

# Comparativo Dos Parâmetros de Caracterização De Rejeitos Filtrados De Minério De Ferro Provenientes Das Minas De Brucutu E Itabira.

Danilo Manata Eloi  
Engenheiro Geotecnico, Afiliação, Itabira, Brasil, danilo.eloi@vale.com

André Gonçalves Azevedo  
Engenheiro Geotecnico, Afiliação, Santa Barbara, Brasil, andre.azevedo1@vale.com

Mauro Castro Lima Filho  
Coordenador de Geotecnia e Topografia, Afiliação, Itabira, Brasil, mauro.castro@vale.com

Miguel Neto Paganin  
Gerente Geral de Geotecnia e Hidrogeologia Itabira, Afiliação, Itabira, Brasil, miguel.paganin@vale.com

Rodney de Andrade Silva  
Engenheiro Geotecnico, Afiliação, Itabira, Brasil, rodney.silva@vale.com

**RESUMO:** Com a gradual transição da disposição dos rejeitos em barragens para a disposição em pilhas controladas em termos de parâmetros geomecânicos, visando a estabilidade dessas novas estruturas, foi necessário a implantação de tecnologias para a filtragem dos rejeitos de modo a reduzir as saturações desses materiais para que possam ser empilhados em metodologias ascendentes com controles de compactação. As minas de Brucutu e Itabira da empresa Vale S.A. implantaram suas usinas de filtragem de rejeitos para atender as premissas dos projetos de empilhamentos de rejeitos filtrados com controles tecnológicos dos parâmetros dos materiais, considerando as nuances de cada rejeito, muito influenciado pelos processos produtivos e pela litologia de cada complexo minerário, mesmo estando ambas as minas na região do quadrilátero ferrífero. Em cada complexo minerário foram executados estudos para determinação dos parâmetros de caracterização que foram utilizados na elaboração dos projetos de empilhamento. Neste ponto, ensaios de caracterização granulométrica, massa específica, limites de Atterberg e compactação Proctor foram executados visando compreender as especificidades dos rejeitos. Neste trabalho demonstrou-se as principais diferenças e convergências referentes à caracterização e parâmetros de compactação nas frações finas, com diâmetros inferiores a 10 microns, refletindo diretamente na trabalhabilidade do material e em uma variação da umidade ótima de compactação. Assim, desenvolve-se o estudo acerca das causalidades das diferenças entre os parâmetros das minas e suas imposições nos empilhamentos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Rejeitos, Parâmetros Geomecânicos, Caracterização, Minério de Ferro.

**ABSTRACT:** With the gradual transition from the disposal of tailings in dams to disposal in piles controlled in terms of characterization parameters of resistance and critical state, in order to ensure the stability of these new structures, it has been necessary to implement technologies for filtering tailings in order to reduce the saturation of these materials so that they can be stacked in ascending methodologies with compaction controls. Vale S.A.'s Brucutu and Itabira mines set up their tailings filtration plants to meet the requirements of the filtered tailings stacking projects with technological controls of the material parameters, taking into account the nuances of each tailing, greatly influenced by the production processes and lithology of each mining complex, even though both mines are in the Iron Quadrangle region. In each mining complex, studies were carried out to determine the characterization parameters that were used to draw up the piling projects. At this point, tests of granulometric characterization, specific mass, Atterberg limits and Proctor compaction were

carried out in order to understand the specificities of the tailings. This work demonstrated the main differences and convergences regarding the characterization and compaction parameters of the fine fractions, with diameters of less than 10 microns, which directly reflect the workability of the material and a variation in the optimum compaction humidity. In this way, the study of the causalities of the differences between the parameters of the mines and their impositions on stacking is developed.

**KEYWORDS:** Tailings, Geomechanical Parameters, Characterization, Iron Ore.

## 1 INTRODUÇÃO

A geração de rejeitos está associada ao processo de beneficiamento do minério. Conforme destaca Boccamino (2017), a produção de minério de ferro está dividida em três processos macros: a extração, o beneficiamento, a comercialização do produto e é a partir do processo de beneficiamento, etapa na qual se pretende a purificação do minério, que surgem os rejeitos como um novo material inerente ao processo global. O processo de beneficiamento envolve a adição de água e, a depender da destinação do rejeito, é necessária aplicação de práticas de desaguamento. Davies et al. (2010) classifica os rejeitos desaguados como: lama convencional quando não há instalações de deslamagem ou apenas são usados ciclones e o percentual de sólidos é cerca 30-40%, rejeito espessado quando se emprega espessadores com produtos químicos e o percentual de sólidos varia entre 45-65%, pasta quando utilizados os espessadores de cone profundo e percentual de 65-70% e torta quando utilizados filtros (vácuo ou pressão) e percentual de sólidos cerca de 80-85%.

Nos últimos 20 anos, sobretudo após registros de desastres ambientais e sociais envolvendo barragens como Mount Polley no Canadá em 2014, Fundão em 2015 e Feijão em 2019 no Brasil (SCHOENBERGER, 2016 e WILLIAMS, 2021), a filtragem de rejeitos tem sido saída para obtenção de maior percentual de sólidos na composição rejeito-água e a destinação do rejeito filtrado em pilhas em condições não-saturada. Valadão (2008) define a filtragem como uma operação unitária de separação dos sólidos contidos em uma suspensão aquosa mediante a passagem dessa polpa através de um meio filtrante, que retém as partículas sólidas e permite a passagem do líquido. O líquido que passa o meio filtrante é denominado filtrado e as partículas retidas compõem a torta.

No que se refere ao desaguamento de rejeito, Morgenstern et al. (2015) sugere a busca de soluções que otimizem e reduzam a quantidade de água, promovendo condições não-saturadas e a obtenção de condições dilatantes em todo o depósito de rejeitos por meio de compactação.

De acordo Caputo (1988), a compactação tem por finalidade reduzir os índices de vazios por processos manuais ou mecânicos a fim de melhorar a característica do material, não só quanto à resistência, mas também quanto a aspectos de permeabilidade, compressibilidade e absorção de água.

O controle das características do rejeito disposto deve ser feito por meio de ensaios geotécnicos, análises químicas e mineralógicas, em função dos resultados de mapeamento sistemático das frentes de lavra. Dessa forma, entende-se que o bom desempenho no processo de disposição de rejeitos em pilhas passa pelo melhor entendimento do comportamento mecânico do rejeito, seja através das suas características físicas, químicas e/ou mineralógicas. A necessidade de intensificação dos estudos associados ao comportamento mecânico do rejeito se justifica pela grande variabilidade de litologias nas frentes de lavra, diferentes metodologias de beneficiamento do minério e aos diversos mecanismos de filtragem adotados, bem como às incertezas atreladas ao raso conhecimento desse material quando comparado com solo natural, podendo citar por exemplo a resistência desse material quando submetido a altas tensões e/ou deformações.

Essa necessidade de ampliar o conhecimento do comportamento do rejeitos de minério de ferro produzidos em Minas Gerais, nas minas de Brucutu (São Gonçalo do Rio Abaixo-MG) e Periquito (Itabira-MG), seja através de similaridades ou diferenças, serviu de inspiração para realização desse trabalho.

## 2 ASPECTOS GEOLOGICOS GERAIS

Os complexos mineradores de Itabira e Brucutu estão localizados no quadrilátero ferrífero, na região centro-sul do estado de Minas Gerais no Brasil. Toda essa região é rica em diversidade mineral, com ferro sendo o principal elemento de extração.

O Quadrilátero Ferrífero está localizado no extremo sul do Cráton São Francisco (ALMEIDA, 2002) e possui uma complexa história tectônica e deformacional, envolvendo duas orogenias principais: a Transamazônica (2.000-2.200 milhões de anos) e a Brasileira (650-500 milhões de anos).. Esses dois eventos orogênicos diferentes resultaram na formação de minério de alto teor. As rochas da região estão divididas em três litologias principais: o Complexo Metamórfico, formado por gnaisses, migmatitos e granitóides; o Supergrupo Rio das Velhas, uma sequência metavulcanosedimentar do tipo greenstone belt; e o Supergrupo Minas, formado por rochas metassedimentares clásticas e químicas. A combinação de processos hipogênicos e supergênicos explica a formação de minérios de ferro de alto teor no quadrilátero ferrífero. Nesse processo geológico, minérios de ferro de alto teor substituíram os itabiritos em locais tectonicamente favoráveis, como falhas nas rochas (ROSIÈRE, C. A. et al., 2008).

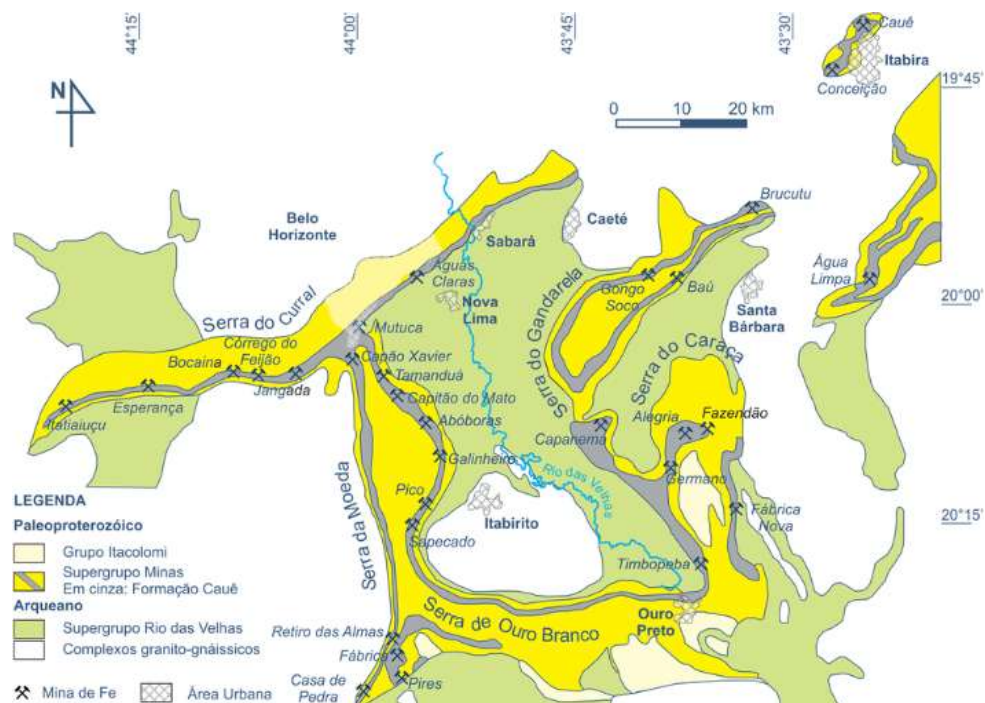


Figura 1 - Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero, com a localização das principais minas e municípios. (baseado em Dorr, 1969)

Os principais litotipos mapeados nas frentes de lavra na mina de Brucutu são os itabiritos friáveis silicosos, anfíbolíticos, manganésíferos, goethíticos e aluminosos, as hematitas friáveis, rocha intrusiva friável, quartzo sericita xisto e zonas de contato de xistos e intrusiva com formação ferrífera.

Especificamente nas formações do Grupo Itabira observa-se a formação de rochas metassedimentares marinhas (DORR, 1969). Estes são constituídos por itabiritos, itabiritos dolomíticos, itabiritos anfíbolíticos e, subordinadamente, filitos, quartzitos e mármore da Formação Cauê. Estas formações são recobertas por mármore dolomítico, filito dolomítico, dolomito ferruginoso, filito e itabiritos da Formação Gandarela (DORR, 1958). Rossi et al. (2019), mostram que neste complexo minerário, figura 2, são identificadas quatro unidades geológicas que compõem o sinclinalório de Itabira: gnaisses de embasamento, sequência vulcanosedimentar do Supergrupo Rio das Velhas, unidades metassedimentares correspondendo ao Supergrupo Minas e corpos granitóides. Todas essas sequências são cortadas por rochas intrusivas. Além disso, existem coberturas sedimentares recentes em toda a região.

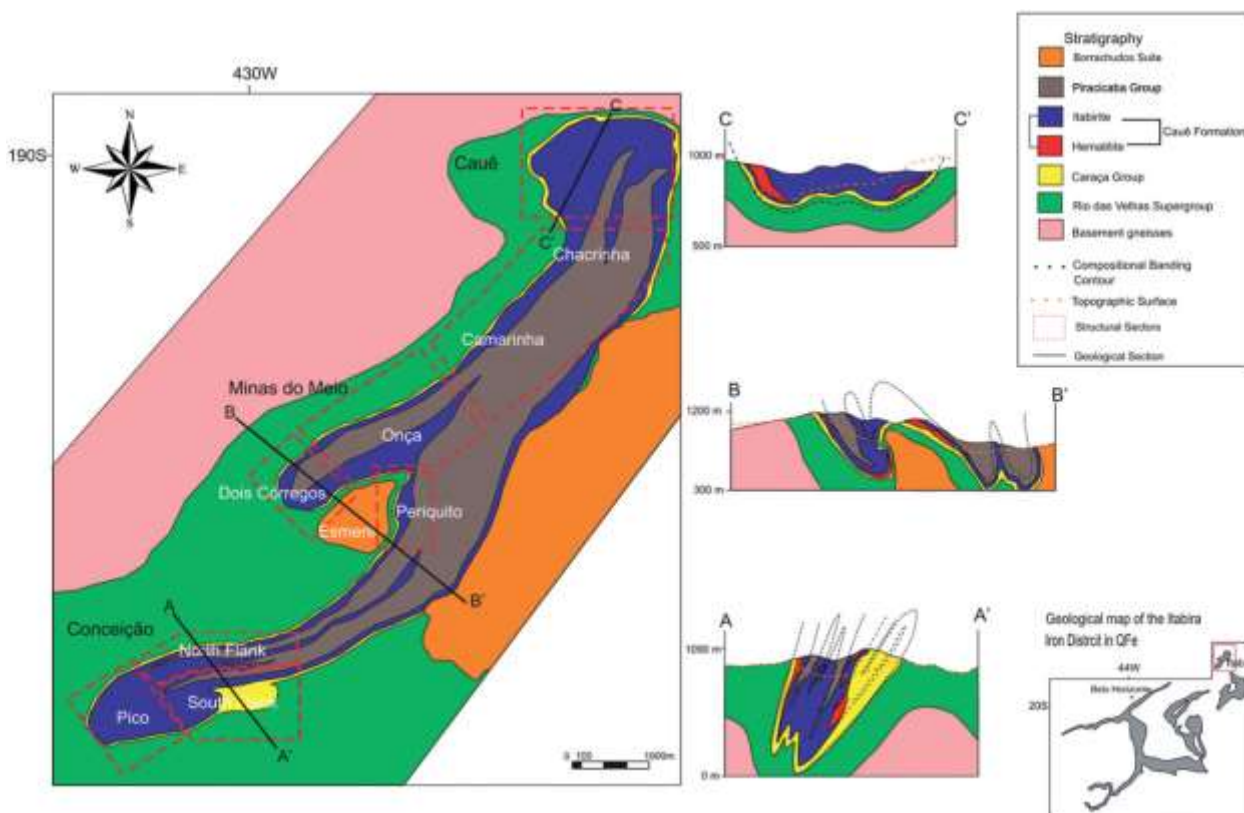


Figura 2 - Mapa geológico do complexo Itabira (Endo et al. 2019)

### 3 BENEFICIAMENTO MINERAL

A extração do minério de ferro tem como objetivo principal fornecer insumo para a indústria siderúrgica. Para ser comercialmente viável esse minério deve apresentar teores e granulometria adequadas para o processo inicial de beneficiamento e posterior de siderurgia. As variações do minério de ferro, seja por teor, mineralogia, granulometria e gênese (hipogênico, supergênico, entre outras), são extremamente importantes na definição do processo de beneficiamento deste minério. De forma geral os depósitos brasileiros são caracterizados como alto teor de ferro e baixo teor de contaminante. As diferenças entre os minérios e dentro do processo de beneficiamento irão também fornecer características distintas aos rejeitos produzidos por este processo.

Após o processo de lavra o minério de ferro passa pelos seguintes processos para geração dos produtos primários:



A classificação dos produtos primários do minério de ferro é baseada em sua granulometria: Granulados ou Lump Ore (6,3 mm a 31,7mm) e Sinter Feed (0,15 mm a 6,3 mm). O material que não está adequado a essas características por possuírem baixo teor de ferro ou estar em granulometria inadequada devem ser estudados para posterior processo de concentração, onde serão incluídas etapas de concentração, filtragem do produto e filtragem ou espigotamento do rejeito.

O complexo minerador de Itabira tem boa parte de sua produção associada a lavras de itabiritos compactos e o de Brucutu-Água Limpa à lavra de itabiritos friáveis, com baixo teor de ferro e consequentemente necessidade de concentração. A figura 3 ilustra de forma simplificada o processo de beneficiamento de Brucutu e Itabira.



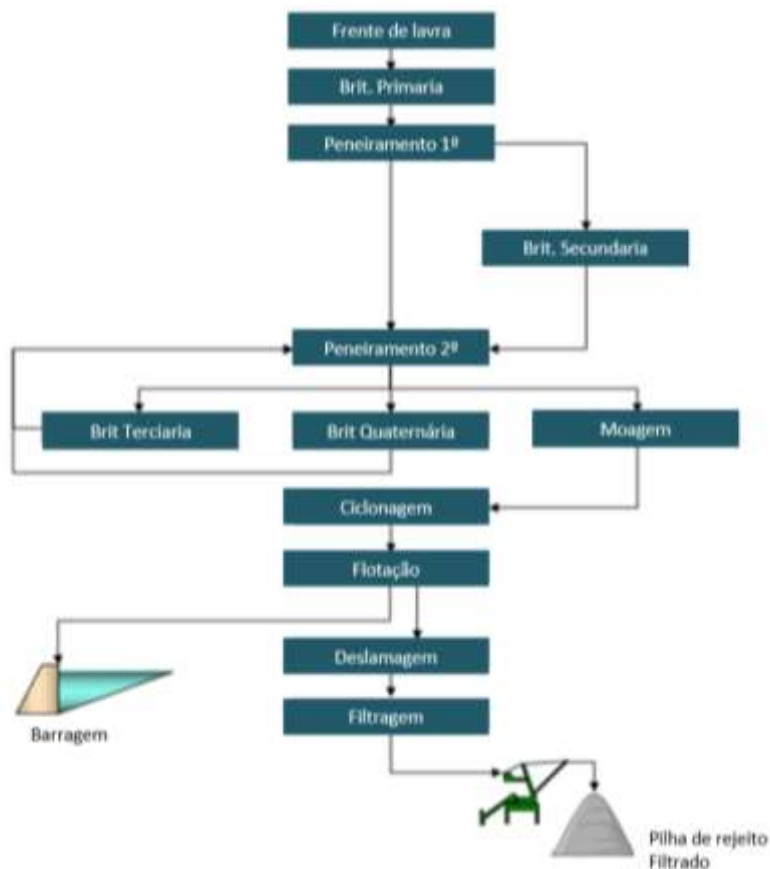


Figura 3 - Fluxograma macro de beneficiamento de Itabira e Brucutu

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No que se refere à distribuição granulométrica (ABNT, 1984e), o rejeito de Brucutu apresenta cerca de 5% de material equivalente ao diâmetro de argila, 34% equivalente a silte, 61% areia. Por sua vez, o rejeito filtrado de Itabira apresenta uma granulometria do material composta de 70% de areias, 27% de siltes e 3% de argilas. As Figuras 4 e 5 apresentam as curvas granulométricas obtidas nos estudos.

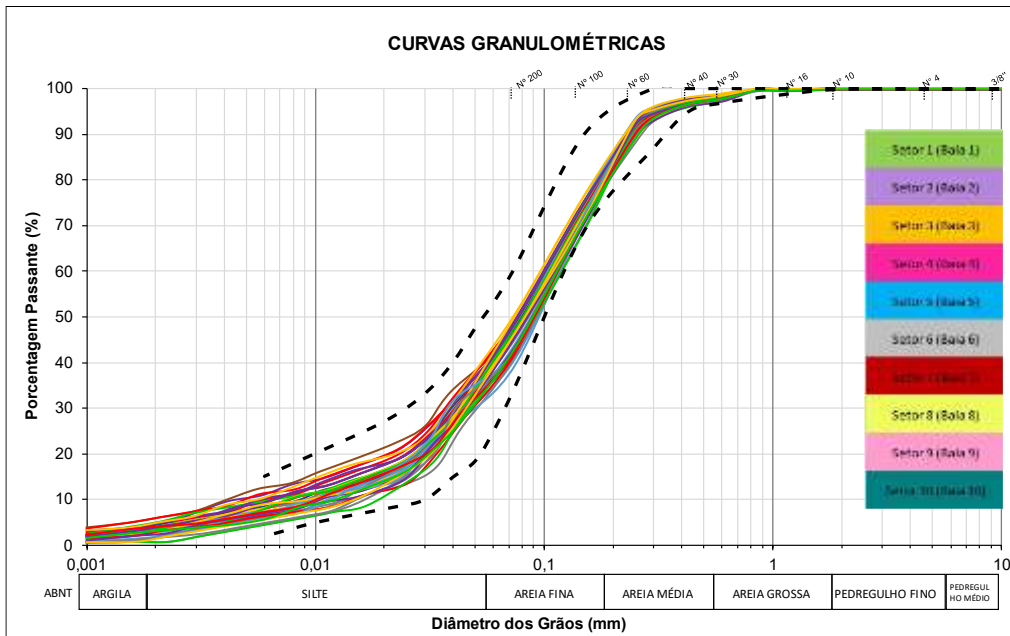


Figura 4 – Curvas granulométricas rejeito total Mina de Brucutu

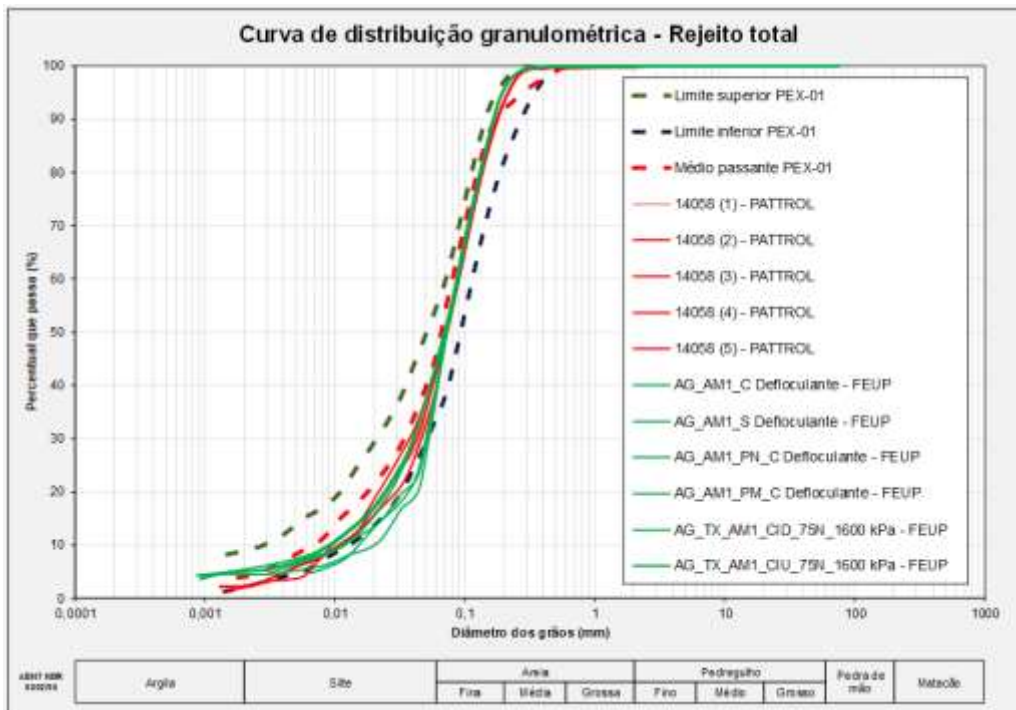


Figura 5 – Curvas granulométricas rejeito total Mina de Itabira

Os valores médios de massa específica real dos grãos de Brucutu aproxima-se de  $3,1 \text{ g/cm}^3$  e não se observa limites de liquidez e plasticidade no rejeito. O material de Itabira também não apresenta limites de liquidez e plasticidade. A média dos resultados da massa específica dos grãos de Itabira foi de  $3,05 \text{ g/cm}^3$ .

Ensaio de compactação foram executados em diversas alíquotas e obtiveram para Brucutu uma variabilidade nas massas específicas aparentes secas máximas entre  $1,82$  e  $2,12 \text{ g/cm}^3$  e em Itabira uma variabilidade entre  $1,867 \text{ g/cm}^3$  a  $2,065 \text{ g/cm}^3$ .

No que tange aos parâmetros ótimos de compactação, nota-se que a umidade ótima de compactação em Brucutu tem valores médios variando de  $11,28\%$  a  $12,45\%$  e em Itabira de  $9,8\%$  a  $13,6\%$ .

As Figuras 6 e 7 apresentam as curvas de compactação.

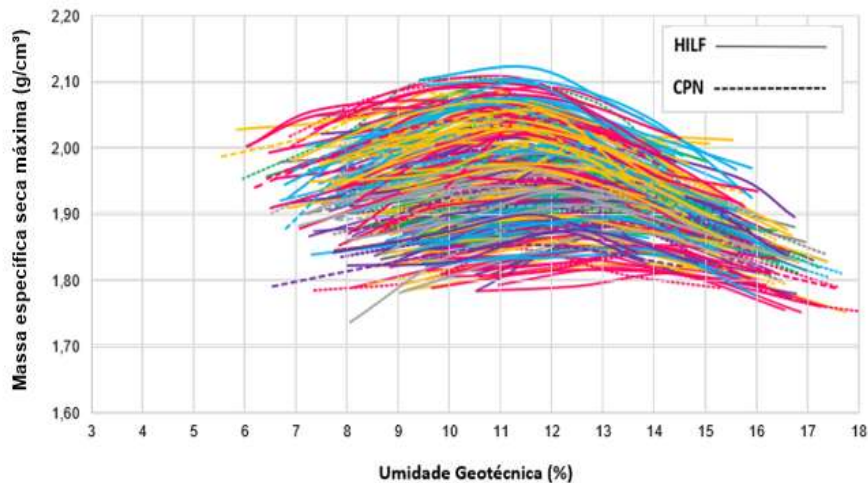


Figura 6 - Curva de compactação rejeito Brucutu

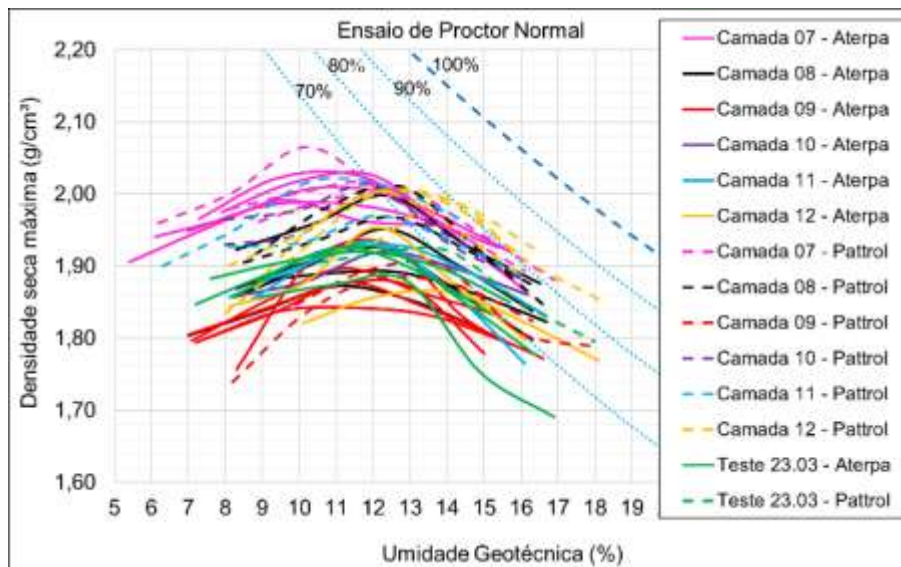


Figura 7 - Curva de compactação rejeito Itabira

#### 4 CONCLUSÕES

Apesar de serem minas pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero, os complexos de Itabira e Brucutu possuem explorações em litologias diferentes, apesar de mesma matriz rochosa, sendo em Brucutu Itabiritos friáveis e em Itabira Itabiritos Compactos. Este maior intemperismo das rochas de Brucutu, levam a processos de britagem e moagem de menor intensidade.

Como resultado, algumas diferenças são encontradas nas caracterizações dos rejeitos dos dois complexos. Os ensaios de granulometria demonstraram uma diferença quanto aos percentuais de areia e materiais finos, silte e argila, que explicam justamente esse processo de produção em litologias com diferentes resistências, ficando o rejeito de Itabira com maior percentual arenoso, aproximadamente 70%, quando comparado ao rejeito de Brucutu, aproximadamente 61%.

Ponto interessante, é que as massas específicas de ambos os rejeitos ficaram muito próximas, com uma variação de apenas 0,05 g/cm<sup>3</sup> quando comparadas as médias, demonstrando assim que ambos os rejeitos são de mesma matriz rochosa e com saída de teores de ferro após os processos de beneficiamento de minério de ferro próximos.

Os ensaios de compactação foram ponto interessante neste estudo pois, apesar de possuírem massas específicas aparentes secas máximas próximas, as umidades ótimas de compactação não seguiram a mesma tendência, sendo os rejeitos de Itabira possuidores de uma maior variação quando comparados aos de Brucutu. Tal fato pode ser explicado pela maior variabilidade na curva granulométrica deste complexo, principalmente na fração argilosa e siltosa, sendo que as características de materiais finos tendem a influenciar significativamente nas características gerais dos rejeitos.

Apesar de processos similares, em grande parte, para o beneficiamento de minério de ferro, as litologias acabam por influenciar algumas diferenças nos ensaios de determinação das características dos rejeitos.

#### 4 REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984e.

BOCCAMINO, G.D. Desenvolvimento de Geometria para Empilhamento de Rejeitos Desaguados de Minério de Ferro: Estudo de Caso para os Rejeitos Gerados na Instalação de Tratamento de Minérios Itabiríticos (ITM-I) em Operação na Mina do Pico. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geotecnia da UFOP – Núcleo de Geotecnia Aplicada, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. p21. 2017.

CAPUTO H. P. Mecânica dos solos e suas aplicações: Mecânica das Rochas – Fundações – Obras de Terra. 6 eds. rev., e at. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 498 p. 1988.

DAVIES, M. P. et al. Dewatered tailings practice—trends and observations. In: proceedings of Tailings and Mine Waste. 2010. 10 p.

DORR, J. V. N. Physiographic stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. In: Professional Paper, Washington, USGS/DNPM, 641 – A, 110p. 1969.

DORR J. V. N. II. 1958. The Gandarela Formation: Soc. Bras. Geol. Bol., v. 7, nº. 2, p. 63-64

MORGENSTERN, N.R., VICK, S.G., VAN ZYL, D. (2015). Report on Mount Polley Tailings Storage Facility Breach. Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel, Canada.

Rossi D. Q., Endo I., Gabriel E. G.. 2019. Structural framework of the iron district of Itabira, Iron Quadrangle, Minas Gerais. Int. Eng. Jour., Ouro Preto, 72(1): 39-45.

Schoenberger, E. Environmentally sustainable mining: The case of tailings storage facilities. Resour. Policy 2016, 49, 119–128.

Williams, D.J. Lessons from Tailings Dam Failures—Where to Go from Here? Minerals 2021, 11, 853.

Almeida L. G., Endo I., Fonseca M. A. 2002. Sistema de nappes na porção meridional do Quadrilátero Ferrífero, MG. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 41, João Pessoa, Anais, p.615.