeks to carry out a bibliographical review on the geotechnical use of iron ore tailings and to analyze possible trends in these studies, such as the location with the most research on the subject, the tests that have been carried out more and the type of application studied by every author found. At the end of the study, it was possible to see that the areas that research the most on the subject are precisely those that stand out in the Brazilian mineral scenario. The most frequently performed tests by each author, the most studied type of application and which materials have been mixed with the tailings also showed some trends.

KEYWORDS: Iron Ore Tailings (IOT), Geotechnical Utilization of IOT, Environmental Geotechnics.



1 Introdução

O aproveitamento de rejeitos de mineração é um tema que tem estado cada vez mais em pauta. A escassez de agregados naturais, devido às restrições ambientais, os acidentes envolvendo barragens de rejeitos, ou o fato de que vem ficando cada vez mais necessário esse aproveitamento, tanto ambiental quanto social, contribuem para evidenciar o assunto. Estudar o aproveitamento geotécnico desses materiais é o primeiro passo do processo, já que é muito importante e necessário conhecer o material que se pretende utilizar.

Assim, com a intenção de buscar por trabalhos que propõem a utilização de rejeitos de mineração na Geotecnia e separá-los em grupos de acordo com o tipo de aplicação estudada, procurou-se por artigos científicos, monografias, dissertações e teses no Google Acadêmico, em anais de congressos geotécnicos e em repositórios de universidades do país.

2 Revisão Bibliográfica

Após uma análise minuciosa dos 20 trabalhos encontrados, foi possível verificar a temática estudada, por autor, tendo sido pavimentação, barragens, geopolímero ou outras aplicações.

Dantas (2019), Carneiro (2020), Bastos (2013), Campanha (2011), Coelho (2008), Dantas (2015), Oliveira (2013), Silveira *et al.* (2018), Gratão *et al.* (2006), Rodrigues *et al.* (2019) e Rodrigues (2018) optaram por estudar a aplicação do RMF na pavimentação. Já Abbade *et al.* (2012), Echeverri Vergara (2012), Mafra (2016) e Busch *et al.* (1999) realizaram estudos relativos à aplicação em barragens. Somente um autor, dentre os analisados, estudou a aplicação em geopolímero, que, de acordo com Ferreira *et al.* (2020), são “polímeros inorgânicos, obtidos por meio da ativação alcalina de alumino silicatos em determinadas condições de pressão e de temperatura”. Por fim, Santos (2018), Cândido (2020), Fonseca e Villar (2014) e Silva *et al.* (2010) realizaram estudos que propuseram aplicações variadas ou apenas caracterizaram o rejeito, vislumbrando o seu potencial de aproveitamento geotécnico.

3 Análises

3.1 Estado de Origem do Rejeito

Com relação ao estado de origem tanto do rejeito estudado quanto do local da pesquisa, foi possível observar uma predominância do estado de Minas Gerais, sendo aquele com grande destaque na mineração brasileira, demonstrando que os pesquisadores destes locais estão mais empenhados em estudar o aproveitamento de rejeitos. A Figura 1 mostra essa predominância, como pode ser visto graficamente.

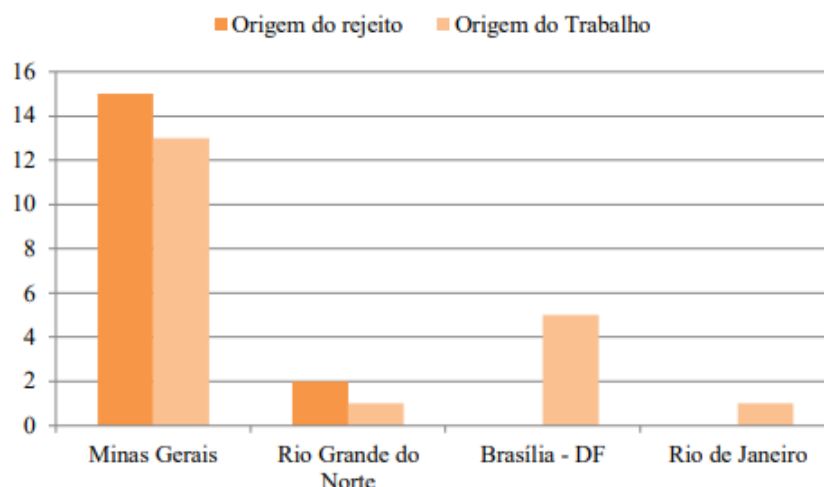


Figura 1. Origem do rejeito e da pesquisa, por estado.



3.2 Ensaios Realizados

Os ensaios realizados por cada autor foram divididos em seis categorias: caracterização física, química, mecânica, hidráulica, ambiental, mineralógica e microestrutural. Na Figura 2 é perceptível que as caracterizações física e mecânica obtiveram destaque.

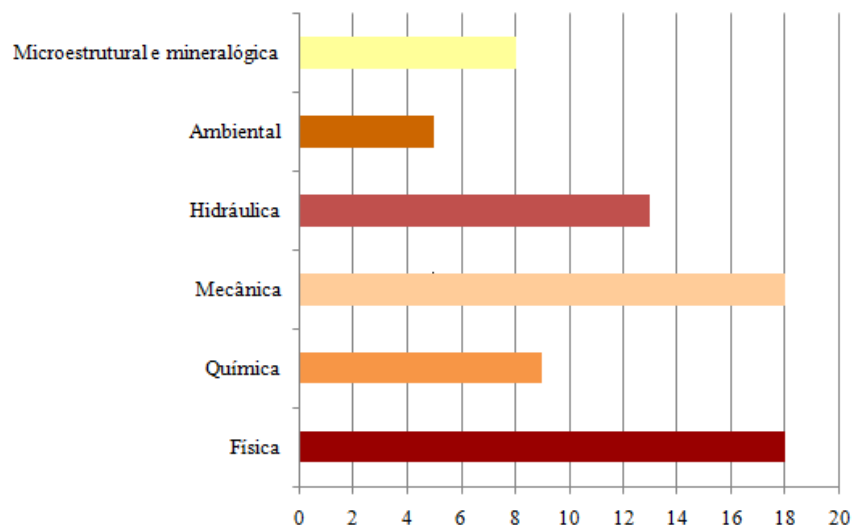


Figura 2. Caracterizações realizadas por cada autor.

Dentro da caracterização física, estão os ensaios de granulometria, limites de Atterberg, densidade dos sólidos, massa específica dos sólidos, massa unitária, peso específico dos sólidos, índice de vazios, ensaio de calha com retroanálise de alcance máximo, separação magnética e análise do comportamento magnético. As nomenclaturas de "peso específico", "densidade dos sólidos" e "massa específica" foram utilizadas para caracterizar os sólidos, e indicam uma mesma característica do solo. Com isso, 19 trabalhos realizaram tais determinações, cujo parâmetro é representativo da composição mineralógica do material estudado além de ser utilizado para cálculos no ensaio de granulometria. A Figura 3 mostra que os ensaios de granulometria, limites de Atterberg e massa específica dos sólidos foram os mais realizados.

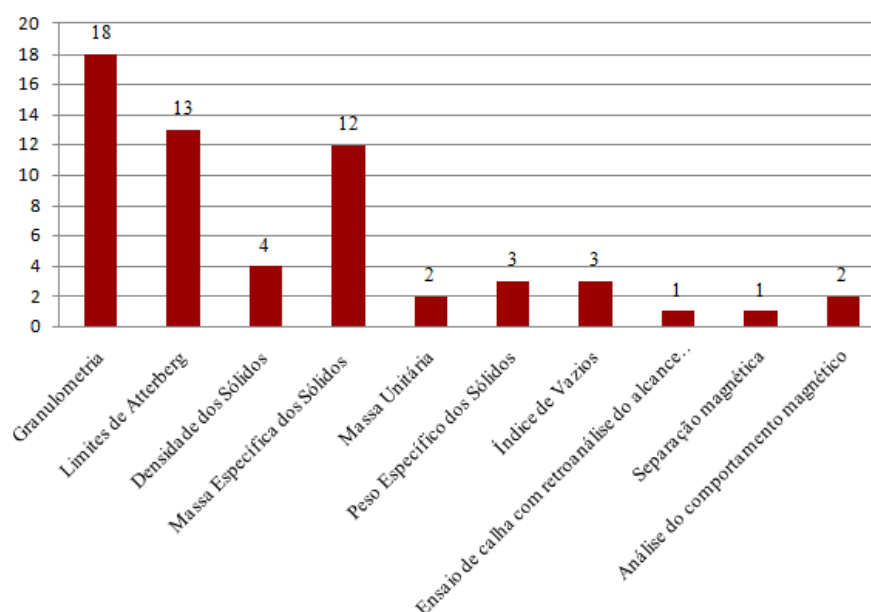


Figura 3. Ensaios de caracterização física.



Já com relação à caracterização química, foram realizados os ensaios de espectrômetro de energia dispersiva (EDS), fluorescência de raios-X (FRX), análise do pH, análise elementar CNH (Carbono, Nitrogênio e Hidrogênio), microsonda eletrônica, perda ao fogo, FTIR (Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier), ICP-OES (Espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente), condutividade elétrica, potencial de oxirredução e CTC (Capacidade de Troca Catiônica). Na Figura 4, é possível ver o destaque para o ensaio de FRX, seguido pela determinação do pH.

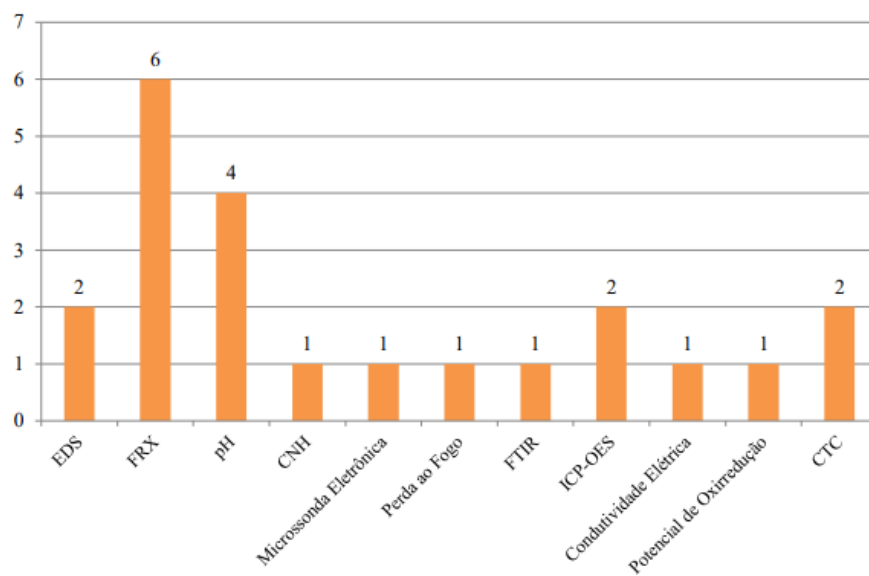


Figura 4. Ensaios de caracterização química.

Para a caracterização mecânica, os ensaios realizados pelos autores foram compactação, resistência à compressão simples (RCS), resistência ao cisalhamento direto (RCD), adensamento, módulo de resiliência (MR), resistência à tração por compressão diametral (RTCD), resistência ao dano por umidade induzida (RDUI), Mini-MCV, Índice Suporte Califórnia (ISC), Plano cisalhado com superfície polida (PCSP), Simulador de tráfego laboratorial – Hamburg Wheel-Track (HWT), compressão triaxial, Mini-Palheta e Mini-CBR. A Figura 5 mostra que os ensaios mais realizados foram compactação, RCS e ISC.

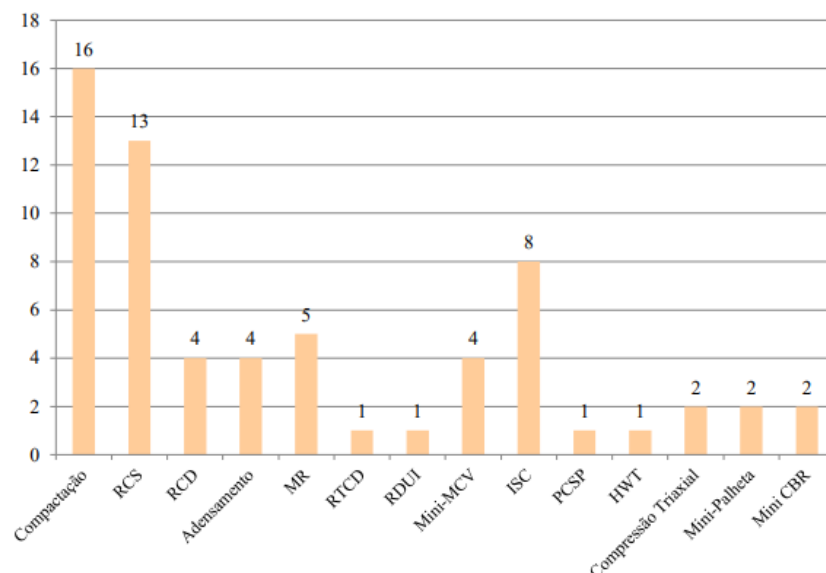


Figura 5. Ensaios de caracterização mecânica.

Já na caracterização hidráulica, os ensaios de absorção de água, durabilidade por molhagem e secagem, permeabilidade, perda de massa por imersão, curva característica solo-água, expansibilidade e medidor de potencial hídrico – sucção total (WP4C) foram executados pelos autores estudados. A Figura 6 mostra que o ensaio de permeabilidade obteve destaque.

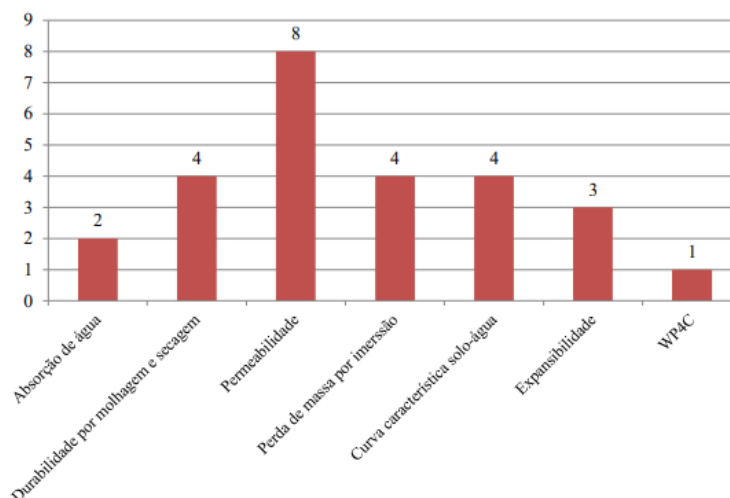


Figura 6. Ensaio de caracterização hidráulica.

Além das caracterizações mencionadas anteriormente, foram analisadas a caracterização ambiental e caracterizações mineralógica e microestrutural. Na caracterização ambiental, foram encontrados ensaios de lixiviação, solubilização e extração, sendo que quatro autores realizaram os dois primeiros ensaios e apenas um realizou o último. Já nas caracterizações mineralógica e microestrutural, ensaios de Difração de raios-X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microscopia Óptica (MO) foram analisados. Sete autores realizaram o primeiro ensaio, quatro o segundo e apenas dois realizaram o último ensaio.

3.3 Tipo de Aplicação Proposta

Após a análise dos trabalhos estudados, optou-se por dividi-los em quatro categorias relativas ao tipo de aplicação proposta por cada autor. Estas categorias foram a pavimentação, barragens, geopolímeros e outras aplicações, que surgiram quando o autor apenas caracterizou o material ou sugeriu várias aplicações.

Foi perceptível que o tipo de ensaio realizado por cada autor estava diretamente ligado à aplicação estudada por ele, ou seja os autores que estudaram aplicações de RMF na pavimentação, realizaram, predominantemente, os ensaios mecânicos, por exemplo. A Figura 7 traz um gráfico que mostra a preferência por estudar a aplicação do RMF em camadas de infraestrutura rodoviária.

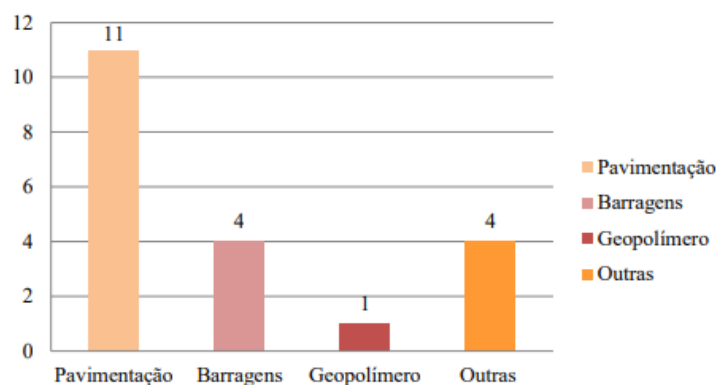


Figura 7. Tipo de aplicação estudada.



3.4 Tipo de Material Misturado ao Rejeito

Com relação ao material misturado ao rejeito, muitas vezes com a intenção de estabilizá-lo, foram encontrados trabalhos que utilizaram solo, cimento, polímero, fibras, escória de aciaria, cal, metacaulim e argila. A Figura 8 mostra, graficamente, que os materiais solo e cimentos tem sido os mais utilizados para este fim.

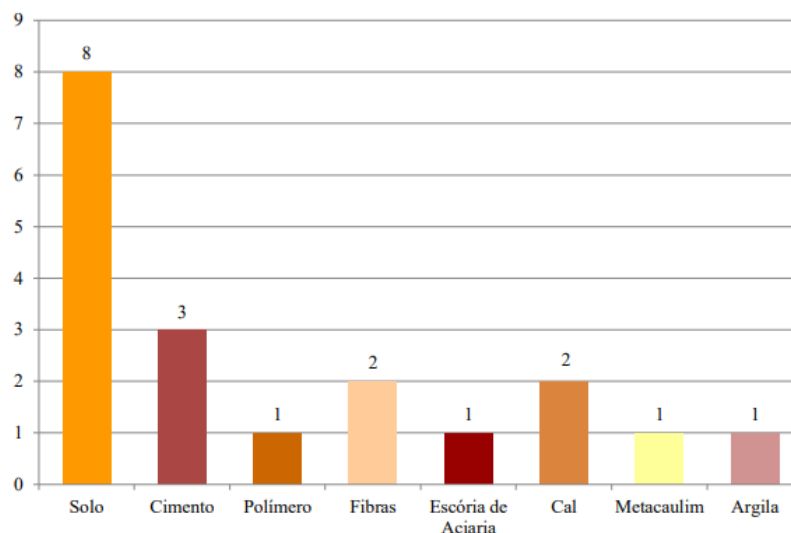


Figura 8. Tipo de material misturado ao RMF.

3.5 Resultados obtidos pelos autores estudados

Por fim, a Figura 9 mostra um gráfico que reúne os resultados obtidos pelos autores, sendo eles parcialmente positivos, totalmente positivos, totalmente negativos ou não conclusivos. Estes resultados não conclusivos foram assim denominados por apresentarem resultados positivos, mas que não se apresentaram suficientes para validar uma aplicação para o RMF. Neste caso, torna-se necessário que os estudos sejam continuados.

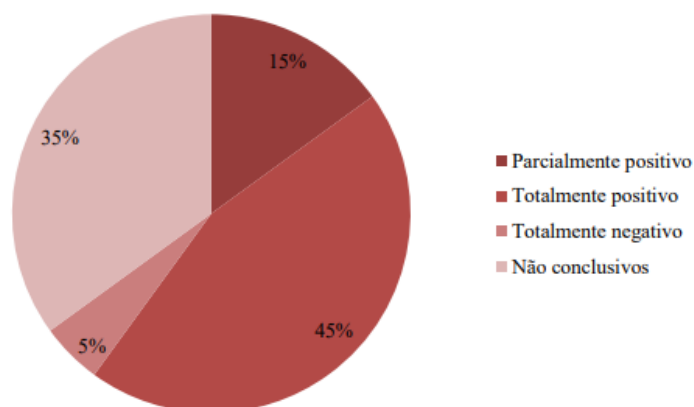


Figura 9. Resultado obtido.



4 Considerações Finais

Ao final de tudo o que foi exposto, fica clara a importância de se utilizar os rejeitos de mineração na Engenharia como um todo. Mais ainda, esta aplicação na Geotecnia é particularmente interessante, já que esta área demanda grandes quantidades de materiais naturais, que já não estão mais tão disponíveis.

Assim, a pesquisa evidenciou a importância do estado de Minas Gerais na mineração brasileira, demonstrando grande potencial para o aproveitamento geotécnico do RMF no estado. Destacou também quais são os ensaios de caracterização física, química, hidráulica, mecânica, ambiental, mineralógica e microestrutural que estão sendo mais realizadas na atualidade. Com relação ao tipo de aplicação proposto por cada autor, destaca-se a pavimentação, na composição de camadas de base e sub-base de pavimentos. Solo e cimentos foram os materiais mais misturados ao rejeito. Por fim, percebeu-se que 95% dos estudos obtiveram algum tipo de resultado positivo, demonstrando grande potencial na área de aproveitamento geotécnico de rejeitos de minério de ferro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DANTAS, A. A. N. *Avaliação do comportamento mecânico, geoquímico, mineralógico e geoambiental de um rejeito de minério de ferro incorporado a um solo laterítico para fins rodoviários*. 2019. 226 p. Tese (Doutorado em Geotecnia). Universidade de Brasília, Brasília, 2019. PDF.
- CARNEIRO, A. A. *Comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro estabilizado com polímero e do composto rejeito-polímero reforçado com fibras de polipropileno*. Tese de Doutorado, Publicação G.DM- 162/20 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2020, 146p. PDF.
- BASTOS, L. A. de C. *Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade Federal De Ouro Preto, 2013, 97 p. PDF.
- CAMPANHA, Â. *Caracterização de Rejeitos de Minério de Ferro para Uso em Pavimentação*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, 2011, 86 p. PDF.
- COELHO, E. F. F. *Estudo do comportamento mecânico de rejeitos de minério de ferro reforçados com fibras sintéticas*. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geotecnia), Universidade Federal de Ouro Preto, 2008, 83 p. PDF.
- DANTAS, A. A. N. *Caracterização de resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro para uso em pavimentação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015, 107p. PDF.
- OLIVEIRA, T. M. de. *Caracterização de misturas de rejeitos de minério de ferro melhoradas com adição de cimento com vistas à aplicação em estradas e aterros*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia; Saneamento ambiental), Universidade Federal de Viçosa, 2013, 88 p. PDF.
- SILVEIRA, V. L.; NETTO, Q. M.; GUIMARÃES, A. C. R. (2018) Caracterização de agregado oriundo de mineração para uso em pavimentação. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 19., 2018, Salvador. *Anais...* Salvador: ABMS, 2018. 10 p.
- GRATÃO, L. S.; PEREIRA, E. L.; RIBEIRO, L. F. M. Utilização de um rejeito de mineração como alternativa para estabilização de um solo tropical da região Centro-oeste. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 13., 2006, Curitiba. *Anais...* Curitiba: ABMS, 2006. 6 p.
- RODRIGUES, K. H. P. *Estudo de estabilização granulométrica de solos utilizando rejeito de mineração*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2018, 108 f. PDF.
- ABBADÉ, P. U. B.; FONSECA, R. F.; VILLAR, L. F. S. Caracterização Geotécnica E Definição De Parâmetros Hidráulicos E De Resistência De Um Rejeito De Minério De Ferro. In: CONGRESSO

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
 23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
 23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
 COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 16., 2012, Porto de Galinhas. *Anais...* Porto de Galinhas: ABMS, 2012. 8 p.

ECHEVERRI VERGARA, J. *Aplicabilidade dos rejeitos de mineração de ferro para utilização em filtros de barragens*. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geotecnia), Universidade de Brasília, 2012, 112 p. PDF.

MAFRA, J. M. Q. Barragem construída com rejeito ciclonado: uma possível solução para disposição de rejeitos no Brasil? . In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 18., 2016, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: ABMS, 2016. 8 p.

BUSCH, R. G.; ABRÃO, P. C.; OLIVEIRA, S. L.; ABRÃO, G. S.; NETO, A. DA C. S. Barragem executada com rejeitos de minério de ferro. In: REGIO/ Geossintéticos, 4., 1999, São José dos Campos. *Anais...* São José dos Campos: ITA, 1999. 11 p.

FERREIRA, J. P.; SANTOS, F. M. A.; TAVARES, S. G.; AGUILAR, M. T. P. Obtenção de geopolímero a partir do metacaulim com adição de rejeito de mineração depositado na Barragem de Córrego do Feijão (Brumadinho – MG, Brasil). In: CONRESOL – CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, 3., 2020, Gramado-RS. *Anais...* Gramado, 2020.

SANTOS, T. G. *Reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro e ouro com base em uma caracterização tecnológica e geoambiental*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, 2018, 91 p. PDF.

CÂNDIDO, V. B. R. *Estudo do rejeito de minério de ferro e misturas com solo compactado*. Monografia. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2020, 71p. PDF.

RODRIGUES, K. H. P.; FERNANDES, G.; PITANGA, H. N.; PEREIRA, E. L. Estudo De Estabilização Granulométrica De Solos Utilizando Rejeito De Mineração. In: Congresso Brasileiro De Geotecnia Ambiental, 9., 2019, São Carlos. *Anais...* São Carlos: ABMS, 2019. p 81 – 90.

FONSECA, R. F.; VILLAR, L. F. S. Caracterização Geotécnica e Reológica de um Rejeito de Minério de Ferro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 17., 2014, Goiânia. *Anais...* Goiânia: ABMS, 2014. 8 p.

SILVA, D. L.; VILLAR, L. F. S.; AZEVEDO, G.; DE CAMPOS, T. M. P.; AZEVEDO, R. F. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 15., 2010, Gramado. *Anais...* Gramado: ABMS, 2010. 8 p.