



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

David Lamberto Diehl Camacho

RECONSTITUIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE  
AMOSTRAS DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

Dissertação no âmbito do Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, orientada pelo Professor Doutor Paulo Coelho e pelo coorientador Professor Doutor Felipe Gobbi. e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Outubro de 2021

Faculdade de Ciências e Tecnologia  
da Universidade de Coimbra

# RECONSTITUIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRAS DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

David Lamberto Diehl Camacho

Dissertação no âmbito do Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, orientada pelo Professor Doutor Paulo Coelho e pelo coorientador Professor Doutor Felipe Gobbi. e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Outubro de 2021

1 2 9 0



UNIVERSIDADE DE  
**COIMBRA**

## AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer o responsável pela Mina de Ferro da Torre de Moncorvo, Aethel Mining, Lda, (anteriormente MTI Ferro Moncorvo SA), e expressar os seus agradecimentos aos Srs. António Frazão a Ar. Carlos Guerra, que organizou a coleta de amostras de rejeitos de minério de ferro no campo, e sem este material a realização deste trabalho seria impossível, obrigado.

Primeiro nunca imaginei que chegaria aqui, ter terminado o curso de engenharia civil já foi além das expectativas, então só porque sim, resolvi me inscrever em um mestrado na Universidade de Coimbra, não tinha o diploma de conclusão da graduação e muito menos passaporte, mas pra que me preocupar, isso jamais aconteceria. Eis que eu já nem andava a pensar muito nisso recebo um e-mail informando que estava aprovado para participar do programa de mestrado de engenharia geotécnica e mecânica dos solos da universidade de Coimbra, e teria que me apresentar cerca de 15 dias da data da mensagem.

Fiquei muito satisfeito e comentei então com a minha esposa Alini, “você nem imagina, eu fui aprovado para ao mestrado em Coimbra, pena que não vou poder ir”.

Naquele exato momento ela sentou em frente ao computador, só me perguntou a data e em alguns minutos me disse, “já comprei a passagem, só tenho dinheiro pra comprar a de ida e é em 10 x, te vira pra voltar pra casa”. Bom aqui estou fui sem saber até onde iria, mas segui o conselho e me virei para me manter e voltar pra casa.

Mas pra isso tive muita ajuda, desde a grande amiga que fiz, Dona Anja, dona da casa onde estive hospedado durante 1 ano e 8 meses, que cuidou de mim como se fosse um filho, a todos os professores que tive a oportunidade de ter aulas, ao Ricardo funcionário da Universidade que jamais vou esquecer pela parceria, José António que tinha que me aturar querendo fazer tudo que não podia. A todos os amigos que fiz enquanto trabalhei na cantina da universidade, trabalho do qual me orgulho muito. Aos meus orientadores Felipe Gobbi Silveira e Paulo Coelho.

Ao Paulo Coelho coitado sem dúvidas foi o que mais sofreu comigo, e sou grato para o resto da minha vida, sei que nunca vou poder retribuir, mas pode contar comigo pra sempre.

Jorge Almeida e Souza, por vários motivos que eu vou guardar no coração, nada disso teria acontecido se não fosse por vocês.

E finalmente a pessoa mais importante da minha vida, que me deu uma missão e não podia decepcioná-la, minha amada esposa Alini Luísa Diehl Camacho, que é de onde tiro a minha força. O que posso dizer, sim me virei e voltei e obrigado por acreditar que eu seria capaz quando nem eu mesmo fazia a mínima ideia que podia. Obrigado!!!



## RESUMO

Os recentes acidentes com barragens de rejeitos e a reativação de inúmeras minas no mundo têm motivado um crescente interesse da comunidade científica e técnica em estudar o comportamento destes materiais utilizando uma perspectiva geotécnica. Além disso, a ambicionada transição para uma economia baseada em energia renovável, que promova o desenvolvimento sustentável, aumentará significativamente o consumo de metais e minerais, os quais terão de ser obtidos por exploração mineira em condições cada vez mais exigentes. Uma das dificuldades da caracterização experimental de materiais geotécnicos é a reprodução em laboratório de amostras reconstituídas, que sejam uniformes e homogêneas, mas mantendo as características fundamentais do material natural. Este problema é agravado no caso de barragens de rejeitos, pois, além da variabilidade entre barragens, devido a origens minerais, processos de produção e tratamento diferentes, existe grande variabilidade do material na barragem consoante a distância do lançamento do rejeito ou a profundidade. Tal ocorre frequentemente por segregação do material, sobretudo em minas de ferro, devido à presença de sílica e ferro moídos de forma muito fina, mas com grandes diferenças na densidade das partículas. Esta limitação, associada ao valor comercial do rejeito, tem limitado a caracterização do comportamento mecânico destes materiais sob ações de carregamento generalizadas, o que afeta a capacidade para avaliar a segurança dos depósitos de rejeitos. Em primeiro lugar, este trabalho avalia a capacidade para reproduzir amostras reconstituídas homogêneas e representativas dos rejeitos de minas de ferro. Assim, para além da descrição detalhada do processo de reconstituição de amostras utilizado e da capacidade para obter amostras de diferentes geometrias para ensaios de caracterização mecânica, são avaliadas as características físicas e de identificação do material reconstituído e é feita a comparação destas com as características que os rejeitos usualmente exibem in situ. Após validação do processo de reconstituição dos rejeitos de uma mina de ferro portuguesa, são realizados diversos ensaios para caracterizar o comportamento mecânico de amostras reconstituídas, com diferentes composições, e de amostras indeformadas recolhidas na mina. Os resultados dos ensaios edométricos e triaxiais realizados, os quais incluem ensaios monotônicos de compressão e extensão, drenados e não drenados, e ainda ensaios cíclicos, permitem estabelecer os aspectos mais relevantes do comportamento mecânico do rejeito.

### **Palavras-chave:**

*Rejeitos, minério de ferro, amostras reconstituídas e indeformadas, características físicas e de identificação, carregamento monotônicos e cíclico, compressão unidimensional.*

## ABSTRACT

The recent accidents with tailings dams and the reactivation of countless mines in the world have motivated a growing interest of the scientific and technical community in studying the behavior of these materials using a geotechnical perspective. Moreover, the desired transition to an economy based on renewable energy, promoting sustainable development, will significantly increase the demand for metals and minerals, which need to be obtained through mining in increasingly challenging conditions. One of the difficulties in the experimental characterization of geotechnical materials is the reproduction in the laboratory of reconstituted samples, which are uniform and homogeneous while maintaining the fundamental characteristics of the natural material. This problem is aggravated in the case of tailings dams because, in addition to the variability between dams, due to different mineral origins, production and treatment processes, there is great variability of the material in the dam depending on the distance of the tailings release or the depth. This often occurs due to segregation of the material, namely in iron ore mines, due to the presence of silica and iron very finely grounded but with large differences in the density of particles. This limitation, together with the commercial value of tailings, has hampered the characterization of the mechanical behaviour of these materials under generalized loading, which affects the ability to assess the safety of tailings dams. Firstly, this work evaluates the capacity to reproduce reconstituted samples that are homogeneous and representative of iron mine tailings. Thus, in addition to the detailed description of the sample reconstitution process used and the ability to obtain samples of different geometries for mechanical characterization tests, the physical and identification characteristics of the reconstituted material are evaluated, and a comparison is made with the characteristics that tailings usually exhibit in situ. After validating the reconstitution procedure for the tailings from a Portuguese iron mine, various tests are carried out to characterize the mechanical behaviour of reconstituted samples, using different compositions, and undisturbed samples collected from the site. The results of the oedometer and triaxial tests carried out, which include triaxial monotonic compression and extension tests, under drained and undrained conditions, as well as cyclic tests, allow the main aspects of the mechanical behaviour of the tailings to be established.

### **Keywords:**

*Tailings, iron ore, reconstituted and undisturbed samples, physical and identification characteristics, unidimensional compression.*

## ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| AGRADECIMENTOS .....  | 1  |
| RESUMO .....  | 3  |
| ABSTRACT .....  | 4  |
| ÍNDICE.....   | 5  |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....   | 7  |
| ÍNDICE DE TABELAS .....   | 10 |
| 1 INTRODUÇÃO .....  | 11 |
| 1.1 Relevância da investigação sobre rejeitos de mineração.....                 | 11 |
| 1.2 Objetivos do estudo .....   | 12 |
| 1.3 Estrutura da dissertação .....  | 13 |
| 2 Estado atual do conhecimento sobre rejeitos .....                             | 15 |
| 2.1 Contextualização histórica da exploração de minério .....                   | 15 |
| 2.2 Produção, beneficiamento e disposição final de minério de ferro.....        | 17 |
| 2.3 Reconstituição de amostras .....  | 19 |
| 2.4 Caracterização geotécnica de resíduos de mineração.....                     | 19 |
| 2.4.1 Composição mineralógica e angularidade das partículas .....               | 20 |
| 2.4.2 Características físicas, de identificação e classificação.....            | 21 |
| 2.4.3 Permeabilidade .....  | 23 |
| 2.4.4 Compressibilidade .....   | 24 |
| 2.4.5 Comportamento tensão-deformação e resistência ao corte .....              | 24 |
| 2.4.6 Métodos de reconstituição de amostras de solos granulares .....           | 29 |
| 2.4.6.1 Pluviação seca.....   | 30 |
| 2.4.6.2 Pluviação úmida .....   | 30 |
| 2.4.6.3 Compactação úmida (moist-tamping) .....                                 | 31 |
| 2.4.7 Métodos de reconstituição de amostras de solos plásticos .....            | 31 |
| 2.4.8 Métodos de reconstituição de amostras de solos por deposição de pasta.... | 32 |
| 2.4.9 Métodos de reconstituição de amostras de resíduos de mineração .....      | 32 |
| 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....  | 34 |
| 3.1 MATERIAIS E MÉTODOS.....  | 34 |
| 3.1.1 Materiais .....   | 34 |
| 3.1.1.1 Rejeito de minério de ferro.....  | 34 |
| 3.1.1.2 Areia .....   | 35 |
| 3.1.2 Métodos .....   | 35 |
| 3.1.2.1 Produção dos blocos .....   | 36 |
| 3.1.2.1.1 Amostras tipo Torre de Moncorvo .....                                 | 36 |
| 3.1.2.2 Amostras tipo Brumadinho.....   | 36 |
| 3.1.2.2.1 Processamento realizado no material areia.....                        | 36 |
| 3.1.2.3 Produção de amostras indeformadas .....                                 | 39 |
| 3.1.2.4 Montagem das amostras para ensaios triaxiais.....                       | 40 |

|   |    |
|---|----|
| 3.1.2.5 Validação do Processo de Reconstituição .....             | 41 |
| 3.1.2.6 Características físicas e de identificação .....          | 42 |
| 3.1.2.7 Comportamento mecânico .....                              | 45 |
| 4 Apresentação e discussão de RESULTADOS .....                    | 47 |
| 4.1 AMOSTRAS MONCORVO, INDEFORMADAS E RECONSTITUIDAS.....         | 47 |
| 4.1.1 Características físicas e de identificação .....            | 47 |
| 4.1.1.1 Composição física e mineralógica.....                     | 47 |
| 4.1.1.2 Índices Físicos .....                                     | 48 |
| 4.1.1.3 Plasticidade.....   | 48 |
| 4.1.1.4 Mineralogia.....  | 49 |
| 4.1.2 Permeabilidade .....  | 49 |
| 4.1.3 Comportamento Mecânico .....                                | 50 |
| 4.1.3.1 Compressão unidimensional.....                            | 50 |
| 4.1.3.2 Comportamento tensão-deformação-resistência ao corte..... | 51 |
| 4.2 AMOSTRAS COM AREIA (RECONSTITUIDAS TIPO BRUMADINHO)...        | 56 |
| 4.2.1 Características físicas e de identificação .....            | 56 |
| 4.2.1.1 Composição física e mineralógica.....                     | 56 |
| 4.2.1.2 Índices Físicos .....                                     | 57 |
| 4.2.1.3 Plasticidade.....   | 57 |
| 4.2.1.4 Mineralogia.....  | 57 |
| 4.2.2 Permeabilidade .....  | 57 |
| 4.2.3 Comportamento Mecânico .....                                | 58 |
| 4.2.3.1 Compressão unidimensional.....                            | 58 |
| 4.2.3.2 Comportamento tensão-deformação-resistência ao corte..... | 59 |
| 5 CONCLUSÃO .....   | 67 |
| 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....                          | 70 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                  | 71 |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Valores médios de rejeito e produto na exploração de minérios mais comuns no Brasil (Abrão, 1987, <i>apud</i> Galvão Sobrinho, 2014). .....  | 11 |
| Figura 2 – a) trabalhadores da mina de Montoro Portugal 1951 (Campos, 2010); b) trabalhadores da serra pelada Brasil 1981; c e d) Equipamentos utilizados na indústria de mineração atualmente.....   | 15 |
| Figura 3 – Evolução de rupturas com consequências severas e muito severas (Camacho et al. 2021). .....  | 16 |
| Figura 4 – Esquema dos principais métodos de construção de barragens de rejeitos (Adaptado de IBRAM, 2016).....   | 17 |
| Figura 5 – Fluxograma simplificado do processo de beneficiamento de minério (Adaptado de Soares, 2010). .....   | 18 |
| Figura 6 – Lançamento dos rejeitos nos locais de deposição final em lagos de decantação (Adaptado de Oliveira, 2020). .....   | 18 |
| Figura 7 – Imagens SEM (scanning electron microscope) de partículas de ferro em pó (Ofoegbu, 2019). .....   | 20 |
| Figura 8 – Curvas granulométricas de 25 amostras superficiais de rejeitos coletadas na praia de rejeitos da barragem Brumadinho (Silva, 2010). .....  | 22 |
| Figura 9- Relação de condutividade Hidráulica com tensão efetiva e quantidade de Silte em materiais granulares, (Adaptado de Bandini et al. 2009).....  | 23 |
| Figura 10 – Relação Tensão/deformação e Tensão/índice de vazios para amostras soltas e densas de areia. (Abreu 2012). .....   | 25 |
| Figura 11- Comportamento de areias densas e soltas sob carregamento monotônico em condições drenadas e não drenadas (Abreu, 2012).....  | 25 |
| Figura 12 - – Resultados típicos alcançados por Castro (1969) com ensaios triaxiais não drenados em solos granulares com diferentes densidades relativas sob a mesma tensão efetiva.27  |    |
| Figura 13 - Comportamento típico de areias saturadas submetidas a ensaios de compressão triaxial não drenado: a) comportamento tensão deformação; b) trajetórias de tensões. (Araújo Santos, 2015). .....                                   | 28 |
| Figura 14- Curvas de tensão-deformação vs trajetórias de tensões de ensaios de compressão triaxial não drenados em amostras de areia: a) amostras fofas; b) amostras com densidade intermediária; c) amostras densas.(Ishihara,1993). ..... | 28 |
| Figura 15 - Conceito de Parâmetro de Estado (Abreu, 2012). .....  | 29 |
| Figura 16- Comparativo entre métodos de preparação de amostras.....   | 31 |
| Figura 17- Resultado de ensaios triaxiais de rejeito de minério de ferro em amostras reconstituídas preparadas por diferentes técnicas (SD) e MT, sendo o MT com diferentes densidades relativas. (Corrêa e Oliveira, 2019). .....          | 33 |
| Figura 18- Resultados de ensaios triaxiais em amostras de areia com índices de vazios semelhantes produzidos com diferentes técnicas de reconstituição.....   | 33 |
| Figura 19 – Mapa de localização da mina de Moncorvo com indicação do local de recolha da amostra de rejeito de minério de ferro (Adaptado de Fevereiro, 2015).....  | 34 |
| Figura 20 - Fluxograma simplificado do programa experimental realizado. ....  | 35 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 21 – Passos do método de reconstituição adotado para preparar amostras de rejeito. a) mistura; b) consolidação; c) preparação de provetes e; d) pontos indicativos de coleta de amostra.....   | 36 |
| Figura 22- Fluxograma das etapas do processamento da areia. ....  | 37 |
| Figura 23- Intervalo de curvas obtidas em ensaios de granulometria da barragem de Brumadinho e curva vermelha é a curva média. ....   | 37 |
| Figura 24- Intervalo de curvas granulométricas obtidas por Silva (2010) em amostras de rejeito de minério de ferro da Barragem Brumadinho MG, Brasil. ....  | 38 |
| Figura 25 - Tabela com valores das curvas e resultado com a curva média, além dos valores em kg da quantidade de cada fração a ser adicionada ao bloco. ....  | 38 |
| Figura 26 - Exemplo de produção de amostras indeformadas para ensaios triaxiais e edométricos. ....   | 39 |
| Figura 27- Falhas apresentadas por amostras indeformadas. ....  | 39 |
| Figura 28 - Esquema representativo das etapas de montagem das amostras triaxiais.....   | 40 |
| Figura 29 – Identificação das dimensões básicas do bloco e dos locais de caracterização da amostra reconstituída.....   | 42 |
| Figura 30 - Curvas granulométricas de amostras retiradas do bloco cilíndrico Torre de Moncorvo. ....  | 42 |
| Figura 31- Aparência do bloco tipo Moncorvo logo após retirada da carga de consolidação...  | 43 |
| Figura 32 - Resultados das curvas granulométricas das amostras retiradas do bloco tipo Brumadinho. ....   | 44 |
| Figura 33 - Comparativo do comportamento entre amostras indeformadas e reconstituídas no ensaio edométrico para amostras moldadas em anel de 50 e 70 mm.....  | 45 |
| Figura 34- Resultados de ensaios triaxiais em amostras reconstituídas de diferentes locais do bloco e uma amostra indeformada.....  | 45 |
| Figura 35 - Comparativo do comportamento entre amostras do topo (A) e da Base (C) do bloco Brumadinho em ensaio edométrico para amostras moldadas em anel de 50 e 70 mm.....  | 46 |
| Figura 36- Resultados de ensaios triaxiais em amostras reconstituídas tipo brumadinho de diferentes locais do bloco (topo A e base C).....  | 46 |
| Figura 37- Resultados de 24 curvas granulométricas de amostras das minas de Moncorvo em Portugal.....   | 47 |
| Figura 38 - Curvas consideradas representativas de 3 diferentes tipos de solo ensaiado nos rejeitos de minério de ferro após rompimento da barragem Brumadinho apresentados em relatório de análises computacionais da ruptura da barragem córrego do feijão em Brumadinho (agosto, 2021). .... | 47 |
| Figura 39 - Relação de massa específica dos grãos e teor de ferro em rejeito de minério de ferro, Ribeiro (2000).....   | 49 |
| Figura 40- Resultados dos ensaios de permeabilidade realizados pós etapa de consolidação dos ensaios triaxiais nas amostras indeformadas e reconstituídas tipo Moncorvo.....  | 49 |
| Figura 41 - Resultados dos ensaios edométricos realizados em amostras Indeformadas (IND.50) e em amostras reconstituídas (MON.50.A e MON.50.C), com as linhas a demonstração das linhas utilizadas para definição dos índices de compressão (Cc) e recompressão (Cr).50                         |    |

|  |    |
|--|----|
| Figura 42 - Representação dos resultados dos ensaios de compressão e extensão triaxial (plano $p'$ , $q$ ) ( $D_u$ ) e $(\sigma_1 / \sigma_3)$ para as amostras indeformadas.....  | 52 |
| Figura 43- Representação dos resultados dos ensaios de compressão e extensão triaxial (plano $p'$ , $q$ ) ( $D_u$ ) e $(\sigma_1 / \sigma_3)$ para as amostras reconstituídas tipo Moncorvo.....                         | 53 |
| Figura 44 - Ensaios de compressão e extensão não drenados em amostras indeformadas com a representação da LEC e LTF.....   | 54 |
| Figura 45- Resultados das determinações da $\Phi'$ LEC e $\Phi$ LTF, de compressão e extensão para amostras reconstituídas tipo Moncorvo.....  | 55 |
| Figura 46 - Resultados ensaios de compressão e extensão em amostras Indeformadas e reconstituídas tipo Moncorvo, plano $p'$ , e.....   | 55 |
| Figura 47- Curvas granulométricas das amostras reconstituídas tipo brumadinho e intervalo das curvas obtidas por Silva (2010) para o material oriunda da barrem córrego do Feijão em Brumadinho.....                     | 56 |
| Figura 48 - Resultados dos ensaios de permeabilidade realizados pós etapa de consolidação dos ensaios triaxiais nas amostras indeformadas tipo brumadinho.....   | 58 |
| Figura 49 – Comparativo entre amostras do topo e base do bloco com areia 50 e 70 mm, com as linhas a demonstração das linhas utilizadas para definição dos índices de compressão ( $C_c$ ) e recompressão ( $C_r$ )..... | 58 |
| Figura 50 - Representação dos resultados dos ensaios de compressão e extensão triaxial (plano $p'$ , $q$ ) ( $D_u$ ) e $(\sigma_1 / \sigma_3)$ para as amostras reconstituídas tipo Brumadinho.....                      | 60 |
| Figura 51- Resultados das determinações da $\Phi'$ LEC e $\Phi$ LTF, de compressão e extensão para amostras reconstituídas tipo Brumadinho.....  | 61 |
| Figura 52 – Comparativo de caminho de tensões $p'$ - $q$ , corte compressão não drenado x corte por compressão não drenado com redução da tensão média, amostra com areia, consolidação 200 kPa.....                     | 62 |
| Figura 53- Resultados dos ensaios de compressão e extensão drenados e não plotados juntos, com destaque para as tensões de 200 kPa.....  | 63 |
| Figura 54- Resumo de ensaios triaxiais de compressão e extensão drenados e não drenados para amostras tipo brumadinho.....   | 63 |
| Figura 55- Tabela com resultados de parâmetros de estado crítico, em trabalho realizado pela Vale nos rejeitos da barragem do córrego do feijão em brumadinho 08/2021.....   | 64 |
| Figura 56- Resultados dos ensaios dinâmicos não drenados amostras reconstituídas tipo Brumadinho.....  | 65 |
| Figura 57- Sequência de fotos ensaio não drenado de extensão amostra tipo Moncorvo.....  | 66 |
| Figura 58- (a) amostra Indeformada em extensão não drenada; (b) amostra tipo Moncorvo em compressão não drenada;(c) amostra tipo brumadinho em compressão não drenada.....   | 66 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Propriedades de rejeitos de minério de ferro em locais diferentes. ....   | 21 |
| Tabela 2 – Valores obtidos em ensaios feitos na barragem de Brumadinho (Silva, 2010). ....   | 23 |
| Tabela 3- Resumo dos ensaios triaxiais realizados. ....  | 41 |
| Tabela 4 - Resultados dos ensaios de teor de umidade, densidade Relativa, limites de liquidez e plasticidade das amostras reconstituídas tipo Moncorvo. ....               | 43 |
| Tabela 5 - Resultados dos ensaios de teor de umidade, densidade Relativa, limites de liquidez e plasticidade das amostras reconstituídas com areia (tipo brumadinho). .... | 44 |
| Tabela 6 - Resultados de índices de compressão (Cc) e índices de recompressão (Cr) das amostras Indeformadas e reconstituídas tipo Moncorvo. ....                          | 50 |
| Tabela 7 - Resumo dos ensaios triaxiais em amostras indeformadas e reconstituídas tipo Moncorvo. ....  | 51 |
| Tabela 8 - Resumo dos resultados de Cc e Cr para amostras tipo brumadinho. ....  | 59 |
| Tabela 9 - Resumo dos ensaios triaxiais em amostras reconstituídas tipo brumadinho. ....   | 59 |
| Tabela 10 – Tabela com parâmetros de estados críticos e transformação de fase para todas as amostras testadas. ....  | 64 |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Relevância da investigação sobre rejeitos de mineração

A mineração tem como finalidade a extração, transformação ou não de substâncias a partir de depósitos ou massas minerais, abrangendo as atividades e processos de prospecção, exploração, beneficiamento e que devem ir até o devido descarte dos resíduos e recuperação das áreas exploradas. São dependentes dela setores que vão da energia à indústria de cosméticos, passando pela indústria de transportes e novas tecnologias. Ou seja, a civilização atual, nos moldes que conhecemos, não existiria sem a mineração, o seu desenvolvimento futuro será muito condicionado pela capacidade de extrair recursos minerais de forma sustentável.

A indústria da mineração produz todo ano um volume enorme de matéria-prima e, conseqüentemente, uma quantidade quase sempre maior de material rejeitado. A Figura 1 demonstra bilhões de toneladas de rejeitos sendo depositados anualmente em barragens sob a forma de pasta em todo o mundo. A forma mais empregada na sua disposição é através de barramentos de contenção, servindo em alguns casos também como reservatório de água. Infelizmente, a desejada transição para uma energia baseada em energias renováveis aumentará fortemente a procura por metais e minerais. Além disso, como os depósitos mais ricos já foram explorados, estima-se que a quantidade de rejeitos de mineração no mundo e os riscos associados continuem a crescer de forma cada vez mais acentuada.

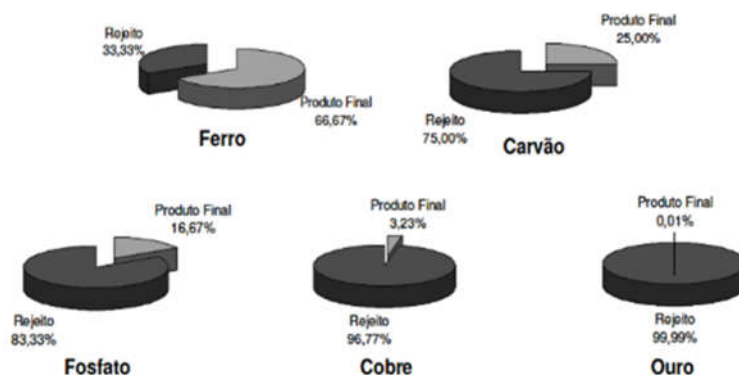


Figura 1 – Valores médios de rejeito e produto na exploração de minérios mais comuns no Brasil (Abrão, 1987, *apud* Galvão Sobrinho, 2014).

Os riscos associados às barragens de contenção de rejeitos têm sido cada vez mais significativos, acidentes com ruptura tendo no passado como consequência a destruição de cidades inteiras, geração de impactos ambientais irreversíveis e muitas vezes perda de vidas humanas. Tais rupturas são usualmente devidas à ocorrência de liquefação (Soares, 2010), ou seja, induzidas por carregamentos, monotônicos (Liu & Henderson, 2020) ou cíclicos (Verdugo et al. 2012), capazes de gerar excessos significativos de pressão neutra, como observado frequentemente em materiais granulares saturados em determinadas situações particulares.

Para compatibilizar as necessidades da sociedade com a redução do impacto ambiental e a garantia da segurança da vida de pessoas e bens, é preciso um dimensionamento seguro, económico e sustentável. Tal combinação somente é possível se existir um conhecimento detalhado das características dos materiais utilizados na construção destas barragens, nomeadamente quando desenvolvido numa perspetiva geotécnica que tem sido até ao presente frequentemente ignorada. Estas características são obtidas através de ensaios geotécnicos de campo ou laboratório, sobre amostras intactas e/ou reconstituídas. Estas últimas são as que em geral permitem uma maior evolução do conhecimento do comportamento dos materiais através de análises paramétricas, pois, quando produzidas com sucesso, permitem comparar resultados de ensaios realizados sobre amostras idênticas e evitar os problemas que resultam da variabilidade natural mais ou menos significativa de amostras indeformadas.

Este trabalho pretende avaliar o comportamento sob ações generalizadas de rejeitos de mineração, mais especificamente de minério de ferro, utilizando amostras indeformadas e reconstituídas com diferentes composições. Dada a importância e vantagens das amostras reconstituídas, o trabalho avalia a capacidade para reproduzir amostras reconstituídas homogêneas que sejam representativas dos rejeitos da exploração de minério de ferro. Assim, além da descrição detalhada do processo de reconstituição de amostras utilizado e da capacidade para obter amostras de diferentes geometrias para ensaios de caracterização mecânica, foram avaliadas as características físicas e de identificação do material reconstituído, comparando com as que os rejeitos de origem semelhante usualmente exibem *in situ*. Na sequência da validação do processo de reconstituição proposto, o comportamento mecânico destes rejeitos é avaliado sob diferentes condições de consolidação e sollicitação, de modo a criar uma base sólida para a compreensão do comportamento destes materiais e sua modelação. Espera-se que o estudo contribua para que, no futuro, seja possível avaliar de forma mais consistente a segurança dos atuais e novos depósitos de rejeitos de mineração e, por outro lado, assegurar a eventual escavação em segurança de depósitos antigos que permitam ter acesso a rejeitos antigos para reprocessamento e/ou para a utilização destes materiais em aplicações inovadoras que suportem o intuito cada vez mais ambicionado da chamada economia circular.

Ainda que o trabalho considere apenas rejeitos de minério de ferro, as conclusões aqui obtidas podem contribuir para o conhecimento mais genérico sobre estes tipos de materiais que não têm sido tradicionalmente estudados numa base geotécnica sólida.

## 1.2 Objetivos do estudo

O principal objetivo da pesquisa consistiu no estabelecimento e validação de um processo de reconstituição adequado à preparação de amostras de rejeito de minério de ferro a fim de desenvolver uma caracterização detalhada destes materiais através de ensaios utilizados na caracterização física e mecânica de materiais geotécnicos convencionais, e assim prevenir acidentes como o da Barragem do Brumadinho, por muitos considerado como o maior desastre humano e ambiental no Brasil (Rotta et al., 2020).

A fim de atingir o objetivo geral acima estabelecido, foram definidos os seguintes objetivos parciais:

- desenvolvimento de uma revisão bibliográfica que identificasse os aspectos fundamentais do estado físico e do comportamento de rejeitos de minério in situ, assim como do processo de produção e deposição destes materiais nas minas, nomeadamente mas não só de ferro, para além de estabelecer o estado da arte relativo a aspetos relevantes relacionados com a reconstituição e a caracterização mecânica de materiais geotécnicos convencionais;

- seleção e recolha do material a utilizado neste estudo: o rejeitado do minério de ferro das antigas minas de Torre de Moncorvo;

- estabelecimento de um processo de reconstituição de amostras representativas do comportamento in situ do rejeito do minério de ferro selecionado e sua validação, através de ensaios físicos, de identificação e mecânicos, comparados entre si e com o comportamento de amostras indeformadas recolhidos no local, a fim de garantir os requisitos fundamentais de uma amostras reconstituídas sem alterar as características essenciais do material no seu estado natural;

- avaliação do comportamento mecânico sob ações generalizadas do rejeitado do minério de ferro das antigas minas de Torre de Moncorvo, através de ensaios edométricos e triaxiais, incluindo ensaios drenados e não drenados, de compressão e extensão, sob diferentes tensões de consolidação, procurando interpretá-lo à luz dos modelos de comportamento usualmente utilizados para descrever e modelar o comportamento de materiais geotécnicos convencionais;

- identificação das alterações do comportamento das amostras reconstituídas do rejeito de minério de ferro selecionado quando a proporção de materiais arenosos aumenta e a composição granulométrica se aproxima mais da composição granulométrica média existente na Barragem do Brumadinho, assim como desenvolver um estudo preliminar do comportamento destes materiais quando sujeitos a carregamentos cíclicos em condições não drenados, de modo a compreender a resposta destes materiais quando sujeitos às ações cíclicas induzidas por sismos, as quais têm causado acidentes no passado.

Face aos objetivos do trabalho, a metodologia adotada foi essencialmente de carácter experimental, tendo os ensaios sido realizados na sua totalidade pelo autor no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

A presente dissertação desenvolve-se em cinco capítulos.

No presente capítulo, é justificado o interesse atual do tema selecionado e são descritos os objetivos fundamentais do trabalho de investigação realizado assim como uma descrição geral da forma como estes são atingidos.

No capítulo 2, é apresentado o estado atual do conhecimento sobre rejeitos de minério de ferro, dando particular destaque ao modo de produção destes materiais antes e após a sua deposição, assim como às suas características mais comuns in situ, focando ainda os aspectos de carácter mais geotécnico relacionados com os processos de reconstituição apresentados na

bibliografia para este e para outros materiais geotécnicos convencionais, como areias e argilas, assim como descrevendo os aspectos de comportamento mecânico mais relevantes destes materiais, numa perspetiva de caracterização e modelação geotécnica.

O capítulo 3 descreve os materiais utilizados no desenvolvimento do trabalho experimental, como o rejeito de minério de ferro selecionado para o trabalho de investigação e que foi recolhido na antiga mina de Torre de Moncorvo, sob a forma de amostras deformadas e indeformadas, assim como a areia utilizada na produção das amostras reconstituídas do tipo “Barragem do Brumadinho”. É ainda descrito em detalhes o método de reconstituição do rejeito de minério de ferro, com duas composições distintas, assim como o processo de validação do método de reconstituição proposto, por avaliação de uniformidade e homogeneidade das amostras, por comparação do estado físico e de identificação e ainda do comportamento mecânico de amostras obtidas de diferentes locais do bloco de grandes dimensões, com particular destaque para a avaliação da existência de segregação de partículas durante o processo de reconstituição. O comportamento das amostras reconstituídas é ainda comparado com o das amostras indeformadas para verificar se as amostras reconstituídas mantêm os aspectos fundamentais de comportamento real do material.

O capítulo 4 descreve e analisa de forma crítica os resultados experimentais que permitem estabelecer o comportamento dos materiais numa base geotécnica, utilizando os diversos tipos de ensaios realizados ao longo deste trabalho e agrupados em função dos diferentes tipos de amostras ensaiadas: reconstituídas do tipo “Torre de Moncorvo”, reconstituídas do tipo “Barragem do Brumadinho” e indeformadas (“Torre de Moncorvo”). Os efeitos da tensão de consolidação e das trajetórias de tensão utilizadas no corte, assim como da composição do rejeito e do processo de reconstituição, são analisados em detalhe.

O capítulo 5 resume as principais conclusões deste trabalho, quer do ponto de vista teórico quer do ponto de vista das suas implicações práticas mais evidentes, assim como estabelece linhas de investigação futuras que, tendo por base os resultados deste trabalho de investigação, apresentam maior relevância para o avanço do conhecimento nesta área.



## 2 ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO SOBRE REJEITOS

### 2.1 Contextualização histórica da exploração de minério

Antes da revolução industrial, a quantidade de rejeitos gerados pela atividade de mineração era quase desprezível. O desenvolvimento tecnológico e um maior uso de matérias-primas deu aos recursos minerais maior interesse econômico, pelo que o setor se desenvolveu tendo por base um aumento de produtividade e produção, em que os seus resíduos, que antes eram dispostos com pouco critério em termos de engenharia, passou a necessitar de cada vez mais atenção. A indústria mineral se viu assim obrigada a desenvolver alternativas de construção de estruturas para contenção dos rejeitos, cujo desenvolvimento ao longo do tempo se deu de forma empírica, até porque, no início, estas barragens, diques ou mesmo pilhas eram estruturas com pouco volume de material, que em caso de ruptura causariam danos mínimos sem impacto significativo. De fato, como se tratava de “resíduo sólido”, a real aplicação de técnicas de engenharia de barragens, não era considerada necessária (IBRAM, 2016; CBDB, 2011). Na Figura 2 fica fácil observar as diferenças nas técnicas de trabalho, muito mais dependentes de trabalhadores manuais no passado e os equipamentos utilizados atualmente com maior capacidade produtiva.



Figura 2 – a) trabalhadores da mina de Montoro Portugal 1951 (Campos, 2010); b) trabalhadores da serra pelada Brasil 1981; c e d) Equipamentos utilizados na indústria de mineração atualmente.

O número de explorações mineiras continua crescendo e atraindo cada vez mais empresas, mas o aumento do volume de minério explorado, por si só não deveria justificar o aparente aumento do número de rupturas. Acidentes sérios em barragens de rejeito têm afetado muitas regiões do mundo, a uma média superior a 2 por ano. Segundo estudo de 18.401

barragens em todo o mundo, realizado pela Internacional Commission on Large Dams (ICOLD) em 2001 a taxa de acidentes em barragens de rejeitos chegou a 1,2 % em cem anos enquanto a mesma taxa em barragens convencionais de água era de 0,01%. As consequências destas rupturas podem ser muito graves, causando grande número de mortos, enormes desastres ambientais e impactos socioeconômicos de grande envergadura. A World Mine Tailings Failures (WMTF), sugere que o número de acidentes com consequências severas ou muito severas poderá atingir um valor próximo de 20 durante a próxima década (Figura 3).

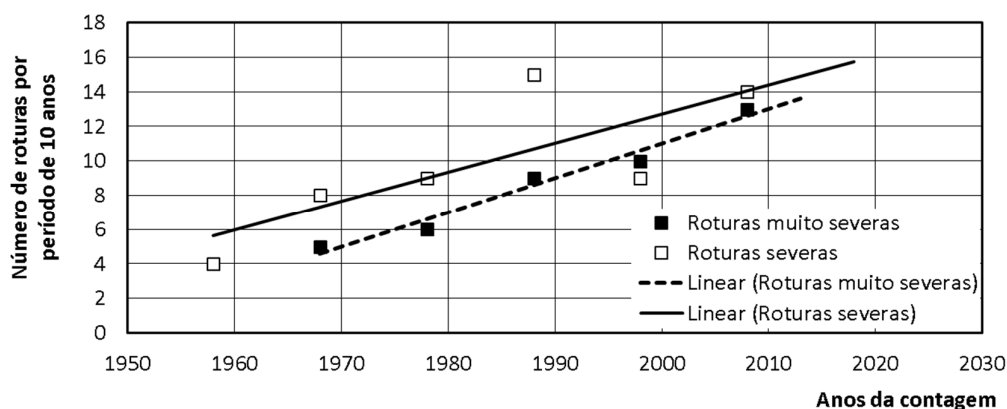


Figura 3 – Evolução de rupturas com consequências severas e muito severas (Camacho et al. 2021).

Apesar das características físicas, como distribuição granulométrica e teor de umidade, não estarem necessariamente relacionadas com a composição mineral, como é observado em solos naturalmente intemperizados por IBRAM (2016), as falhas em barragens de contenção de rejeitos são em geral causadas por fenômenos de mesma origem que os observados em solos produzidos de forma natural (Russo, 2007).

Barragens de contenção de rejeitos são um tipo específico de barragem de terra, podendo até ser construídas em uma única etapa, com empréstimos de solo, zoneamento interno incluindo núcleo impermeável, filtros, muito semelhante ao que é feito em barragens de terra convencionais, sendo o rejeito lançado somente quando a barragem atinge sua cota final (Bjelkevick, 2005).

O mais usual é serem construídas por alteamentos sucessivos ao longo do tempo, conforme o rejeito atinge o limite do alteamento anterior e um novo alteamento é feito. Desta forma o rejeito vai sendo lançado e a barragem é alteada de acordo com a necessidade, o que do ponto de vista econômico é mais interessante já que vai diluindo o custo da obra durante todo o período de operação da mina (Vick, 1983; Russo, 2007).

Existem três principais métodos de construção ou alteamento das barragens de rejeitos, utilizando preferencialmente como matéria-prima materiais do próprio processo de mineração, bota-fora, estéreis e o próprio rejeito.

As denominações dos métodos construtivos vêm em função da forma como o eixo da barragem se desloca em cada alteamento partindo de um dique inicial. A Figura 4 apresenta um esquema ilustrativo dos 3 métodos mais comuns.

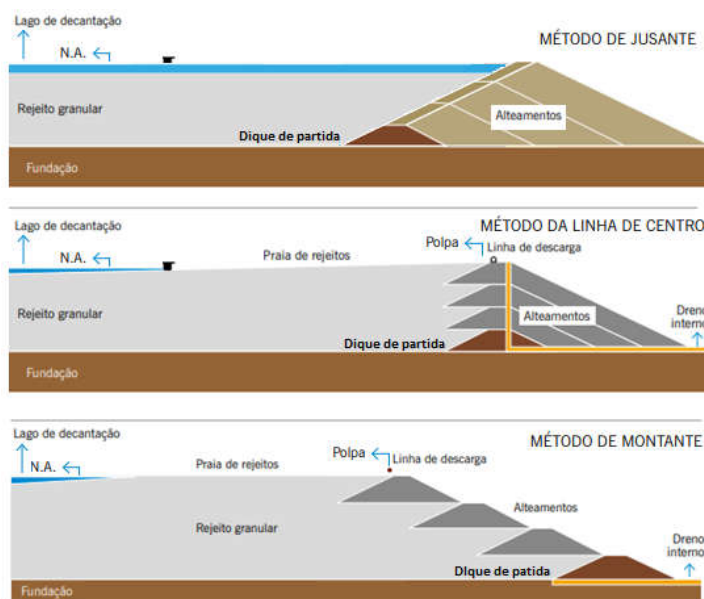


Figura 4 – Esquema dos principais métodos de construção de barragens de rejeitos (Adaptado de IBRAM, 2016).

## 2.2 Produção, beneficiamento e disposição final de minério de ferro

O tipo de beneficiamento ou tratamento pode mudar dependendo das características do minério lavrado, sendo a grande dificuldade inicial encontrar o tamanho de partículas que permita a separação dos componentes da rocha. Após esta definição, o minério é submetido a processos de fragmentação e separação até atingir a granulometria ideal para se separar das impurezas. Para isto, o primeiro passo após a extração da lavra é a etapa de fragmentação ou cominuição, onde o minério é britado e moído, para redução do tamanho de partículas. A britagem e a moagem são as operações com maior consumo de energia e insumos como bolas, revestimentos, aditivos de moagem etc. O próximo passo é a separação, que pode ser feita por peneiramento e/ou ciclonagem, com objetivo de controlar as operações de fragmentação garantindo que os grãos tenham o tamanho adequado para o processo seguinte, neste caso a concentração, onde efetivamente são separados, o que é considerado valioso, chamado de concentrado, e o descartável, chamado de rejeito. Todos os processos de beneficiamento são feitos preferencialmente com o material em forma de polpa, mistura do minério moído e água. Após a etapa de concentração o rejeito é colocado em decantadores, com os quais se visa aumentar o percentual de sólidos dos rejeitos e reaproveitar a água em excesso para processos anteriores, sendo esta etapa chamada de espessamento. (Vick, 1983; Soares, 2010; Valer, 2020). Após o espessamento, os rejeitos são transportados aos locais de disposição final, com uma redução do seu teor de água comparado ao que possuía na etapa anterior, mas ainda com uma concentração de sólidos que pode variar entre 15 e 55%, transportada na forma de polpa por tubulações, denominadas rejeitodutos, seja por gravidade ou utilizando um sistema de bombeamento (Soares, 2010). As etapas básicas do beneficiamento estão descritas na Figura 5.

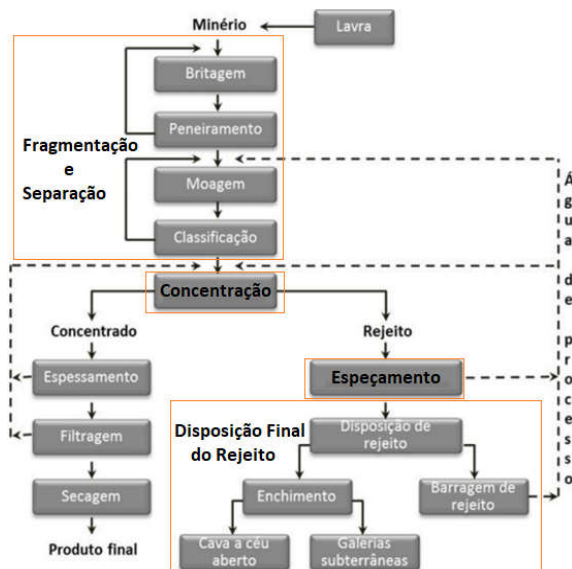


Figura 5 – Fluxograma simplificado do processo de beneficiamento de minério (Adaptado de Soares, 2010).

O lançamento dos rejeitos nos locais de deposição final é feito a montante do lago de decantação, ao longo do perímetro da barragem, fomentando a formação de praias de rejeitos. A Figura 6 apresenta algumas imagens do lançamento em diferentes condições.



Figura 6 – Lançamento dos rejeitos nos locais de deposição final em lagos de decantação (Adaptado de Oliveira, 2020).

Se o lançamento for feito de forma aleatória e sem controle específico pode apresentar sérias implicações em função da segregação hidráulica. De facto, a ação segregadora pode gerar uma grande variabilidade estrutural no aterro, criando disparidades em parâmetros de resistência, deformabilidade e permeabilidade, o que dificulta a obtenção de parâmetros adequados para cálculos e avaliações de comportamento e estabilidade (Morgenstern & Küpper, 1998; Moretti & Cruz, 1996; Ribeiro, 2000; Soares, 2010).

No caso dos rejeitos do minério de ferro existe um fator adicional capaz de agravar essa separação hidráulica de grãos por tamanho, uma vez que os rejeitos de minério de ferro são compostos por hematita, com densidades da ordem de  $5,25 \text{ g/cm}^3$ , e quartzo, com densidades entre  $2,65$  e  $2,70 \text{ g/cm}^3$ . Assim, a lógica de segregação muitas vezes se altera, ou seja, pode acontecer que próximo ao ponto de lançamento acabam sedimentando partículas mais finas com alto teor de ferro, enquanto partículas de quartzo com maiores diâmetros, mas ainda assim mais leves acabam sendo depositadas mais distantes do ponto de lançamento (Espósito, 2000). Estes fenômenos acabam produzindo depósitos muito heterogêneos, completamente estratificados,

cheios de camadas, com variações de espessura e granulometria, o que aumenta de forma significativa a dificuldade de obter amostras representativas e de caracterizar e modelar o comportamento dos materiais, o que potencializa o risco de ocorrência de rotura das barragens de rejeitos.

### **2.3 Reconstituição de amostras**

Programas experimentais baseados em ensaios de amostras reconstituídas são muito dependentes da capacidade das técnicas de preparação das amostras tenha o maior grau possível de repetibilidade do modelo, para que seus dados possam ser comparados, entre eles e em relação ao estado natural do solo. As amostras reconstituídas devem, pelo menos ser uniformes e homogêneas, produzidas utilizando métodos que garantam boa repetibilidade e reprodutibilidade. Além disso, a composição amostral e os procedimentos de reconstituição devem replicar o mais próximo possível quaisquer processos deposicionais e pós-deposicionais que afetem os materiais no campo, de modo que as amostras reconstituídas tenham propriedades físicas e um comportamento mecânico comparável aos apresentados *in situ*.

Os rejeitos de minério nem sempre foram tratados como material geotécnico e, como resultado, raramente são caracterizados em detalhes sob condições generalizadas de carregamento e utilizando princípios adequados de engenharia geotécnica. O fato de rejeito de minério de ferro ser um resíduo da indústria de mineração, e ser depositado em grandes volumes, sejam pilhas ou barragens, sem grandes controles de engenharia resulta em um material muito heterogêneo. Essa heterogeneidade causa um problema básico que precisa ser resolvido para avaliar o seu comportamento, ou seja, as amostras de rejeitos "não perturbadas" são geralmente muito heterogêneas, caras e difíceis de coletar, amostras reconstituídas podem fornecer uma solução razoável para este problema. No entanto, o processo de reconstituição deve garantir que as amostras resultantes sejam uniformes e homogêneas, ao mesmo tempo em que representam qualitativamente as propriedades físicas, e o comportamento mecânico de amostras "não perturbadas".

Em termos de reconstituição o rejeito tem certa vantagem em relação a depósitos naturais, já que são depósitos que podem ser considerados recentes geologicamente, efeitos que são impossíveis de reproduzir acabam neste caso tendo menor importância. Por se tratar de materiais granulares existe uma forte tendência a se utilizar métodos de reconstituição de amostras com as mesmas técnicas que são feitas as amostras de solos naturais granulares.

### **2.4 Caracterização geotécnica de resíduos de mineração**

As barragens de rejeitos são estruturas construídas com através de levantamentos de camadas sobrepostas ao longo do tempo, o comportamento mecânico, a operacionalidade e segurança da barragem dependem de vários fatores relativos às camadas construídas, incluindo o método de deposição, processo de sedimentação e taxa de consolidação, propriedades das partículas, densidade, nível de tensão e histórico de tensão, etc. Essas estruturas, a que no

passado não se atribuía grande importância, cada vez mais vêm causando impactos adversos, o que tem levado a que sejam cada vez mais estudadas do ponto de vista geotécnico. As características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas dos rejeitos de minério variam dependendo do minério que está sendo lavrado, mudanças no processo de fragmentação, percentual de ferro extraído e até mesmo mudanças em pontos de descarga, podem gerar alterações significativas em seus índices físicos, como, peso específico, granulometria, plasticidade, índice de vazios, e comportamento mecânico como compressibilidade, resistência ao corte e comportamento tensão-deformação. Apesar da inevitável variabilidade e complexidade do material, os quais são ainda mais acentuados devido aos processos industriais envolvidos na produção, beneficiamento e disposição final do rejeito de minério, tal como descrito na secção anterior, os ensaios de laboratório são de extrema importância para a caracterização e entendimento do seu comportamento (Bedin, 2010).

#### 2.4.1 Composição mineralógica e angularidade das partículas

O rejeito de minério de ferro tem como fontes primárias principais a Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), Goethita /Limonita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), Siderita ( $\text{FeCO}_3$ ), Pirita ( $\text{FeS}_2$ ), estando o ferro (Fe) presente em mais de 300 minerais. Deste modo, as partículas do rejeito de minério de ferro apresentam densidades da ordem de  $5,25 \text{ g/cm}^3$ , para a hematite, e entre  $2,65$  a  $2,70 \text{ g/cm}^3$ , para o quartzo. De notar que as partículas possuem faixas granulométricas que podem variar de areia fina a argilas, exibindo em geral as partículas mais finas a maior concentração de ferro, e por isso densidades mais elevadas, enquanto as partículas de quartzo tendem a apresentar maiores diâmetros (Espósito, 2000). Devido ao seu processo industrial de formação, os rejeitos de minério de ferro apresentam preferencialmente partículas com formas muito angulares (Figura 7), as quais podem influenciar o comportamento mecânico do material em relação a outros solos granulares com partículas mais arredondadas, nomeadamente solos sedimentares transportados por via fluvial, marítima ou mesmo eólica.

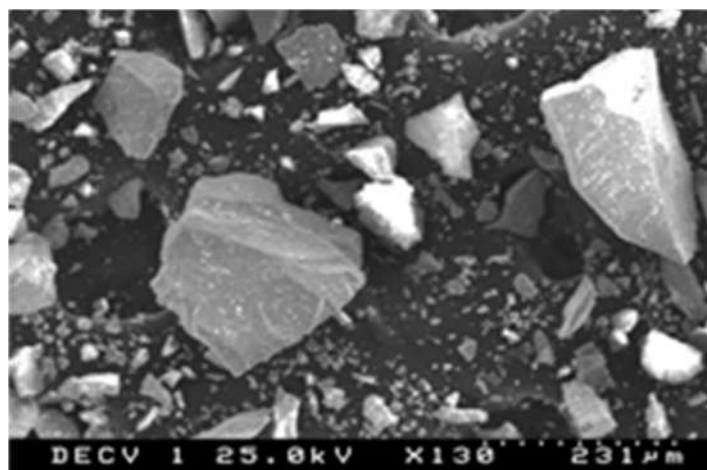


Figura 7 – Imagens SEM (scanning electron microscope) de partículas de ferro em pó (Ofogbu, 2019).

### 2.4.2 Características físicas, de identificação e classificação

A Tabela 1 apresenta alguns dados compilados das propriedades físicas e de identificação de rejeitos de minério de ferro de barragens em dois locais diferentes: Córrego do Feijão (Barragem 1), no Brasil, e Yuhezai (rejeitos finos de ferro), em Yunnan, China. Desde logo, é importante realçar que apesar de os rejeitos considerados terem origens tão distintas em termos geológicos e geográficos, existe alguma uniformidade na maioria das suas propriedades, o que reflete em parte o processo industrial utilizado na exploração dos minérios.

Tabela 1 – Propriedades de rejeitos de minério de ferro em locais diferentes.

| Propriedades  | Rejeitos de minério de ferro da Barragem I do Córrego do Feijão (Silva, 2010) | Rejeitos de minério de ferro da mina de Yuhezai (Hu et al., 2017) |
|---------------|---|---|
| $e_0$         | 0.30 ~ 1.07*  | -   |
| w0 (%)        | 16 ~ 20   | 43 ~ 54   |
| wP (%)        | 14 ~ 24   | 0 ~ 19  |
| wL (%)        | 18 ~ 33   | 0 ~ 28  |
| PI (%)        | 4 ~ 10  | 0 ~ 9   |
| $G_s$ ()      | 4.02 ~ 5.11   | 3.08 ~ 3.23   |
| $D_{10}$ (mm) | -   | 0.005 ~ 0,051   |
| $D_{50}$ (mm) | -   | 0.030 ~ 0.120   |
| $C_u$         | -   | 3.11 ~ 8.82   |

Do ponto de vista geotécnico, os rejeitos de minério de ferro mostrados na tabela podem ser descritos como um material não plástico a material de baixa plasticidade, com limites de consistência muitas vezes de difícil avaliação experimental. De notar que a plasticidade resulta sobretudo da presença de partículas de dimensão reduzida, não sendo em geral detetadas partículas com classificação mineralógica de argila nem matéria orgânica, as quais aumentariam a plasticidade do material. Os rejeitos de minério exibem, por outro lado, uma distribuição granulométrica que varia do algo uniforme a relativamente bem graduado. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação do Solo (ASTM, 2011), os rejeitados são classificados em geral como areia siltosa a silte (SM), embora possam ser classificados em alguns casos de rejeitos mais finos, como argila magra arenosa (CL), como no caso de Yuhezai (Tabela 1).

Também é possível observar na Tabela 1 a grande heterogeneidade presente em relação ao índice de vazios, o que reflete a importância do processo deposicional e dos eventuais acréscimos de tensão aplicados pelas camadas subjacentes ao longo do processo de construção da barragem. Podemos observar que em função do método de deposição, que as barragens de rejeito exibam heterogeneidade espacial marcada, quer na direção vertical quer em planos horizontais. Outra característica singular das barragens de rejeitos de minério de ferro são os elevados valores da densidade de partículas sólidas ( $G_s$ ), o que é uma consequência direta do fato dos rejeitos de minério de ferro conterem de 10 a 50 % de ferro em sua composição, cuja densidade ( $G_s$  em torno de 7,9) é muito superior ao encontrado nas partículas comuns do solo ( $G_s$  em torno de 2,65). Como é de se esperar, a densidade das partículas de

rejeito de minério de ferro, tendem a atingir valores significativamente acima de 3, e em alguns casos podendo chegar a valores ligeiramente acima de 5, dependendo da quantidade de minério presente no rejeito (Henriques, 2012; Bedin, 2010). A distribuição típica do tamanho de partículas para rejeitos de minérios de ferro é mostrada na Figura 8, apresentando as curvas granulométricas relativas às 25 amostras coletadas em diversos pontos da praia de rejeito da Barragem de Brumadinho da Mina de Córrego do Feijão. Segundo Silva 2010, apresentam distribuições granulométricas contendo cerca de 4% de argila, 28% de silte, 56% de areia fina, 8% de areia média, 3% de areia grossa e 1% de pedregulho.

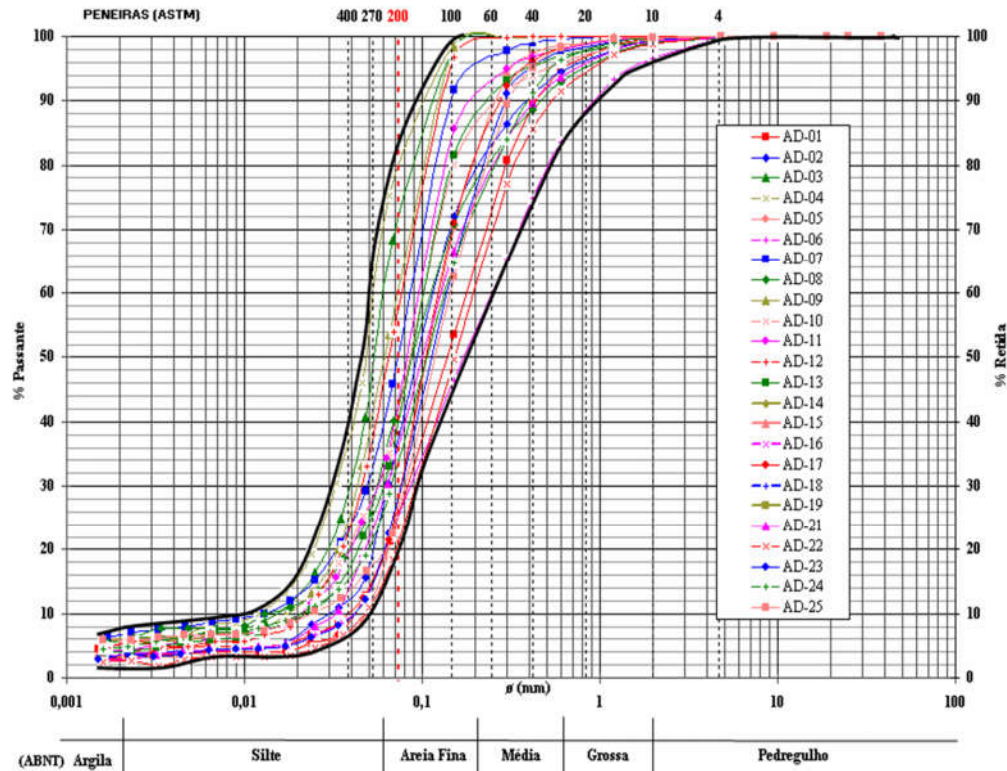


Figura 8 – Curvas granulométricas de 25 amostras superficiais de rejeitos coletadas na praia de rejeitos da barragem Brumadinho (Silva, 2010).

Complementando esta informação com a presente na Tabela 1, os rejeitos de mineração de ferro são em geral materiais cujo comportamento estará provavelmente próximo dos materiais granulares, ainda que as suas componentes mais finas, constituídas por silte e argila, lhes possam conferir algumas propriedades particulares que não devem ser ignoradas. De notar ainda que a extensão granulométrica das várias amostras ensaiadas é relativamente semelhante, como se verifica pelo fato de as curvas granulométricas serem aproximadamente paralelas, para além de situarem dentro de um fuso granulométrico relativamente bem definido. Tal fato não será indiferente ao processo industrial utilizado no processamento do minério de ferro.

No que se refere à plasticidade, os rejeitos apresentam geralmente um comportamento não plástico ou de muito baixa plasticidade, com limite de liquidez LL raramente superiores a 35 %. A Tabela 2 apresenta alguns dos valores obtidos em ensaios na barragem de Brumadinho e apresentados por Silva (2010).



Tabela 2 – Valores obtidos em ensaios feitos na barragem de Brumadinho (Silva, 2010).

| Furo     | Prof. (m)     | LL (%) | LP (%) | IP (%) |
|----------|---------------|--------|--------|--------|
| SPT - 06 | 7,00 a 7,45   | NL     | NP     | -      |
|          | 11,00 a 11,45 | NL     | NP     | -      |
|          | 16,00 a 16,45 | 24,0   | 18,9   | 5,1    |
| SPT - 07 | 7,00 a 7,45   | NL     | NP     | -      |
|          | 9,00 a 9,45   | 19,7   | 14,0   | 5,7    |
|          | 12,00 a 12,45 | NL     | NP     | -      |
| SPT - 15 | 3,00 a 3,45   | NL     | NP     | -      |
|          | 9,00 a 9,45   | 18,2   | 13,8   | 4,4    |
|          | 12,00 a 12,45 | NL     | NP     | -      |
| SPT - 18 | 5,00 a 5,45   | NL     | NP     | -      |
|          | 10,00 a 10,45 | 30,3   | 23,1   | 7,2    |
|          | 15,00 a 15,45 | 18,5   | 14,2   | 4,3    |

### 2.4.3 Permeabilidade

A permeabilidade dos rejeitos de mineração, apresentam uma grande variabilidade, dependem de distribuição granulométrica, (quantidade de finos), forma e textura das partículas, e plasticidade, além de fatores como índice de vazios, grau de saturação, tipo de fluxo e temperatura. Na Figura 9 podemos ver a relação de condutividade hidráulica, tensão efetiva de confinamento e percentual de silte.

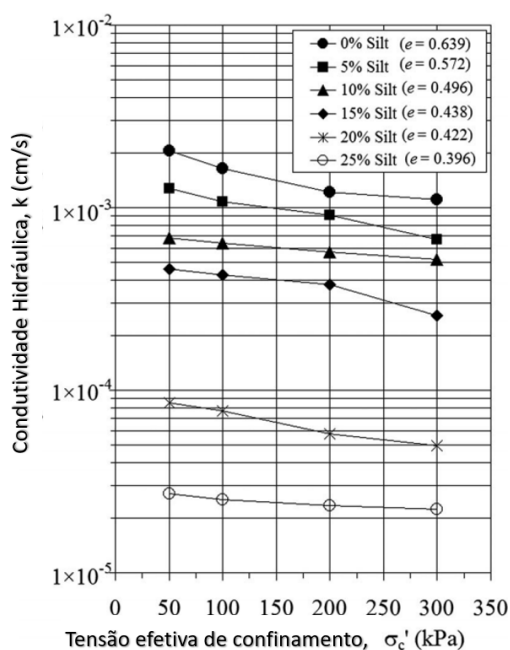


Figura 9- Relação de condutividade Hidráulica com tensão efetiva e quantidade de Silte em materiais granulares, (Adaptado de Bandini et al., 2009).

A permeabilidade média em geral, é controlada pelas partículas mais finas. Quanto maior a quantidade de partículas finas e quanto mais finas, menor será a permeabilidade (Vick, 1990). Isso se deve, em grande parte, à variabilidade granulométrica apresentada por esse tipo de material, contudo, as variações podem também ser atribuídas a outros fatores, tais como plasticidade, forma de deposição e profundidade dentro do depósito (Sarsby, 2013).

#### 2.4.4 Compressibilidade

Quando comparados a solos naturais com distribuições granulométricas equivalentes, os rejeitos de minério de ferro são mais compressíveis e o efeito do histórico de tensões na compressão se aproxima ao comportamento de argilas naturais (Vick, 1990, Vick, 1983). O método de deposição hidráulica de rejeitos, adotado em grande parte das Barragens, propicia a formação de camadas fofas, normalmente constituídas por grãos finos, alongados e angulosos (Bedin, 2010). São geralmente considerados como em estado normalmente consolidado com raros casos de estado de sobre consolidação, (Lozano, 2006). A consolidação primária em rejeitos de areia acontece muito rapidamente, o que torna a medição muito difícil de se fazer em testes de laboratório (Vick, 1990).

#### 2.4.5 Comportamento tensão-deformação e resistência ao corte

Rejeitos de mineração são caracterizados por geralmente apresentar pouca ou nenhuma coesão, por terem como origem o processo de artificiais de processamento de rochas apresentam partículas mais angulares se comparadas a solos naturais de mesma granulometria, o que faz com que estes materiais apresentem em condições semelhantes de densidade e nível de tensão, ângulos de resistência ao corte superiores (Sarsby, 2013). Parâmetros de resistência de forma semelhante ao que é feito em solos naturais, podem ser obtidos através de ensaios em *in situ*, como CPT (*piezocone penetration test*) por exemplo, ou com ensaios de laboratório, como ensaios triaxiais ou corte direto.

O comportamento encontrado em rejeitos de mineração são, semelhantes ao encontrados em solos granulares naturais. O comportamento de materiais granulares em laboratório é observado em geral por ensaios de cisalhamento, sendo muito utilizados atualmente ensaios triaxiais drenados e não drenados. De uma forma geral, a resistência drenada de solos granulares é governada por três componentes: o atrito entre a superfície dos grãos, que depende da composição mineral e do tamanho das partículas; a energia necessária para rearranjar e reorientar os grãos e a energia requerida para causar a dilatação do material (Ratton, 1993).

Vários autores relatam que quanto menos uniformidade entre os grãos, maior o ângulo de atrito, sendo que a dimensão da partícula em si tem menor efeito. Solos granulares com coeficientes de uniformidade semelhante, mas com dimensões de grãos diferentes, acabam apresentando diferentes índices de vazios com energias de compressão iguais (Lambe e Whitman, 1972). Materiais granulares encontram-se em seu estado estável ao se deformarem com tensão de corte, tensão de confinamento e volume constantes. Esta condição é identificada

se o seu índice de vazios e a tensão de corte mobilizada não apresenta variação, situação chamada de resistência de estado estável ou resistência residual (Castro 1969 e Poulos, 1981, Ishihara, 1993). Casagrande (1936) ao executar ensaios de corte drenado em amostras de areia com diferentes densidades relativas, verificou que, com uma mesma tensão efetiva, após grandes deformações, a densidade relativa do solo se aproximava de um valor constante, variando o comportamento dependendo das densidades relativas iniciais. A Figura 10 apresenta uma representação gráfica qualitativa deste fenômeno.

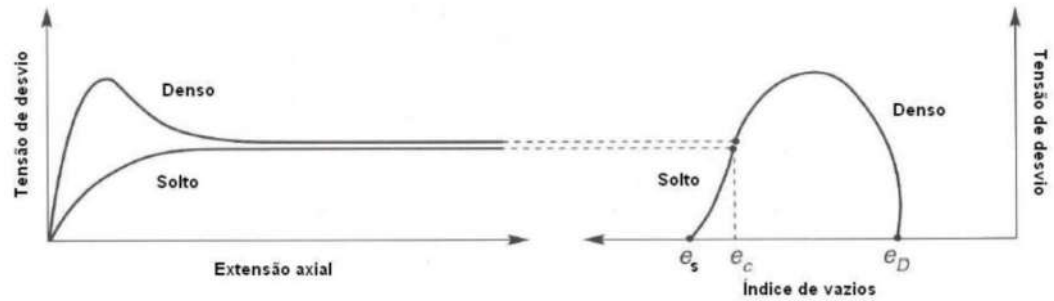


Figura 10 – Relação Tensão/deformação e Tensão/índice de vazios para amostras soltas e densas de areia. (Abreu 2012).

Sendo assim, todas as amostras tendem para a mesma densidade depois de atingir grandes deformações estando sob a mesma tensão efetiva e continuam deformando com resistência ao cisalhamento constante. Essa densidade constante corresponde a um índice de vazios também constante, ou seja, volume constante, condição está que foi denominada de índice de vazios crítico. Casagrande (1936) também em seu estudo percebeu que ao variar as tensões de confinamento afetava diretamente o índice de vazios crítico, e com a relação destes dois parâmetros era possível determinar diferentes pontos de índices dos vazios críticos, formando uma "linha", que ficou conhecida como linha de estados críticos. A Figura 11 demonstra o comportamento destes materiais em ensaios drenados e não drenados, comportamento previsto por Casagrande (1936), quando ainda não era possível a execução de ensaios não drenados, mas que seria confirmado posteriormente por Castro (1969).

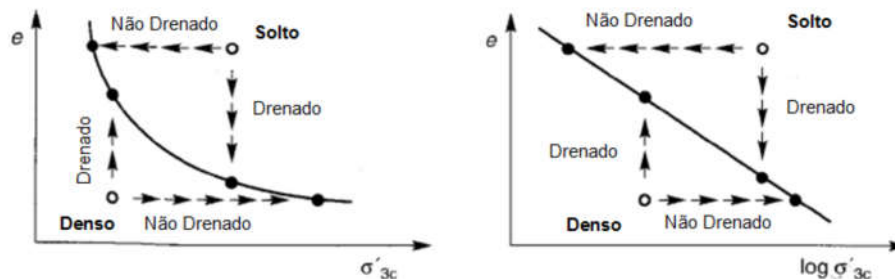


Figura 11- Comportamento de areias densas e soltas sob carregamento monotônico em condições drenadas e não drenadas (Abreu, 2012).

A Linha de Estados Críticos seria a forma de descrever o estado de tensão para o qual o solo tende quando submetido a grandes deformações, em condições drenadas por alterações de volume ou por alterações na tensão de confinamento em condições não drenadas. Seria uma

linha limite entre comportamentos de expansão e contração. Vale destacar que para uma avaliação em condição não drenada, onde não existe por definição uma variação de volume, quando se refere a um solo dilatante ou contrativo, o que está em casa é o aumento ou diminuição das pressões neutras respectivamente, (McRoberts e Sladen, 1992).

Apesar de o estado estável e o estado crítico por simplificação e fins práticos serem considerados situações equivalentes (Jefferies e Been, 2006), foram comparados por diversos autores que entendem que os dois estados são situações diferentes. O estado crítico e o estado estável são atingidos após grandes deformações no caso destas ocorrerem de forma ilimitada, em um estado de tensão e volume constantes, a diferença seria da interrupção do ensaio, neste caso a amostra se mantém no estado crítico, mas não no estado estável. Em caso de interrupção de um ensaio acontece um rearranjo das partículas diferente do que tinham na condição do ensaio, voltando a ter as mesmas condições se voltarem a ter grandes deformações, ou seja, a linha de estado estável não é possível em uma situação estática. (Poulos, 1981).

Já Been et al. (1991) concluíram que o estado crítico e o estado estável são coincidentes ao realizar ensaios triaxiais de compressão em areias, o que mudaria seria apenas a forma de se medir os dois casos, sendo o mais indicado para obtenção do estado estável, ensaios não drenados com amostras fofas, e já para obtenção do estado crítico ensaios drenados e com amostras densas. Na Figura 12a um comparativo entre linhas de estados críticos em diferentes materiais, e na Figura 12b linhas de estados críticos obtidas devido a alterações de granulometria.

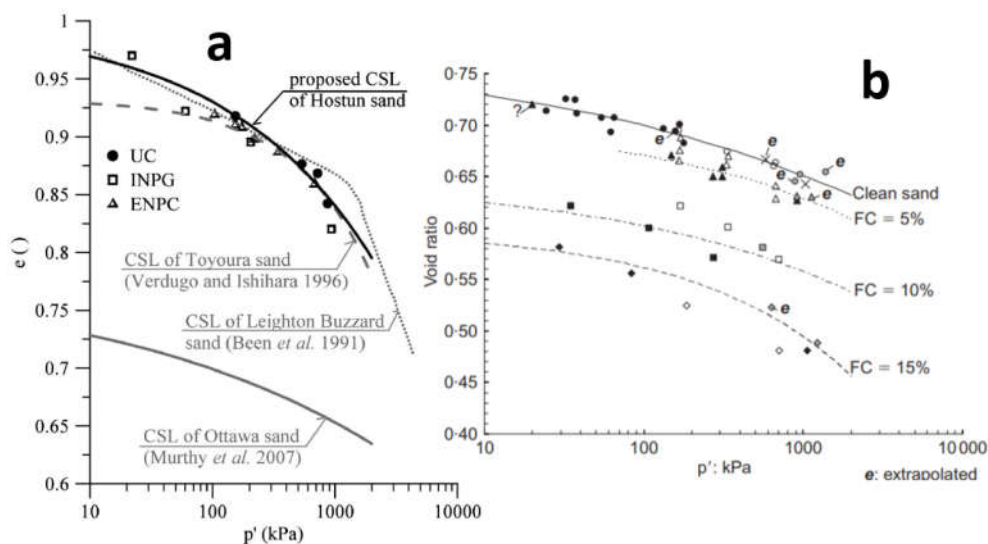


Figura 12- a) comparativo de linhas de estado crítico em diferentes materiais;(Azeiteiro et al,2017); b) diferentes linhas de estados críticos para diferentes granulometrias, (Murthy, 2007).

Na Figura 13 está apresentado resultados de comportamentos típicos obtidos por Castro (1969) em ensaios triaxiais de compressão não drenada, podemos observar como em amostras de diferentes densidades relativas sob as mesmas tensões efetivas, podemos amolecimento (a), endurecimento (c), ou até mesmo um comportamento misto (b).

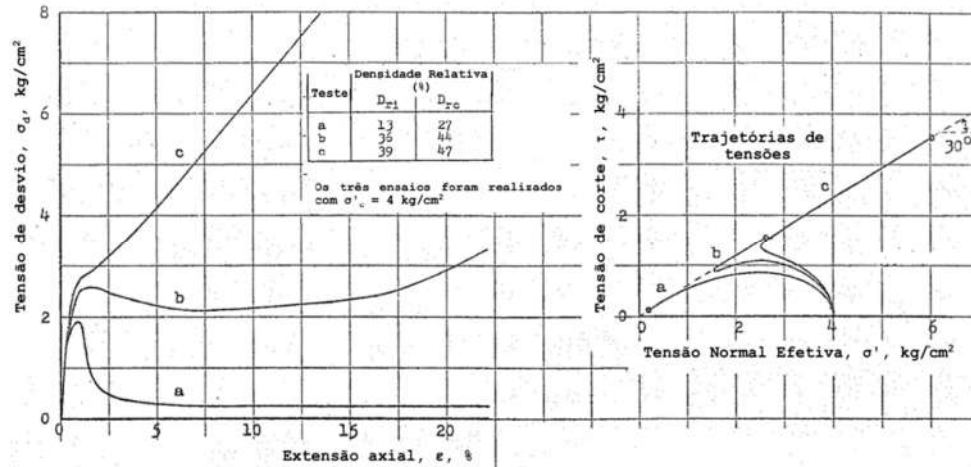


Figura 13 -- Resultados típicos alcançados por Castro (1969) com ensaios triaxiais não drenados em solos granulares com diferentes densidades relativas sob a mesma tensão efetiva.

Em solos granulares submetidos a grandes deslocamentos é quanto ao fato de apresentarem o que chamamos de endurecimento ou amolecimento. Amostras densas com o aumento da tensão de cisalhamento, tendem a exibir um comportamento de endurecimento, diferente do esperado em amostras fofas, quando em grandes deslocamentos apresentam uma diminuição da resistência ao cisalhamento, e uma fase de amolecimento. Ainda podemos ter casos em amostras de densidades intermediárias que apresentam um misto dos dois comportamentos, amolecimento inicial em função das deformações, mas com o aumento das tensões de cisalhamento começam a ter um endurecimento com a deformação.

Outra característica muito discutida sobre comportamento de solos granulares sob cisalhamento seria o que é chamado de estado de transformação de fase ou estado quase estável, termo proposto inicialmente por Ishihara et al. (1975). Seria o ponto onde acontece uma alteração de comportamento durante o corte a grandes deformações, o solo que até então vinha apresentando um comportamento contrativo ou de amolecimento passa em um determinado momento para um comportamento dilatante ou de endurecimento, momento esse que coincide com o estado de menor resistência, (Aларcon-Guzman et al., 1988). Esse é o ponto limite onde, durante o cisalhamento, se desenvolvem gerações de pressões neutras elevadas, podendo até induzir liquefação inicial, sendo ainda mais importante no caso de carregamentos cíclicos. Segundo Ishihara (1993) o conceito de estado de transformação de fase pode ser utilizado seja para amostras com deformação por amolecimento que indicaria uma ruptura por liquefação por fluxo, ou com endurecimento sem ocorrência de ruptura ou com uma ruptura também induzida por liquefação por fluxo, mas com deformações limitadas (Figura 14a).

Como podemos demonstrado na Figura 14b, para as duas trajetórias com tensão efetiva inicial menor, é possível determinar valores mínimos de  $p'$ , onde se observa uma envolvente reunindo os Estados de Transformação de Fase de todas as trajetórias (Taborda, 2011) sendo a linha que passa pela origem, chamada de Linha de Transformação de Fase.

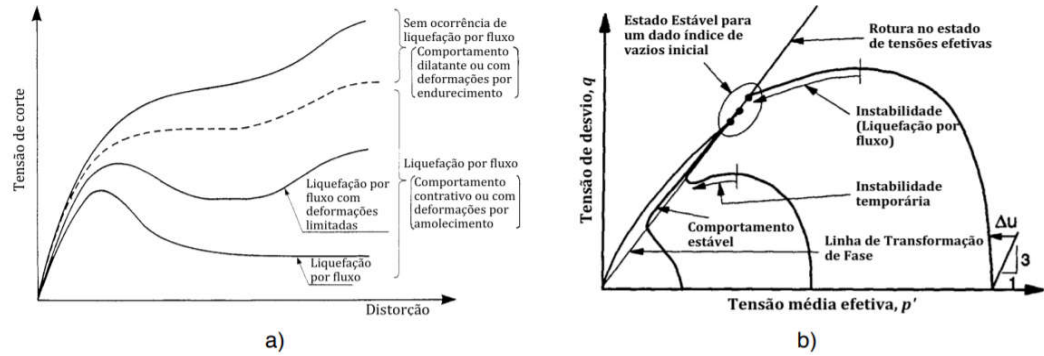


Figura 14 - Comportamento típico de areias saturadas submetidas a ensaios de compressão triaxial não drenado: a) comportamento tensão deformação; b) trajetórias de tensões. (Araújo Santos, 2015).

A linha de transformação de fase e a linha de estados críticos no plano  $p'$ - $q$  coincidem, isso devido a transição do comportamento contrativo para o dilatante indica que o material não tem tendência a ter variações volumétricas, (Coelho, 2007). Se confrontarmos as curvas de tensão deformação e as trajetórias de tensão (Figura 15), se verifica que as amostras com deformações por amolecimento, atingem o estado de transformação de fase e o estado crítico simultaneamente.

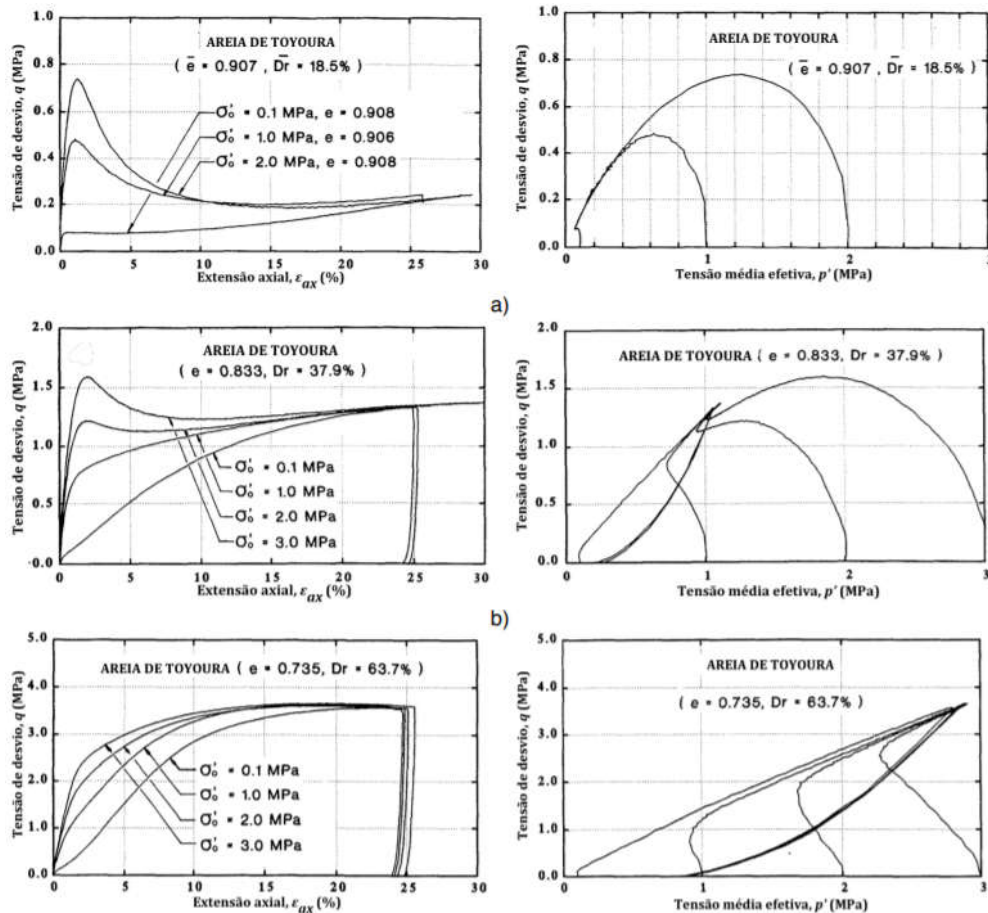


Figura 15- Curvas de tensão-deformação vs trajetórias de tensões de ensaios de compressão triaxial não drenados em amostras de areia: a) amostras fofas; b) amostras com densidade intermediária; c) amostras densas. (Ishihara, 1993).

Observando os vários estados apresentados anteriormente podemos afirmar que o comportamento não drenado de solos granulares é dependente das suas condições iniciais, como densidade relativa e tensão efetiva. Ou seja, o mesmo solo, com o mesmo índice de vazios, poderia apresentar comportamentos diferentes dependendo das tensões de confinamento em que ele era submetido, como por exemplo pudemos observar na Figura 14 solos com as mesmas densidades relativas que eram suscetíveis a liquefação em tensões elevadas, mas para tensões menores isso não acontecia. A combinação destes dois parâmetros (nível de tensão e índice de vazios) deu origem ao parâmetro de estado ( $\psi$ ), sugerido por Been e Jefferies (1985), sendo a diferença entre o índice de vazios inicial ( $e_0$ ), e o índice de vazios crítico ( $e_{EC}$ ). (Equação 1).

$$\psi = e_0 - e_{EC} \quad \text{(Equação 1)}$$

1)

O parâmetro de estado tem como referência a linha de estados críticos, quando o índice de vazios inicial é menor que o índice de vazios no estado crítico o  $\psi$  é negativo, e o solo tem comportamento dilatante. Já no caso de o solo ter um índice de vazios inicial maior que o índice de vazios em seu estado crítico, temos um solo contrativo e um  $\psi$  positivo. Na Figura 16 podemos observar uma representação gráfica do conceito do parâmetro de estado.

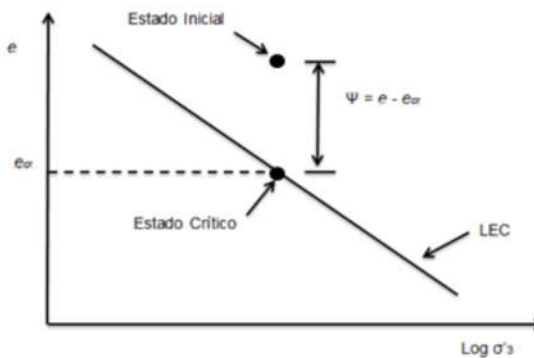


Figura 16 - Conceito de Parâmetro de Estado (Abreu, 2012).

O parâmetro de estado, é uma boa forma de descrever o comportamento do solo, afinal muitas das propriedades variam em função do estado de tensão, embora seja limitado porque não leva em consideração, a importância da estrutura do solo, a sua possibilita uma abordagem técnica à maioria dos problemas geotécnicos (Coelho, 2007).

#### 2.4.6 Métodos de reconstituição de amostras de solos granulares

Como é obvio de imaginar, a obtenção de amostras indeformadas de solos granulares, é extremamente difícil e caro, gerando incertezas da representatividade destas amostras, várias técnicas de reconstituição de amostras já foram desenvolvidas procurando simular a ação da natureza na formação desses depósitos (Ratton, 1993). O método de preparação de uma amostra reconstituída idealmente deveria ser escolhido de acordo com a história deposicional da areia in situ, com o objetivo de se encontrar formas de melhor representar o comportamento natural, vários métodos e alternativas com modificações nos procedimentos têm sido propostas na

literatura. Para estudos paramétricos em laboratório, a escolha de um apropriado o método de preparação da amostra às vezes depende da distribuição do tamanho do grão curva do material de teste.

#### **2.4.6.1 Pluviação seca**

A pluviação seca seria ideal para reproduzir depósitos naturais eólicos, que tem como característica formar camadas de solos arenosos e siltosos com grãos bem uniformes. Na pluviação seca o material granular seco é introduzido ao molde através de funil ou o chamado pluviador de areia, que direciona e controla a velocidade de deposição do material, controlando a densidade dos corpos de provas com o ajuste da altura de queda e velocidade de deposição. A diferença entre o funil e o pluviador seco, é o fato de que com o uso do pluviador a areia flui por um ou mais bicos com diâmetros variáveis distribuída de maneira uniforme por um conjunto de peneiras, formando uma chuva de areia, quanto maior for a altura de queda, maior será a energia de deposição e maior será a densidade da amostra. O método tem a possibilidade de cobrir uma ampla faixa de densidades relativas dependendo do tamanho e homogeneidade das partículas. Se o material tiver grande variabilidade de tamanho e densidade de grãos, o método pode apresentar segregação.

A compactação húmida é apropriada para simular a compactação *in situ* de depósitos de areia húmida por compactação vertical na superfície do solo (Tatsuoka et al.,1986). Deposição húmida e compactação vibratória subsequente pode ser aplicada em laboratório para reproduzir camadas de areia húmida no campo compactadas por vibração (Tatsuoka et al.,1986). Por exemplo, preparação de amostra por métodos de deposição húmida são vantajosos no caso de solos com granulometria variada, pois dificultam a segregação de partículas. Estudos sobre a influência do método de preparação da amostra foram principalmente dedicados à resposta da areia a ensaios drenados ou não drenados, sejam com carregamento monotônicos ou cíclico não drenado. Em ensaios triaxiais com carregamento monotônicos, amostras fofas preparadas por compactação húmida exibiram um comportamento dilatativo do que amostras produzidas por pluviação ao ar com mesmas densidades médias. Em contrapartida, Miura & Toki (1982) observaram uma tendência oposta, ou seja, dilatância para amostras de densidade média preparadas por pluviação utilizando aparelho de peneira múltipla maiores do que corpos de prova produzidos por compactação húmida. Conclusões contraditórias são indícios de que o efeito do método de preparação da amostra pode ser afetado por outros parâmetros, como o material testado ou densidade relativa, entre outros.

#### **2.4.6.2 Pluviação úmida**

A pluviação úmida é um método que basicamente consiste na deposição do solo granular saturado em moldes com água de preferência de aerada, a deposição é feita com uma colher ou frasco, está técnica favorece a obtenção de amostras fofas, devido a baixa velocidade que as partículas atingem dentro da água, e em caso de ter como objetivo uma maior densidade, em geral são utilizados vibradores no final do processo de pluviação (Vaid & Negussey, 1988). Usando o mesmo raciocínio, como a pluviação seca seria indicado para reproduzir depósitos eólicos, a pluviação úmida seria a mais indicada em caso de reprodução de depósitos de solos



granulares naturais hidráulicos. Da mesma forma que a pluviação a seco, o método úmido apresenta problemas de segregação em caso de solos não uniformes e com variações de densidade. Em ambos os casos, tanto no método a seco quanto o úmido deve estar já previamente preparado na base da câmara triaxial.

#### 2.4.6.3 Compactação úmida (moist-tamping)

O método de compactação úmida é o método com o qual se tem mais possibilidades de atingir o intervalo de densidades mais amplos, conseguindo desde amostras muito fofas ou muito densas. O princípio é que a amostra seja preparada com um teor de umidade em torno de 5 %. Um dos problemas deste método é que ele não reconstitui a estrutura de um depósito de solo natural, sendo mais indicado para estudos de aterros compactados artificialmente e tendem a apresentar não uniformidade em relação a densidade.

O que é feito é uma compactação por camadas com um soquete. É introduzido dentro do molde previamente preparados como nas técnicas anteriormente citadas, uma quantidade do material, fração essa que corresponde a uma camada, que após sua introdução é compactada até que atinja um volume pré-estabelecido também. A força e espessura das camadas são determinadas em função da densidade desejada. A compactação pode ser feita por um pilão, ou até mesmo através de golpes nas paredes laterais, com cuidado para variar a direção dos golpes evitando uma orientação preferencial das partículas. A Figura 17 apresenta a ilustração de 3 diferentes métodos de preparação de amostras para solos granulares.

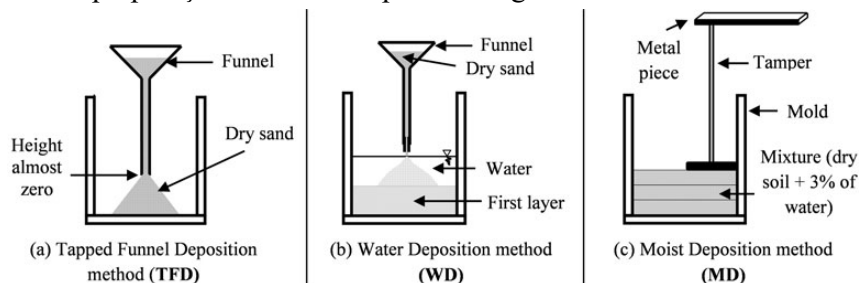


Figura 17- Comparativo entre métodos de preparação de amostras.

#### 2.4.7 Métodos de reconstituição de amostras de solos plásticos

Em relação a reconstituição de solos plásticos, ou depósitos de solos moles, é uma ferramenta importante para a caracterização do comportamento do solo natural, uma vez que estes depósitos, face à sua origem, idade e história geológica, não apresentam, em geral, estrutura muito marcada. Outra vantagem das amostras reconstituídas é o fato de que essas poderão suprir as insuficiências das amostras indeformadas cuja obtenção nesse tipo de depósitos, geralmente de muito baixa consistência, é muito difícil.

Da mesma forma que acontece em solos granulares não coesivos as técnicas de reconstituição de solos plásticos, deve garantir a preservação da composição granulométrica, mineralógica e orgânica do solo, assim como a homogeneidade das amostras no final do processo. Sendo assim, o mais comum é utilizar todo o material recolhido e de alguma forma proceder na sua homogeneização, ainda que para isso possam ser eliminadas algumas partículas que, embora presentes em pequena quantidade, possam uma dimensão tal que ponha em causa

a obtenção de amostras uniformes e de dimensão compatível com a utilização em aparelhos de ensaio de corte. A desejada homogeneidade das amostras reconstituídas, conservando a estrutura do solo natural deve ser totalmente destruída através de adição de água ao solo recolhido e posterior desagregação mecânica da massa resultante. Esta deve possuir uma consistência tal que, sendo suficientemente baixa para facilitar a mistura de homogeneização, mas não permita que ocorra segregação. Atendendo a estas limitações, são aconselhados, na bibliografia, valores para o índice de liquidez da massa de solo de 1,2 (Oliveira, 1992) a 1,4 (Campos, 1984), encontrando-se tais valores no intervalo de 1,0 a 1,75 definido por Hight et al. (1983) como sendo característico do índice de liquidez durante a formação de depósitos naturais de solos moles. A fase final da reconstituição do solo consiste na consolidação unidimensional da massa homogênea de solo obtida pelos procedimentos anteriormente descritos, de modo a conferir-lhe uma consistência tal que permita a preparação de corpos de prova para ensaio. A consolidação é geralmente realizada em edométrico de grandes dimensões, cujas câmaras de consolidação possibilitam a obtenção de amostras suficientemente grandes para garantir a preparação simultânea de vários tipos e formas de corpos de prova, os quais devem ser convenientemente conservados de modo a preservar as suas características até à data de realização dos ensaios.

#### **2.4.8 Métodos de reconstituição de amostras de solos por deposição de pasta**

Uma alternativa testada por Carraro and Prezzi (2008) para solos arenosos com algum percentual de finos é o método de deposição de pasta ou lama, (Slurry Deposition Method), este método também utilizado por Wang et al. (2011). Cada um dos autores citados fizeram algumas alterações e adaptações no método para seus casos específicos, mas basicamente o solo é misturado com água em um recipiente, a mistura é agitada e imediatamente depositada no local final do ensaio. No caso de um ensaio triaxial por exemplo, a mistura é depositada no equipamento triaxial devidamente preparado. Dependendo do teor de umidade utilizado é necessário aguardar um período para que o material sedimente totalmente para então prosseguir com o ensaio.

#### **2.4.9 Métodos de reconstituição de amostras de resíduos de mineração**

Amostras reconstituídas de rejeitos de minério devem, no mínimo, ser uniformes e homogêneas e serem produzidas usando métodos que exibam boa repetibilidade e reprodutibilidade. Além disso, a composição da amostra e os procedimentos de reconstituição devem replicar o mais próximo possível de quaisquer processos de deposição e pós-deposição que afetam os rejeitos no campo, de modo que as amostras reconstituídas tenham propriedades físicas e um comportamento mecânico comparável aos exibidos pelos rejeitos in situ. Como os rejeitos são geralmente depósitos recentes do ponto de vista geológico, os efeitos do tempo, normalmente impossíveis de imitar em amostras reconstituídas, devem ter importância secundária. Uma das maneiras mais eficazes de preparar amostras reconstituídas de materiais com partículas com formas e composições únicas, como neste caso, é usando amostras soltas

coletadas em campo, isso garante que a composição da amostra replique a dos rejeitos in situ. Considerando que rejeitos tendem a ser formados como aterros hidráulicos por deposição de lama, os procedimentos de reconstituição à base de deposição de lama normalmente usados em solos argilosos podem ser uma boa solução, desde que os problemas de segregação que afetam a uniformidade de rejeitos in situ sejam adequadamente tratados, reduzindo a umidade da polpa o que tende a diminuir a fluidez.

Fato importante é que a simples escolha do método de produção da amostra pode interferir no resultado final, ou seja interferir na decisão de engenharia ou o risco que uma estrutura pode oferecer. A Figura 18 temos os resultados obtidos em ensaios triaxiais do mesmo material em mesmas condições, tendo como única diferença os métodos de reconstituição das amostras, Slurry deposition (SD), Moist Damping (MT).

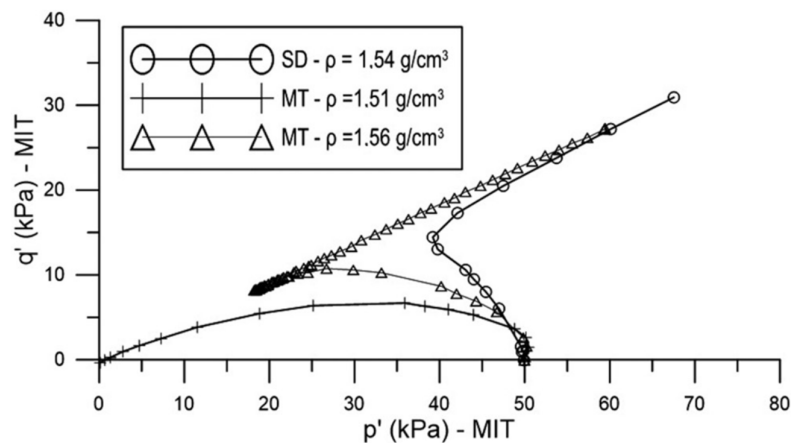


Figura 18- Resultado de ensaios triaxiais de rejeito de minério de ferro em amostras reconstituídas preparadas por diferentes técnicas (SD) e MT, sendo o MT com diferentes densidades relativas. (Corrêa e Oliveira, 2019).

A Figura 17, fica clara a diferença de comportamento, a amostra mais densa preparada pelo método MT tem maior tendência ao amolecimento que a preparada pelo método SD com menos densidade. Isso acontece da mesma forma para as outras técnicas de reconstituição, como é demonstrado na Figura 19, para resultados de em amostras de areia.

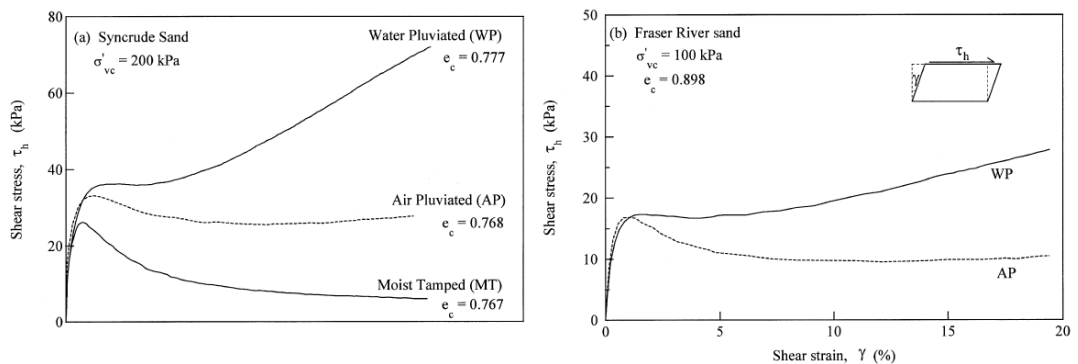


Figura 19- Resultados de ensaios triaxiais em amostras de areia com índices de vazios semelhantes produzidos com diferentes técnicas de reconstituição.

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia adotada com o detalhamento e justificativas para os materiais, equipamentos e normas técnicas que foram utilizados em todo o procedimento experimental deste estudo.

##### 3.1.1 Materiais

###### 3.1.1.1 Rejeito de minério de ferro

Os rejeitos de minério utilizados na reconstituição foram coletados de um antigo depósito de rejeitos de minério de ferro na Região Norte de Portugal, ou seja, da antiga Mina de Ferro da Torre de Moncorvo (Figura 20), que operou na região por mais de 30 anos e deixou de operar em meados dos anos 80, antes de reabrir recentemente.

Os rejeitos de minério de ferro coletados do local eram representativos do material depositado próximo à superfície e aparentemente tinham maiores proporções de ferro com base em sua cor. A maior parte do material foi coletada sem intensão de manter ou preservar a estrutura natural dos rejeitos de minério de ferro. No entanto, algumas amostras de blocos indeformados também foram coletadas e cuidadosamente transportadas e armazenadas no Laboratório Geotécnico da Universidade de Coimbra, a fim de avaliar o comportamento mecânico do material *in situ* através de testes laboratoriais.

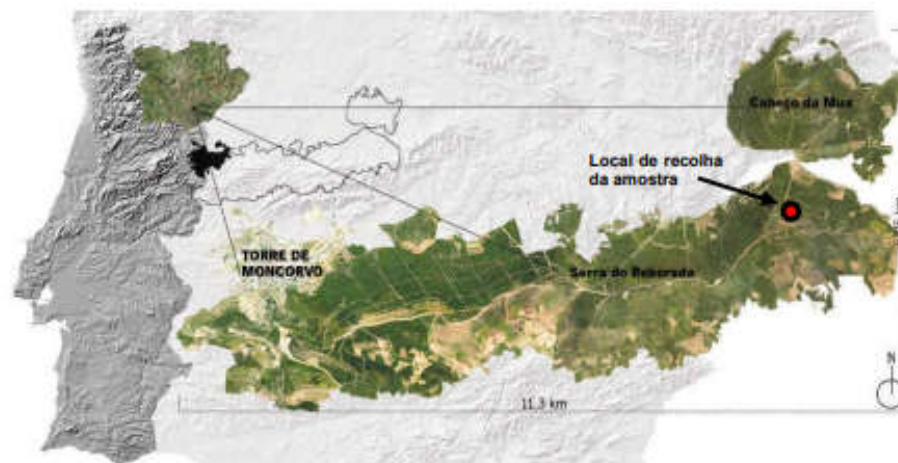


Figura 20 – Mapa de localização da mina de Moncorvo com indicação do local de recolha da amostra de rejeito de minério de ferro (Adaptado de Fevereiro, 2015).

### 3.1.1.2 Areia

A areia utilizada para compor a curva granulométrica de um dos blocos reconstituídos chamado de Brumadinho, são areias saibrosas naturais materiais sedimentares depositados na bacia do Mondego, na região entre Lousã e Miranda do Corvo. A escolha deste material foi somente por ser o que tinha maior facilidade de utilização e atendia as características necessárias.

### 3.1.2 Métodos

Depois de efetuada a coleta das amostras em campo, sendo a maior parte de material solto, (cerca de 500 kg) e alguns blocos que se conseguiu obter de forma indeformada os restos orgânicos e as partículas de grande porte que não eram representativas do material a granel foram primeiramente removidos manualmente e testes de identificação foram realizados em amostras representativas do material restante (Figura 21). Os resultados obtidos mostram que os rejeitos de minério de ferro selecionados para reconstituição das amostras apresentam uma distribuição granulométrica que se enquadra, em sua maioria, na faixa de 0,01 a 0,15 mm, que contém 90 % das partículas em termos de peso. A densidade de partículas sólidas ( $G_s$ ) é de cerca de 4,7, o que confirma que os rejeitos de minério selecionados ainda contém um elevado percentual de ferro. O material também é moderadamente plástico, com um limite de plasticidade (LP) e um limite de liquidez (LL) igual a 15 e 20 %, respectivamente, de acordo com a BS 1377-2: 1990 (BS 1990). O Índice de Plasticidade (IP) é igual a 5 %, o que reflete a plasticidade moderada dos rejeitos. Esses valores são bastante representativos das propriedades médias de outros rejeitos de minério (Tabela 1), o que provavelmente reflete métodos de processamento e composição de partículas semelhantes encontrados nessas minas ao redor do mundo.

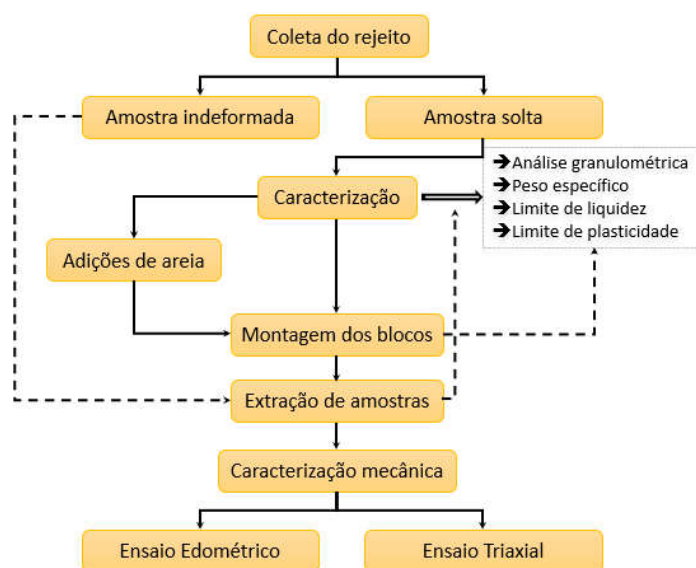


Figura 21 - Fluxograma simplificado do programa experimental realizado.

### 3.1.2.1 Produção dos blocos

#### 3.1.2.1.1 Amostras tipo Torre de Moncorvo

Tendo em conta as propriedades do material selecionado, nomeadamente os seus limites de liquidez e plasticidade, foi preparada uma pasta com um teor de água (23 %) ligeiramente superior ao limite líquido obtido (LL) de 20 %. O material foi então bem misturado até que uma pasta viscosa uniforme e homogênea fosse obtida (Figura 22a). Esse material com um aspecto de lama, foi posteriormente transferida para um molde cilíndrico rígido de 30 cm de altura (Diâmetro = 11,5 cm) com pedras porosas colocadas no fundo para drenagem do excesso de água do fundo. Papel filtro foi usado ao redor das paredes verticais do contido para acelerar o processo de consolidação (Figura 22b). Depois de colocar o material no cilindro e preenchê-lo quase que totalmente, exceto para os 3 cm superiores necessários para colocar outra pedra porosa e a placa de carregamento no topo, a pasta então foi consolidada até uma tensão vertical efetiva próxima a 50 kPa por 2 semanas (Figura 22c).

A partir do bloco cilíndrico foram extraídas amostras de menores dimensões, amostras estas de diferentes formatos de acordo com sua utilização futura. Na Figura 21d, estão demonstradas as indicações das divisões e pontos de coletas das amostras.

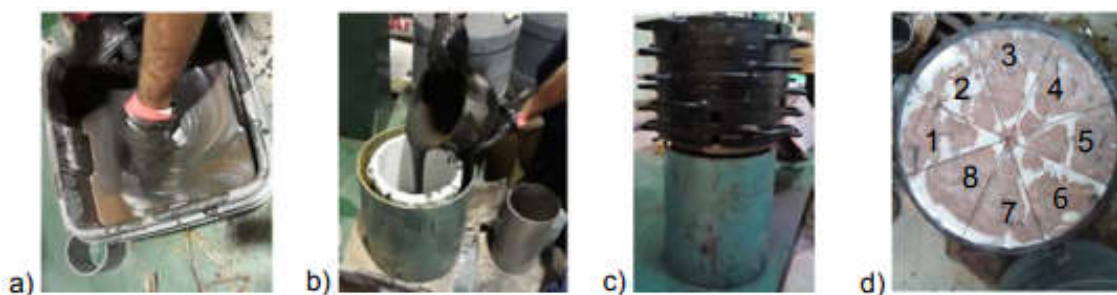


Figura 22 – Passos do método de reconstituição adotado para preparar amostras de rejeito. a) mistura; b) consolidação; c) preparação de provetes e; d) pontos indicativos de coleta de amostra.

#### 3.1.2.2 Amostras tipo Brumadinho

As etapas de produção do bloco cilíndrico das amostras tipo Brumadinho, são essencialmente as mesmas das utilizadas nas amostras tipo Moncorvo, com a exceção da adição de areia previamente preparada, com intuito de se obter um material com características físicas semelhantes as obtidas na literatura referentes aos materiais presentes na Barragem de rejeitos da mina do feijão, na cidade de Brumadinho, Brasil.

##### 3.1.2.2.1 Processamento realizado no material areia

Antes de efetuar a mistura da areia ao rejeito de minério de ferro, foi preciso uma etapa de processamento do material para que este chegasse as características previamente desejadas. O primeiro passo foi tentar obter os maiores tamanhos de grãos possíveis, para que todos as partículas de areia tivessem necessariamente que ser moídas, tentando reproduzir a fragmentação que teriam em caso de terem sido processadas realmente para o processo de mineração. A Figura 23 está um resumo das etapas do processamento da areia.

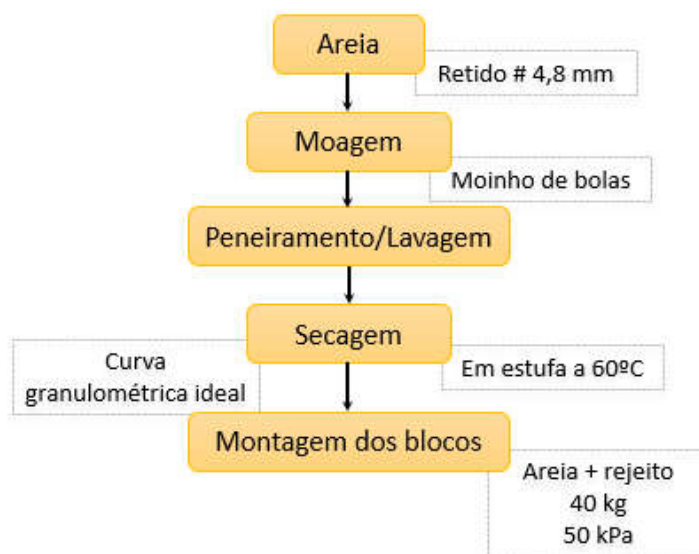


Figura 23- Fluxograma das etapas do processamento da areia.

Como no processamento do minério de ferro, a areia foi moída em moinho de bolas por via úmida e depois peneirado e lavado para melhor separação das dimensões. As frações separadas por dimensão foram então misturadas novamente em proporções previamente estabelecidas para compor a curva granulométrica obtida pela média de valores dos resultados de ensaios realizados no material proveniente da barragem de brumadinho por Silva (2010). Nas Figuras 24 e 25 fica demonstrado a curva média de referência e as curvas de origem obtidas por Silva (2010).

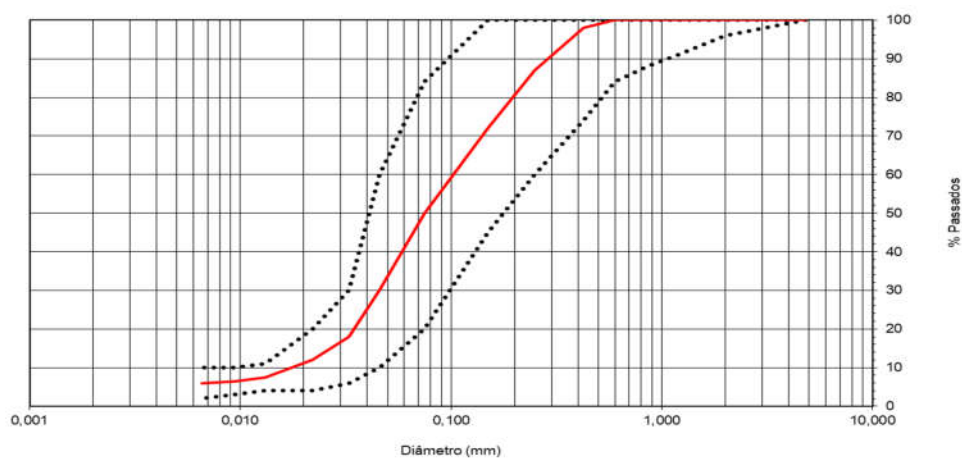


Figura 24- Intervalo de curvas obtidas em ensaios de granulometria da barragem de Brumadinho e curva vermelha é a curva média.

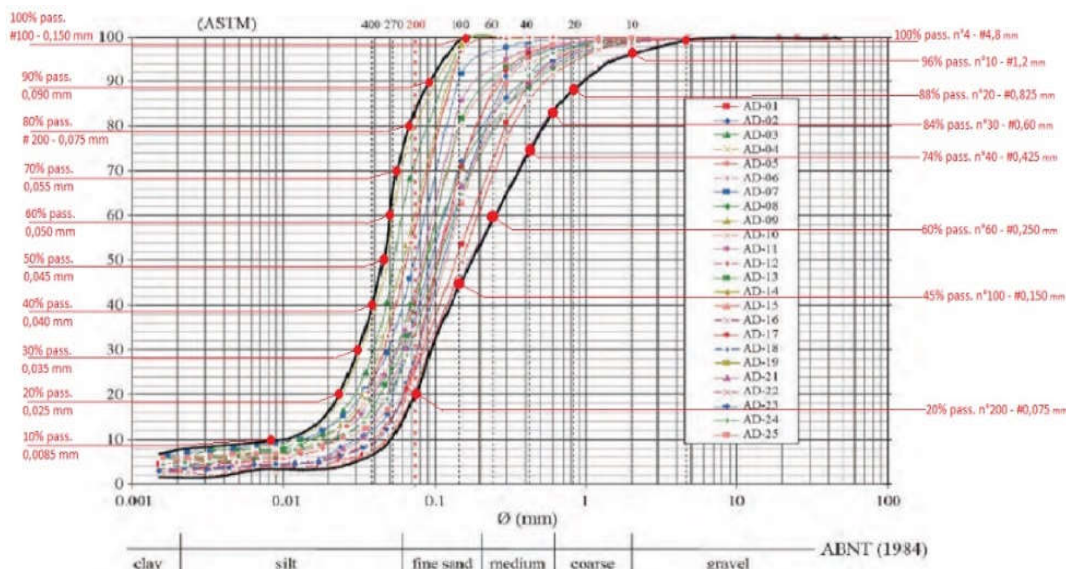


Figura 25- Intervalo de curvas granulométricas obtidas por Silva (2010) em amostras de rejeito de minério de ferro da Barragem Brumedinho MG, Brasil.

Para se obter este resultado foram calculados a quantidade em kg de quanto seria necessário ser adicionado de cada fração, sendo que o somatório final seria de aproximadamente 40 kg, valor pouco superior ao que seria necessário para preencher o cilindro de preparação de amostras. Por simplificação somente foi adicionado valores que tinham dimensões superiores aos retidos na peneira # 200 ou 0,075 mm, ou seja, frações que poderiam ser controladas pelo peneiramento. A Figura 26 apresenta uma tabela com a demonstração dos cálculos para chegar à curva média e as quantidades a serem adicionadas por fração.

| Original |           | Curva superior |           | Curva inferior |           | Curva média |           | Valor a ser adicionado |               |            |                 |
|----------|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|-------------|-----------|------------------------|---------------|------------|-----------------|
| D (mm)   | Passa (%) | D (mm)         | Passa (%) | D (mm)         | Passa (%) | D (mm)      | Passa (%) | Retido (%)             | Diferença (%) | Retido (%) | Por fração (kg) |
| 4,8      | 100,0     | 4,8            | 100,0     | 4,8            | 100,0     | 4,8         | 100,0     | 0,0                    | 0,0           | 0,00       | 0,00            |
| 2        | 100,0     | 2              | 100,0     | 2              | 96,0      | 2           | 98,0      | 2,0                    | 2,0           | 0,80       | 0,80            |
| 1,2      | 100,0     | 1,2            | 100,0     | 1,2            | 91,0      | 1,2         | 95,5      | 4,5                    | 4,5           | 1,78       | 0,98            |
| 0,85     | 100,0     | 0,85           | 100,0     | 0,85           | 88,0      | 0,85        | 94,0      | 6,0                    | 6,0           | 2,38       | 0,60            |
| 0,6      | 99,9      | 0,6            | 100,0     | 0,6            | 84,0      | 0,6         | 92,0      | 8,0                    | 7,9           | 3,14       | 0,76            |
| 0,425    | 99,8      | 0,425          | 100,0     | 0,425          | 74,0      | 0,425       | 87,0      | 13,0                   | 12,8          | 5,12       | 1,97            |
| 0,25     | 99,7      | 0,25           | 100,0     | 0,25           | 60,0      | 0,25        | 80,0      | 20,0                   | 19,7          | 7,88       | 2,76            |
| 0,15     | 99,2      | 0,15           | 100,0     | 0,15           | 45,0      | 0,15        | 72,5      | 27,5                   | 26,7          | 10,68      | 2,81            |
| 0,075    | 84,8      | 0,075          | 84,0      | 0,075          | 20,0      | 0,075       | 52,0      | 48,0                   | 32,8          | 13,11      | 2,43            |
| 0,06     | 52,2      | 0,046          | 60,0      | 0,046          | 10,0      | 0,046       | 35,0      |                        |               |            |                 |
| 0,043    | 48,0      | 0,033          | 30,0      | 0,033          | 6,0       | 0,033       | 18,0      |                        |               |            |                 |
| 0,032    | 33,3      | 0,022          | 20,0      | 0,022          | 4,0       | 0,022       | 12,0      |                        |               |            |                 |
| 0,024    | 16,5      | 0,013          | 11,0      | 0,013          | 4,0       | 0,013       | 7,5       |                        |               |            |                 |
| 0,018    | 6,0       | 0,009          | 10,0      | 0,009          | 3,0       | 0,009       | 6,5       |                        |               |            |                 |
| 0,013    | 5,0       | 0,007          | 10,0      | 0,007          | 2,0       | 0,007       | 6,0       |                        |               |            |                 |

Figura 26 - Tabela com valores das curvas e resultado com a curva média, além dos valores em kg da quantidade de cada fração a ser adicionada ao bloco.



### 3.1.2.3 Produção de amostras indeformadas

Para que fosse possível uma avaliação da eficiência do método além de um comparativo entre amostras do mesmo bloco entre si, foram produzidas amostras indeformadas produzidas de blocos retirados do mesmo local. Na Figura 27 estão apresentadas algumas etapas da produção dessas amostras indeformadas.



Figura 27 - Exemplo de produção de amostras indeformadas para ensaios triaxiais e edométricos.

Vale destacar que como é de se esperar, amostras indeformadas podem apresentar algum grau de heterogeneidade, falhas internas e presença de pedras ou galhos. Em alguns casos esses problemas inviabilizam a amostra, em outros são imperceptíveis a olho nu, mas podem trazer um resultado adverso ao ensaio, Figura 28.



Figura 28- Falhas apresentadas por amostras indeformadas.

### 3.1.2.4 Montagem das amostras para ensaios triaxiais

Foram feitas pelo menos 56 tentativas de realização de ensaios triaxiais, sendo que destes somente 34 foram concluídos. As dificuldades na realização destes ensaios tiveram diversas origens, mas principalmente pelo alto grau de dificuldade da transferência da amostra para o equipamento triaxial, estas dificuldades de manuseio obrigaram a criar uma sequência de passos para que se conseguisse que a amostra fosse ensaiada de forma satisfatória. Além desses problemas ocorreram falhas devido a imperícia e falta de experiência do operador, mas que logo foram ultrapassadas. A Figura 29 tem um esquema representativo destas etapas.

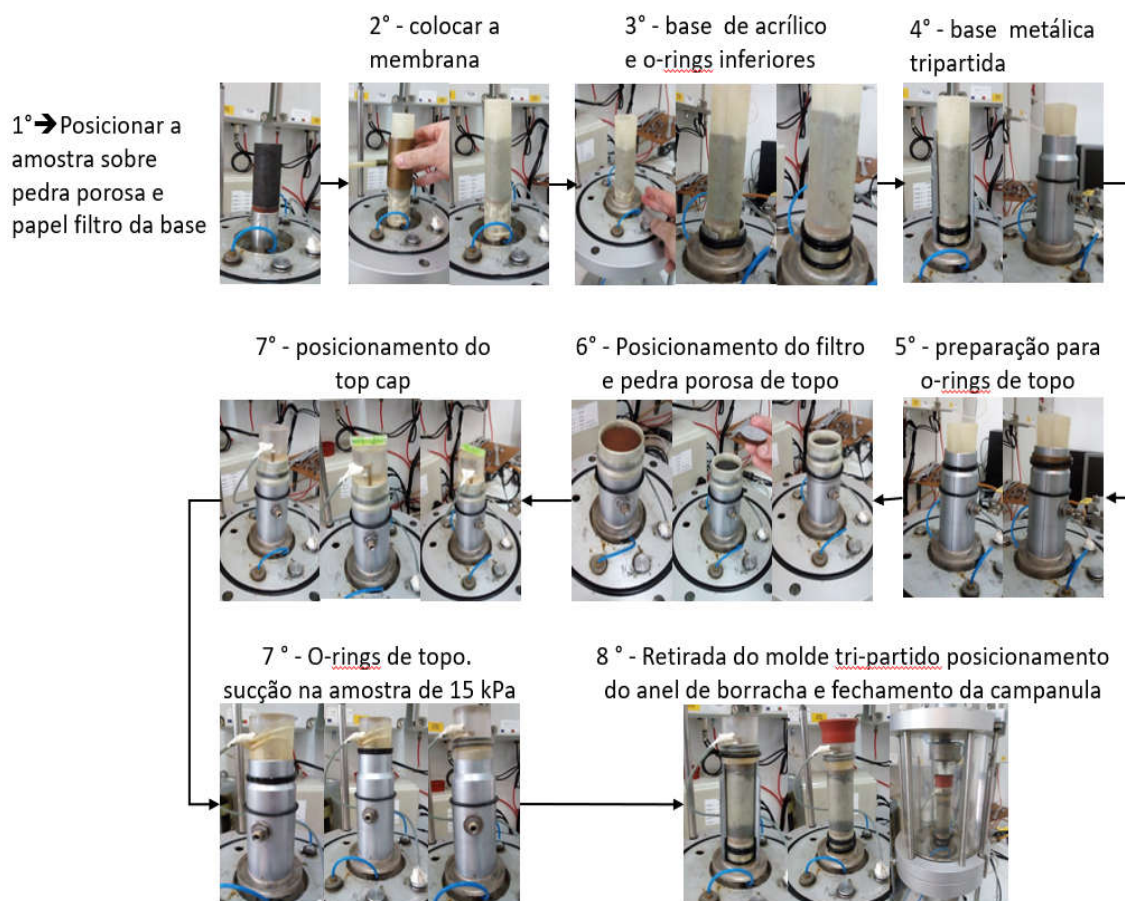


Figura 29 - Esquema representativo das etapas de montagem das amostras triaxiais.

Destes 34 ensaios concluídos, 8 feitos em amostras indeformadas (4 ensaios de compressão não drenados e 4 ensaios de extensão não drenados), 7 em amostras tipo Moncorvo (4 de compressão não drenado e 3 de extensão não drenado), e 19 ensaios tipo brumadinho (6 de compressão não drenado, sendo 1 com redução de tensão de confinamento(S3), 4 de extensão não drenada, 5 ensaios dinâmicos, 6 ensaios drenados ( 3 de compressão, sendo 1 com  $p'$  constante 1 com redução de S3, 3 de extensão, sendo 1 com  $p'$  constante, e 1 com redução de S3. A Tabela 3 está apresentado um resumo dos ensaios triaxiais efetivos realizados.

Tabela 3- Resumo dos ensaios triaxiais realizados.

| <b>Tipo de amostra</b>   | <b>tipo de ensaio</b> | <b>Abreviatura correspondente</b> |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Indeformada              | CND                   | IND.CND.50kPa                     |
| Indeformada              | CND                   | IND.CND.200kPa                    |
| Indeformada              | CND                   | IND.CND.800kPa (2x)               |
| Indeformada              | END                   | IND.END.50kPa                     |
| Indeformada              | END                   | IND.END.200kPa                    |
| Indeformada              | END                   | IND.END.800kPa (2x)               |
| -                        | -                     | -                                 |
| Reconstituída Moncorvo   | CND                   | MON.CND.50kPa                     |
| Reconstituída Moncorvo   | CND                   | MON.CND.200kPa (2x)               |
| Reconstituída Moncorvo   | CND                   | MON.CND.800kPa                    |
| Reconstituída Moncorvo   | END                   | MON.END.50kPa                     |
| Reconstituída Moncorvo   | END                   | MON.END.200kPa                    |
| Reconstituída Moncorvo   | END                   | MON.END.800kPa                    |
| -                        | -                     | -                                 |
| Reconstituída Brumadinho | CND                   | BRU.CND.50kPa                     |
| Reconstituída Brumadinho | CND                   | BRU.CND.200kPa (3x)               |
| Reconstituída Brumadinho | CND                   | BRU.CND.800kPa                    |
| Reconstituída Brumadinho | END                   | BRU.END.50kPa                     |
| Reconstituída Brumadinho | END                   | BRU.END.200kPa                    |
| Reconstituída Brumadinho | END                   | BRU.END.800kPa                    |
| Reconstituída Brumadinho | CD                    | BRU.CD.200kPa                     |
| Reconstituída Brumadinho | ED                    | BRU.ED.200kPa                     |
| Reconstituída Brumadinho | CDp'                  | BRU.CDP'.200kPa                   |
| Reconstituída Brumadinho | EDp'                  | BRU.EDP'.200kPa                   |
| Reconstituída Brumadinho | CD-S3                 | BRU.CD-S3.200kPa                  |
| Reconstituída Brumadinho | ED-S3                 | BRU.ED-S3.200kPa                  |
| Reconstituída Brumadinho | CNDD                  | BRU.DND.40kPa                     |
| Reconstituída Brumadinho | CNDD                  | BRU.DND.60kPa                     |
| Reconstituída Brumadinho | CNDD                  | BRU.DND.80kPa                     |
| Reconstituída Brumadinho | CNDD                  | BRU.DND.100kPa                    |
| Reconstituída Brumadinho | CNDD                  | BRU.DND.200kPa                    |

Os procedimentos de percolação e saturação da amostra com água, foi feito no sentido no sentido ascendente, através da aplicação de uma pressão de água na base do corpo de prova, mantendo-se sempre um diferencial de pressões de aproximadamente 10 kPa. Sendo o grau de saturação avaliado através do parâmetro B de Skempton, comparando a variação da pressão na célula, com o aumento resultante na amostra. Quando a relação destas pressões é de pelo menos 0,97, se assumiu que a amostra estava saturada.

### 3.1.2.5 Validação do Processo de Reconstituição

A validação do processo de reconstituição baseou-se na comparação das características físicas e de identificação obtidas com as apresentadas in situ, e no confronto das características físicas e de identificação e características básicas de comportamento mecânico observadas em diferentes locais do bloco reconstituído. A Figura 30 tem uma ilustração da divisão dos locais de retirada das amostras do bloco para comparação entre si.

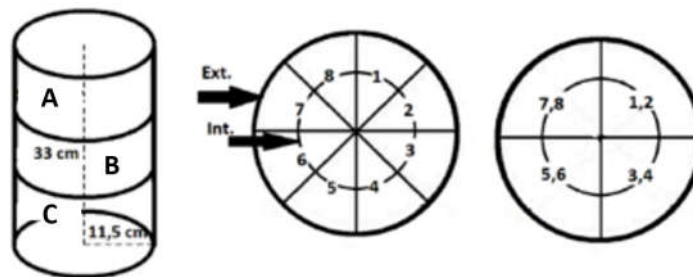


Figura 30 – Identificação das dimensões básicas do bloco e dos locais de caracterização da amostra reconstituída.

Como observado na Figura 29 o bloco foi dividido em sua altura em 3 partes A, B, C, sendo sempre a fatia A, a parte superior conforme o bloco foi moldado, a B a parte central e a C a parte inferior. Cada “andar” foi então dividido em 8 fatias para retirada de uma amostra triaxial de cada fatia, totalizando 24 amostras triaxiais por bloco.

Para os ensaios de caracterização física, se entendeu que seria interessante verificar as diferenças entre as partes interna e externa do bloco, para que se mantivesse a quantidade de 24 amostras por tipo de ensaio, se agrupou duas fatias de cada andar, ou seja, temos então 4 fatias por andar, mas comparações entre a parte interna e externa do bloco. O procedimento de reconstituição amostral foi validado avaliando a uniformidade e a homogeneidade da amostra.

### 3.1.2.6 Características físicas e de identificação

Uma abordagem mais quantitativa para a caracterização da uniformidade da amostra foi realizada comparando diferentes propriedades físicas e de identificação. Em primeiro lugar, as distribuições granulométricas determinadas (Figura 31), teor de umidade, densidade relativa G, além dos limites de liquidez e plasticidade (Tabela 4), mostraram que tanto na distribuição dos grãos, como a densidade de partículas sólidas (Gs), confirmam a homogeneidade da amostra.

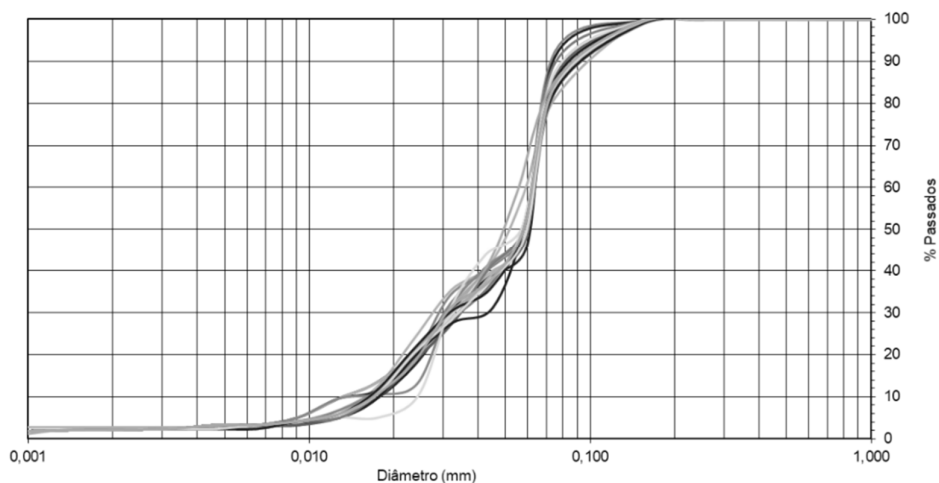


Figura 31 - Curvas granulométricas de amostras retiradas do bloco cilíndrico Torre de Moncorvo.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios de teor de umidade, densidade Relativa, limites de liquidez e plasticidade das amostras reconstituídas tipo Moncorvo.

| Propriedades físicas, amostras reconstituídas | Fatias | Resultados ensaios de identificação |       |      |       |      |       |      |       |  |
|---|--------|-------------------------------------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|--|
|   |        | 1                                   | 2     | 3    | 4     | 5    | 6     | 7    | 8     |  |
| Umidade (%)                                   | Aint   | 15                                  | 15    | 14   | 15    | 14   | 14    | 15   | 14    |  |
|   | Aext   | 14                                  | 14    | 16   | 14    | 14   | 14    | 15   | 15    |  |
|   | Bint   | 15                                  | 16    | 16   | 15    | 14   | 14    | 15   | 15    |  |
|   | Bext   | 16                                  | 15    | 15   | 16    | 15   | 15    | 16   | 15    |  |
|   | Cint   | 16                                  | 14    | 14   | 15    | 15   | 14    | 15   | 14    |  |
|   | Cext   | 16                                  | 14    | 16   | 15    | 16   | 16    | 15   | 14    |  |
| Densidade relativa                            | Aint   | 4,52                                |       | 4,92 |       | 4,78 |       | 4,54 |       |  |
|   | Aext   | 4,70                                |       | 5,05 |       | 4,56 |       | 4,68 |       |  |
|   | Bint   | 4,49                                |       | 4,63 |       | 4,73 |       | 4,54 |       |  |
|   | Bext   | 4,72                                |       | 4,73 |       | 4,53 |       | 4,80 |       |  |
|   | Cint   | 4,57                                |       | 4,81 |       | 4,40 |       | 4,47 |       |  |
|   | Cext   | 4,76                                |       | 4,61 |       | 4,50 |       | 4,69 |       |  |
| Limites de Atterberg (%)                      | Liq.   | Aint                                | 18,99 |      | 19,52 |      | 20,30 |      | 19,06 |  |
|   |        | Aext                                | 19,34 |      | 19,48 |      | 19,44 |      | 18,83 |  |
|   |        | Bint                                | 18,24 |      | 18,85 |      | 18,96 |      | 19,41 |  |
|   |        | Bext                                | 18,50 |      | 19,13 |      | 20,07 |      | 18,24 |  |
|   |        | Cint                                | 19,96 |      | 19,73 |      | 19,86 |      | 19,73 |  |
|   |        | Cext                                | 18,83 |      | 20,95 |      | 19,51 |      | 19,71 |  |
|   | Plas.  | Aint                                | 14,30 |      | 14,00 |      | 14,50 |      | 14,50 |  |
|   |        | Aext                                | 14,90 |      | 15,50 |      | 15,10 |      | 15,10 |  |
|   |        | Bint                                | 14,00 |      | 14,00 |      | 14,90 |      | 15,30 |  |
|   |        | Bext                                | 14,70 |      | 13,80 |      | 15,40 |      | 14,10 |  |
|   |        | Cint                                | 14,80 |      | 14,00 |      | 15,40 |      | 14,60 |  |
|   |        | Cext                                | 14,70 |      | 14,60 |      | 15,20 |      | 14,50 |  |

Visualmente o bloco não demonstra heterogeneidade aparente, tendo o método proposto resultado em amostras reconstituídas bastante uniformes e homogêneas, onde não são observadas segregações de partículas aparentes e/ou camadas macroscópicas ou outras características de problemas evidentes. Imagem do bloco imediatamente após retirada da carga de consolidação na Figura 32.



Figura 32- Aparência do bloco tipo Moncorvo logo após retirada da carga de consolidação.

Da mesma forma que para o Bloco com material sem nenhuma adição (tipo Moncorvo), para as amostras com adição de areia (tipo Brumadinho), foram realizados ensaios de caracterização para garantir a homogeneidade do bloco. Na Figura 33 temos os resultados das curvas granulométricas e na Tabela 5 os resultados de teor de umidade densidade relativa e limites liquidez e plasticidade.

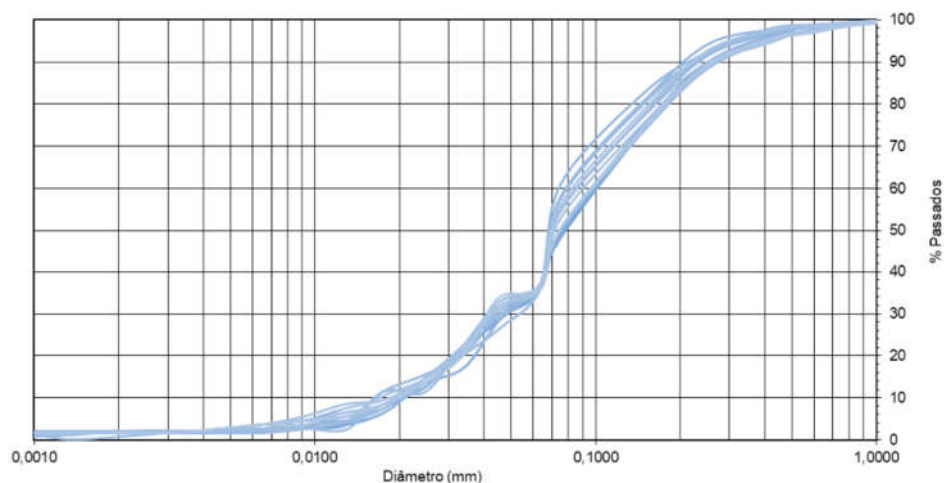


Figura 33 - Resultados das curvas granulométricas das amostras retiradas do bloco tipo Brumadinho.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de teor de umidade, densidade Relativa, limites de liquidez e plasticidade das amostras reconstituídas com areia (tipo brumadinho).

| Propriedades físicas, amostras reconstituídas | Fatia | Resultados ensaios de identificação |       |      |       |      |       |      |       |  |
|---|-------|-------------------------------------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|--|
|   |       | 1                                   | 2     | 3    | 4     | 5    | 6     | 7    | 8     |  |
| Umidade (%)                                   | Aint  | 13                                  | 13    | 13   | 14    | 13   | 13    | 13   | 13    |  |
|   | Aext  | 13                                  | 13    | 13   | 13    | 14   | 15    | 12   | 12    |  |
|   | Bint  | 13                                  | 15    | 13   | 13    | 13   | 13    | 14   | 13    |  |
|   | Bext  | 14                                  | 14    | 13   | 14    | 14   | 13    | 13   | 12    |  |
|   | Cint  | 13                                  | 13    | 14   | 13    | 12   | 12    | 14   | 16    |  |
|   | Cext  | 14                                  | 13    | 13   | 14    | 13   | 13    | 13   | 13    |  |
| Densidade Relativa                            | Aint  | 3,55                                |       | 3,64 |       | 3,63 |       | 3,67 |       |  |
|   | Aext  | 3,64                                |       | 3,67 |       | 3,71 |       | 3,72 |       |  |
|   | Bint  | 3,56                                |       | 3,82 |       | 3,58 |       | 3,50 |       |  |
|   | Bext  | 3,67                                |       | 3,65 |       | 3,59 |       | 3,74 |       |  |
|   | Cint  | 3,65                                |       | 3,62 |       | 3,68 |       | 3,68 |       |  |
|   | Cext  | 3,64                                |       | 3,72 |       | 3,71 |       | 3,61 |       |  |
| Limites de Atterberg (%)                      | Liq.  | Aint                                | 17,61 |      | 18,53 |      | 17,54 |      | 17,12 |  |
|   |       | Aext                                | 18,49 |      | 17,77 |      | 17,23 |      | 16,67 |  |
|   |       | Bint                                | 17,74 |      | 17,90 |      | 17,30 |      | 17,73 |  |
|   |       | Bext                                | 17,35 |      | 18,10 |      | 17,18 |      | 18,03 |  |
|   |       | Cint                                | 17,37 |      | 17,75 |      | 17,47 |      | 17,03 |  |
|   |       | Cext                                | 18,52 |      | 18,43 |      | 17,84 |      | 17,51 |  |
|   | Plas. | Aint                                | 15,00 |      | 14,70 |      | 14,80 |      | 15,00 |  |
|   |       | Aext                                | 15,00 |      | 15,00 |      | 14,70 |      | 13,90 |  |
|   |       | Bint                                | 15,00 |      | 14,60 |      | 14,20 |      | 14,70 |  |
|   |       | Bext                                | 14,90 |      | 15,00 |      | 14,80 |      | 14,90 |  |
|   |       | Cint                                | 14,90 |      | 14,70 |      | 14,40 |      | 14,70 |  |
|   |       | Cext                                | 14,60 |      | 15,10 |      | 14,10 |      | 14,70 |  |

### 3.1.2.7 Comportamento mecânico

Em relação ao comportamento mecânico, foram realizados ensaios edométricos, retirando amostras do topo (A) e da base (C) do bloco, comparadas entre si, e comparadas com ensaios edométricos realizados com amostras indeformadas. Nesta mesma linha foram feitos ensaios triaxiais de compressão não drenada com amostras de diferentes locais do bloco e comparadas com amostras indeformadas. Na Figura 34 estão apresentados os resultados dos ensaios edométricos e na Figura 35 os resultados dos ensaios triaxiais.

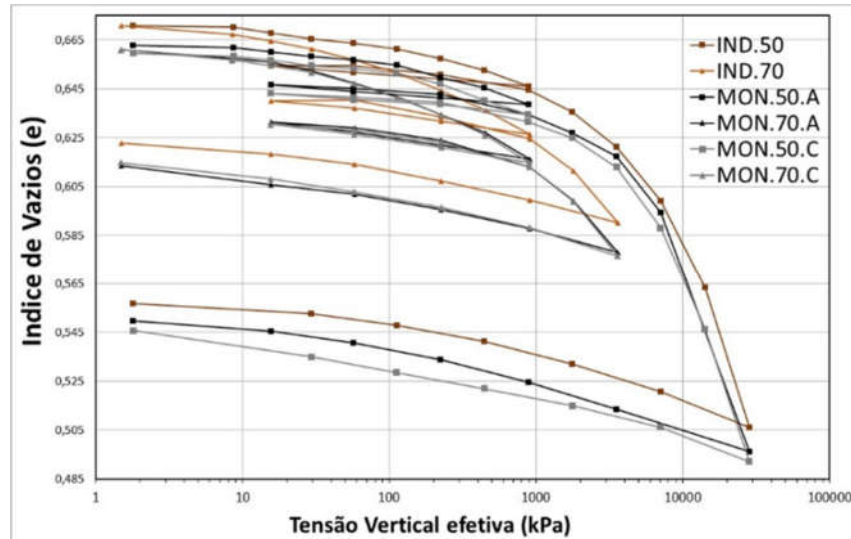


Figura 34 - Comparativo do comportamento entre amostras indeformadas e reconstituídas no ensaio edométrico para amostras moldadas em anel de 50 e 70 mm.

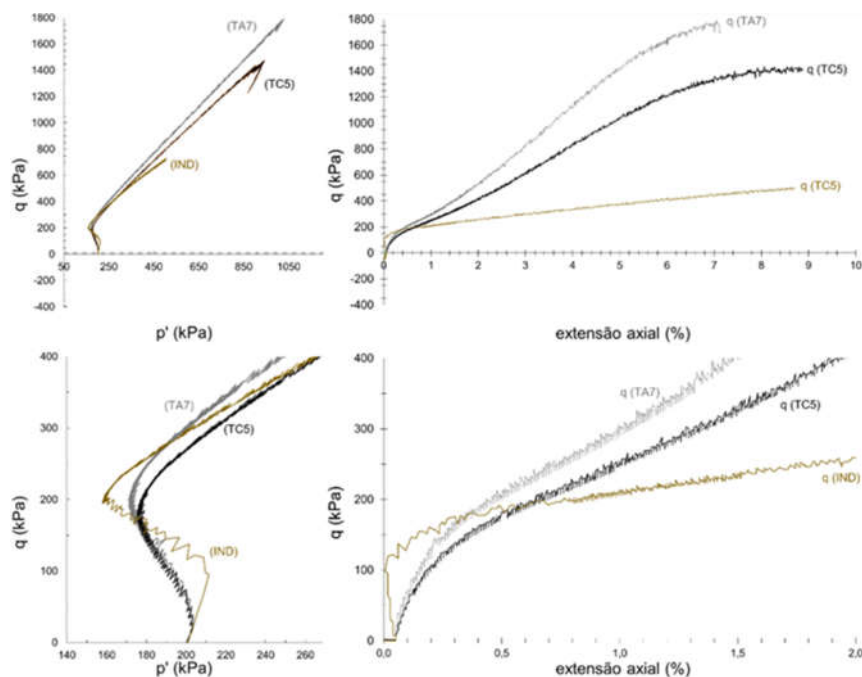


Figura 35- Resultados de ensaios triaxiais em amostras reconstituídas de diferentes locais do bloco e uma amostra indeformada.

O mesmo procedimento realizado para o bloco Moncorvo foi repetido para o bloco brumadinho, foram feitos ensaios edométricos e triaxiais, retirando amostras do topo (A) e da base (C) do bloco, comparadas entre si. Resultados dos ensaios edométricos na Figura 36 e triaxiais na Figura 37.

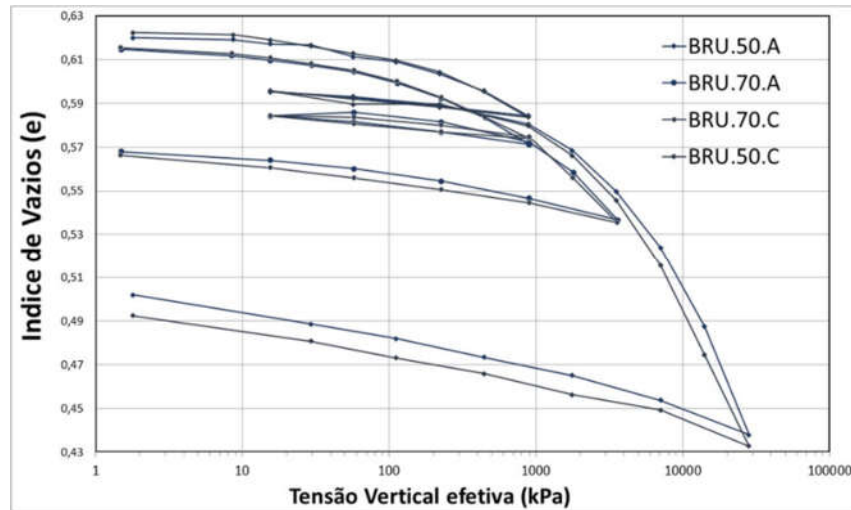


Figura 36 - Comparativo do comportamento entre amostras do topo (A) e da Base (C) do bloco Brumadinho em ensaio edométrico para amostras moldadas em anel de 50 e 70 mm.

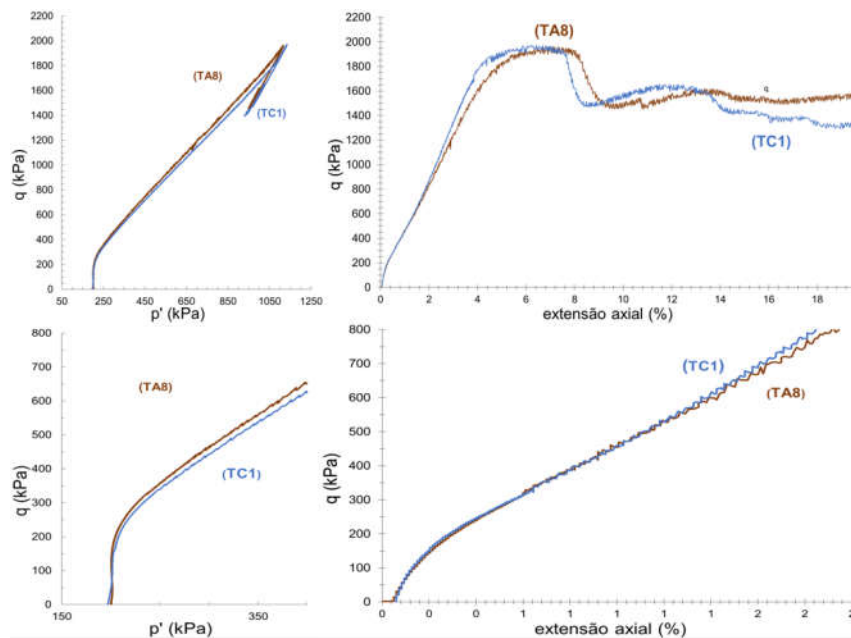


Figura 37- Resultados de ensaios triaxiais em amostras reconstituídas tipo brumadinho de diferentes locais do bloco (topo A e base C).

Após a obtenção dos resultados dos ensaios para a verificação do processo de reconstituição, pode-se observar que em relação a homogeneidade da amostra, o método aparenta ser realmente efetivo para este material, seja em relação as características físicas e de identificação ou em relação ao seu comportamento mecânico.



## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 4.1 AMOSTRAS MONCORVO, INDEFORMADAS E RECONSTITUIDAS

#### 4.1.1 Características físicas e de identificação

##### 4.1.1.1 Composição física e mineralógica

Na Figura 38 estão apresentadas as curvas com os resultados de um total 24 ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação. Como comparativo além da Figura 8, a Figura 39 apresenta curvas obtidas em amostras de rejeito da barragem Brumadinho pós acidente.

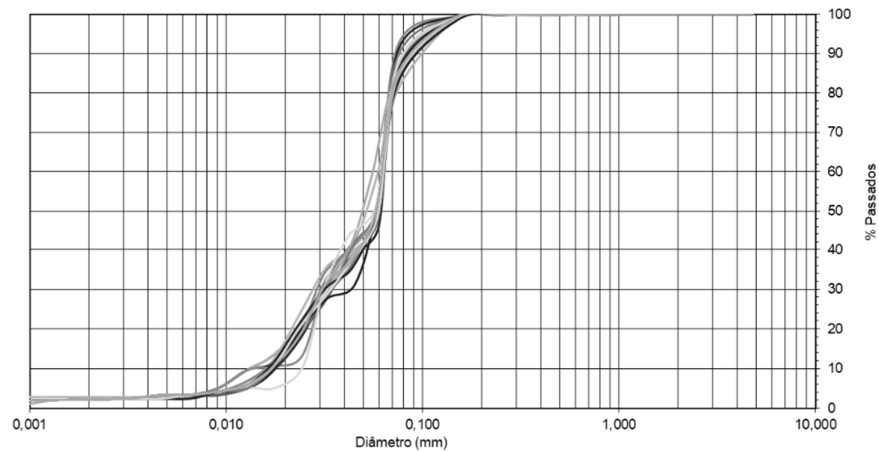


Figura 38- Resultados de 24 curvas granulométricas de amostras das minas de Moncorvo em Portugal.

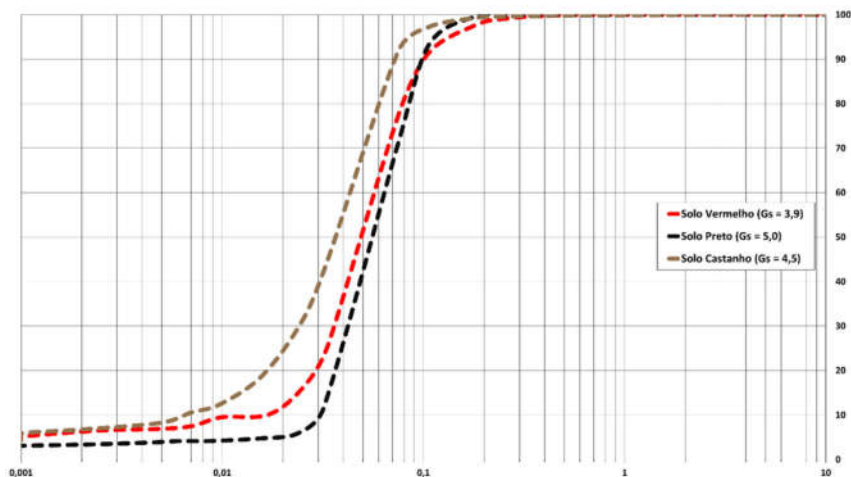


Figura 39 - Curvas consideradas representativas de 3 diferentes tipos de solo ensaiado nos rejeitos de minério de ferro após rompimento da barragem Brumadinho apresentados em relatório de análises computacionais da ruptura da barragem córrego do feijão em Brumadinho (agosto, 2021).

O material tem curva granulométrica semelhante ao encontrado na literatura, inclusive dentro do intervalo de curvas obtidas em ensaios realizados nos rejeitos de minério de ferro da barragem de Brumadinho (Fig. 8), que são referentes a ensaios realizados anteriormente ao rompimento da barragem, e curvas obtidas em ensaios posteriores ao rompimento apresentadas em relatório publicado em 2021 (Figura 38). Solo que tem 99 % de material passante na peneira de abertura 0,6 mm e com grãos que não demonstram ser menores que 0,010 mm, faixa granulométrica que define o material como um Silte. Vale ressaltar que talvez o método de ensaios por sedimentação pode não ser ideal para a análise deste material em função da presença de materiais com duas densidades bem distintas (quartzo 2,65 g/cm<sup>3</sup> e ferro 7,87 g/cm<sup>3</sup>). Mas em função de que as curvas que foram utilizadas como comparativo fizeram uso desta técnica, ficou definido que as análises granulométricas seriam realizadas nos mesmos moldes.

#### 4.1.1.2 Índices Físicos

Foram realizados 24 ensaios de peso específico relativo das partículas (G), que já foram apresentados em sua totalidade na Tabela 4, com valor médio 4,69. O valor obtido é um valor elevado se comparado com valores de G para solos convencionais, que geralmente tem valores em torno de 2,7. Estes valores elevados são devido à grande presença do mineral ferro na sua composição. Os resultados são também compatíveis com valores encontrados em materiais semelhantes conforme já demonstrado nos resultados de Silva 2010 expostos na tabela 1 com G entre 4,02 e 5,11, e se observar na figura 36 solos com G de 4,5 e 5,0 confirmando os resultados.

O percentual de umidade das amostras indeformadas em campo foi de 5,56 %, valores inferiores ao descritos em resultados obtidos em rejeitos de minério de ferro, como exemplo o dado apresentado na tabela 1 de 16 %. Esta diferença se deve principalmente à forma que estes materiais estavam dispostos. No caso da amostra obtida em Moncorvo o material estava disposto como uma pequena pilha em local elevado e em região com baixos índices de chuva, já as amostras ensaiadas por Silva (2010) da Tabela 1, foram obtidas em uma praia de rejeitos da barragem de Brumadinho, os materiais dispostos desta forma em geral estão saturados com grandes quantidades de água, isso com certeza interferiu nesta diferença de valores entre os dois resultados.

#### 4.1.1.3 Plasticidade

Os resultados dos ensaios para a obtenção dos Limites de Atterberg apresentado na tabela 4 foram realizados um total de 24 ensaios de Limite de Liquidez e 24 ensaios de Limite de Plasticidade, com valores médios de 19,36 % para Limite de Liquidez e 14,66 % para Limite de Plasticidade. Estes resultados são valores dentro do já encontrado na literatura para materiais deste tipo como os expostos na Tabela 1 wP entre 14 e 24 % e wL de 18 a 33 %. Vale lembrar que é muito frequente que esses materiais se apresentem como materiais não plásticos, principalmente quando apresenta granulometria mais grosseira.

#### 4.1.1.4 Mineralogia

Não foram feitas análises para a avaliação da composição mineral do material, mas devido a sua característica visual e seu G, é possível perceber que se trata de um material com alto teor de ferro. Conforme Figura 40 com tabela apresentada por Ribeiro (2000) com algumas relações de massa específica dos grãos e teor de ferro, é possível afirmar que este teor pode ser superior a 75%.

| (%) Fe | $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) |
|--------|-------------------------------|
| 72,4   | 4,41                          |
| 34,4   | 3,46                          |
| 22,4   | 3,16                          |
| 19,6   | 3,09                          |

Figura 40 - Relação de massa específica dos grãos e teor de ferro em rejeito de minério de ferro, Ribeiro (2000).

#### 4.1.2 Permeabilidade

Na Figura 41 estão apresentados os resultados dos ensaios de percolação realizado imediatamente após etapa de consolidação das amostras triaxiais.

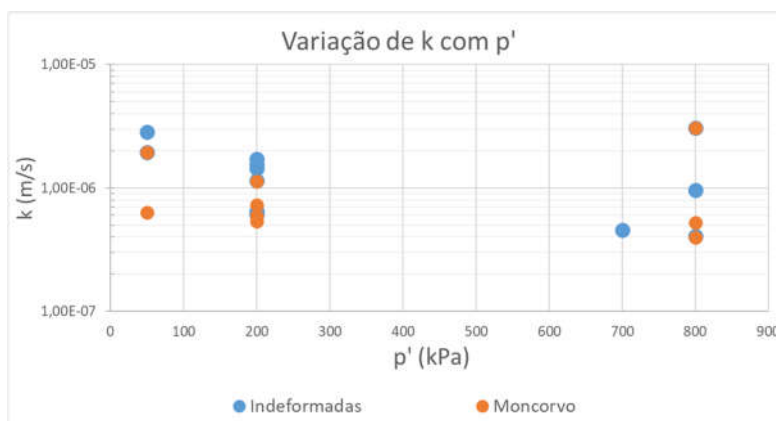


Figura 41- Resultados dos ensaios de permeabilidade realizados pós etapa de consolidação dos ensaios triaxiais nas amostras indeformadas e reconstituídas tipo Moncorvo.

Apesar de os valores de permeabilidade encontrados serem coerentes com a literatura para os índices da vazios semelhantes aos obtidos nas amostras (Fig.9), é possível observar que não ocorreu uma relação direta entre as tensões de consolidação e as permeabilidades.

O que geralmente seria esperado é uma redução da permeabilidade em função do aumento da tensão de consolidação, isso faz todo o sentido afinal quanto maior é a tensão de consolidação menor o índice de vazios ou porosidade, ou seja, maior renitência a passagem de água. Talvez o tempo reduzido do ensaio ( $\cong$  3 min) ou pequena diferença de carga 10 kPa podem ser resultado em resultados conflitantes. Além de claro uma possível percolação ao entorno do corpo de prova ou mesmo imperícia na realização do ensaio.

### 4.1.3 Comportamento Mecânico

#### 4.1.3.1 Compressão unidimensional

Os resultados dos ensaios em relação a compressão unidimensional podem ser observados na Figura 42, destaque para as linhas de definidas para obtenção dos índices de compressão e recompressão ( $C_c$  e  $C_r$ ), com seus resultados expostos na Tabela 6.

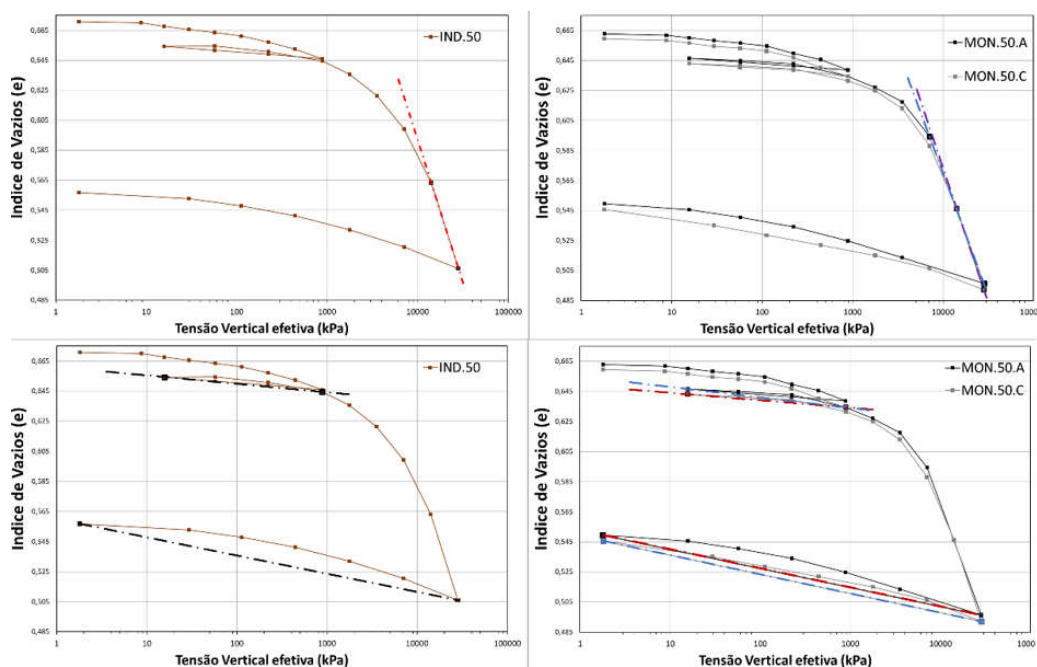


Figura 42 - Resultados dos ensaios edométricos realizados em amostras Indeformadas (IND.50) e em amostras reconstituídas (MON.50.A e MON.50.C), com as linhas a demonstração das linhas utilizadas para definição dos índices de compressão ( $C_c$ ) e recompressão ( $C_r$ ).

Tabela 6 - Resultados de índices de compressão ( $C_c$ ) e índices de recompressão ( $C_r$ ) das amostras Indeformadas e reconstituídas tipo Moncorvo.

| Amostras  | Índice de compressão ( $C_c$ ) | Índice de recompressão ( $C_r$ ) |
|-----------|--------------------------------|----------------------------------|
| IND.50    | 0,190                          | 0,010 – 0,051                    |
| MON.50. A | 0,163                          | 0,012 – 0,053                    |
| MON.50. C | 0,180                          | 0,009 – 0,054                    |

Podemos observar respostas muito parecidas, apesar de as amostras indeformadas terem apresentado um índice de vazios inicial levemente superior. Isso provavelmente se deve ao fato de que estas amostras foram retiradas em local superficial do terreno, e possivelmente a carga de pré-consolidação (50 kPa) utilizada no método para obtenção das amostras indeformadas se mostrou superior ao que o material havia sido exposto em campo. Em relação aos índices de compressão e recompressão é possível observar na Tabela 6 que existe grande semelhança entre os resultados obtidos. Acabou que a amostra MON.50. A acabou por ter um resultado levemente

discrepante entre os outros em relação ao  $C_c$ , isto provavelmente se deve a uma falha no momento do ensaio. Ocorreu que exatamente o penúltimo ponto de compressão acabou por não ter sido feito, se pulou do antepenúltimo para o último, isso pode ter alterado a inclinação da reta para definição do parâmetro. De qualquer forma houve uma dificuldade em encontrar uma reta entre mais de dois pontos, seja no trecho inicial, final ou nas fazes de descarga ou recarga, tanto que as retas de recompressão inicial e final demonstraram inclinações diferentes e por isso foram calculados dois valores de  $C_r$ . Em função desta dificuldade, foram definidos os pontos de forma semelhante em todos os ensaios para efeito comparativo.

#### 4.1.3.2 Comportamento tensão-deformação-resistência ao corte

Para a obtenção de parâmetros de tensão- deformação e resistência ao corte para amostras Indeformadas e reconstituídas tipo Moncorvo, foram realizados ensaios triaxiais de compressão e extensão não drenados. Na Tabela 7 temos um resumo dos ensaios.

Tabela 7 - Resumo dos ensaios triaxiais em amostras indeformadas e reconstituídas tipo Moncorvo.

| Amostras       | tipo de ensaio | Teor em água (w%) | Índice de vazios (e) | Parâmetro B |
|----------------|----------------|-------------------|----------------------|-------------|
| IND.CND.50kPa  | CND            | 13,90             | 0,652                | 0,98        |
| IND.CND.200kPa | CND            | 13,69             | 0,642                | 0,97        |
| IND.CND.800kPa | CND            | 13,52             | 0,634                | 0,98        |
| IND.END.50kPa  | END            | 13,94             | 0,654                | 1,00        |
| IND.END.200kPa | END            | 13,72             | 0,643                | 0,99        |
| IND.END.800kPa | END            | 13,53             | 0,634                | 0,97        |
| -              | -              | -                 | -                    | -           |
| MON.CND.50kPa  | CND            | 13,76             | 0,645                | 0,98        |
| MON.CND.200kPa | CND            | 13,52             | 0,634                | 1,00        |
| MON.CND.800kPa | CND            | 13,35             | 0,626                | 0,97        |
| MON.END.50kPa  | END            | 13,73             | 0,644                | 1,00        |
| MON.END.200kPa | END            | 13,49             | 0,633                | 1,00        |
| MON.END.800kPa | END            | 13,30             | 0,624                | 0,99        |

Na Figura 43 temos a representação dos resultados dos ensaios de compressão e extensão triaxial no plano  $p', q$  para as amostras indeformadas, também estão representadas as suas respectivas evoluções da tensão de desvio ( $q$ ) em relação a deformação, evolução da variação do poro pressão ( $D_u$ ), e o comportamento da relação entre  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ , para cada uma das tensões de consolidação. É possível observar uma diferença de comportamento entre as amostras submetidas a 200 kPa e 800 kPa para a de 50 kPa, as duas primeira (200 kPa e 800 kPa), apresentaram trajetórias para a esquerda, indicando um aumento no poro pressão, até que determinado ponto se direciona para a direita reduzindo os excessos de poro pressão, indicando um endurecimento até o término do ensaio.

Já a de 50 kPa gera uma quantidade de excessos de poro pressão inicial muito inferior, praticamente não tendo deslocamento a esquerda ( $p', q$ ). Se observarmos a variação de poro pressão ( $D_u$ ), vamos perceber que a amostra 50 kPa tem um comportamento inicial com tendência a dilatar se comparado as outras duas. Este comportamento não é percebido nas

amostras de 200 kPa e 800 kPa. O resultado para a amostra de 50 kPa, indica que com este índice de vazios, neste estado de tensões, a amostra não apresenta excessos de poro pressão iniciais significativos, ou comportamento com tendência a contrair.

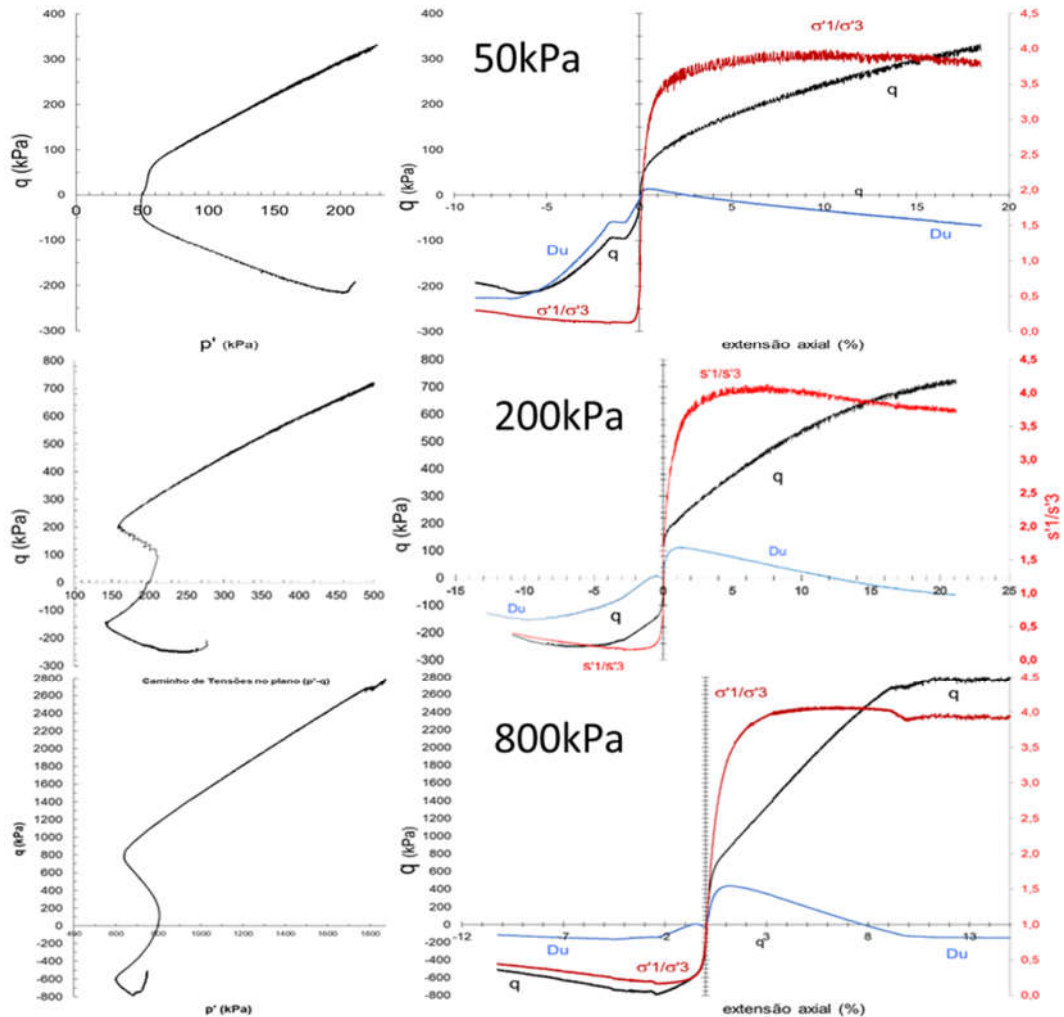


Figura 43 - Representação dos resultados dos ensaios de compressão e extensão triaxial (plano  $p'$ ,  $q$ ) ( $Du$ ) e  $(\sigma_1 / \sigma_3)$  para as amostras indeformadas.

Com o intuito de comparação as amostras reconstituídas tipo Moncorvo foram testadas nas mesmas condições das amostras indeformadas. Quando comparado a amostras tipo Moncorvo e as amostras indeformadas obviamente que as características físicas são exatamente os mesmos, já que as amostras são remexidas e se trata do mesmo material, mas sempre é muito difícil reproduzir todas as características encontradas em campo.

Mas de forma geral podemos observar algumas semelhanças entre os resultados das amostras indeformadas e reconstituídas tipo Moncorvo. Existe uma tendência geral da trajetória de tensões no plano  $p'$ ,  $q$  de gerar excesso de poro pressões iniciais fazendo a curva se direcionar para a esquerda ( $p'$ ,  $q$ ), até certo ponto e a partir de então ir para a direita até a finalização do ensaio. É visível que no caso das amostras reconstituídas tipo Moncorvo ocorre um excesso de

poro pressões iniciais menos acentuadas, provavelmente em função de estas amostras terem tido índices de vazios levemente inferiores as amostras indeformadas. Outro destaque é o fato de a amostra que foi submetida a tensões de consolidação de 50 kPa, teve neste caso maior semelhança de comportamento com as submetidas a outros estados de tensão. Talvez isso indicaria que o solo em estado natural sofreu uma carga de pré-consolidação no campo superiores aos 50 kPa que foram aplicados nos blocos para reconstituição.

Na Figura 44 podemos observar os resultados. Vale ressaltar que os resultados que dependiam da extensão axial na amostra submetida a 800 kPa, por problemas na execução do ensaio acabaram por ficar prejudicados, e a falta de amostras não permitiu a repetição do ensaio.

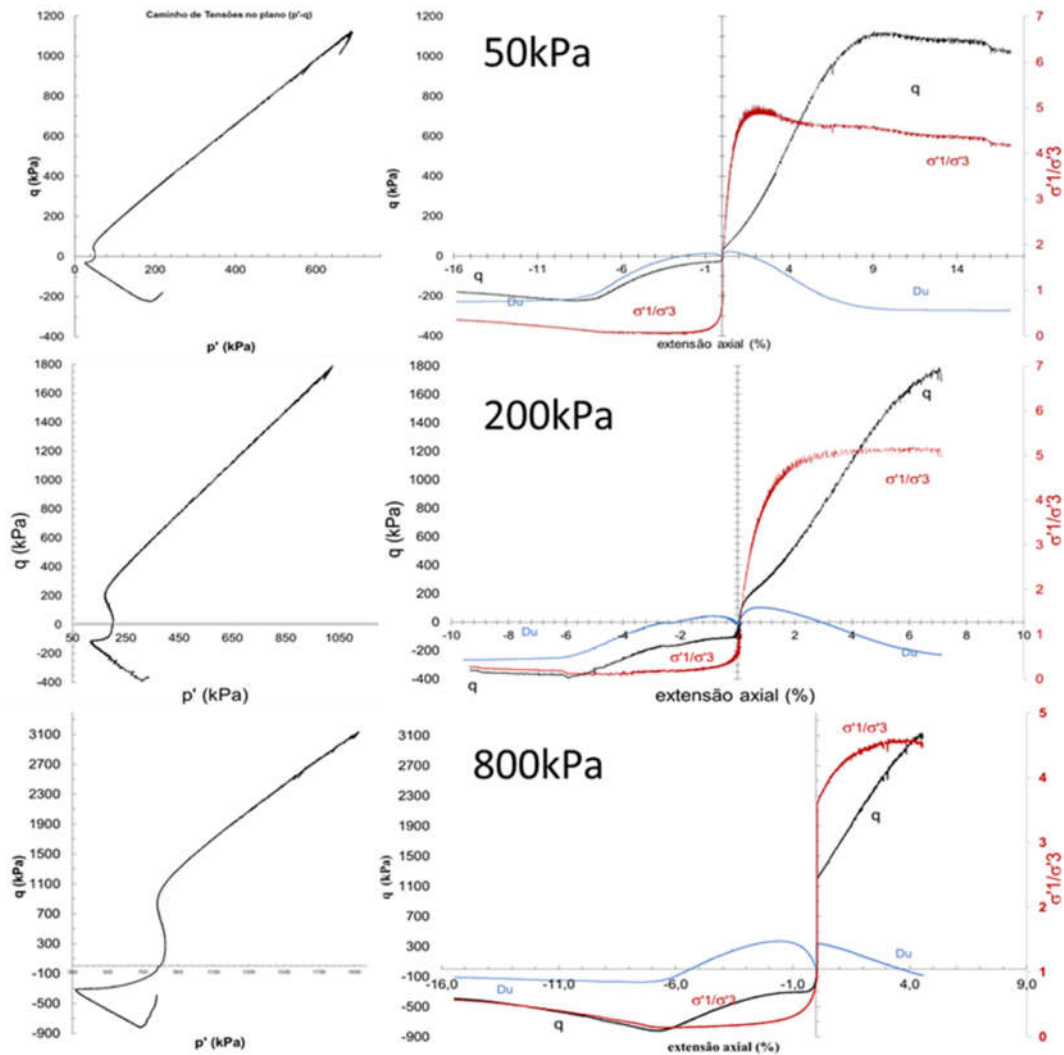


Figura 44- Representação dos resultados dos ensaios de compressão e extensão triaxial (plano  $p'$ ,  $q$ ) ( $Du$ ) e  $(\sigma'_1 / \sigma'_3)$  para as amostras reconstituídas tipo Moncorvo.

Com os resultados obtidos e interpretados em termos do espaço  $p'$ - $q$  foram feitas tentativas de se determinar as linhas de transformação de fase (LTF) e a linha de estados críticos (LEC), tanto para as amostras indeformadas quanto para as amostras reconstituídas tipo Moncorvo.

A Figura 45 temos os ensaios de compressão e extensão com as representações das possíveis linhas de estado crítico e de transformação de fase para amostras indeformadas.

Os pontos para determinação da LEC foram determinados a partir do maior valor da relação entre  $\sigma'1$  e  $\sigma'3$ , e para a LTF foram determinados a partir do menos valor de  $p'$  ( $p', q$ ). Foram ainda determinados o  $M$ , o ângulo de atrito no estado crítico ( $\Phi'_{LEC}$ ) e o ângulo de atrito na linha de transformação de fase ( $\Phi_{LTF}$ ) tanto para compressão com extensão.

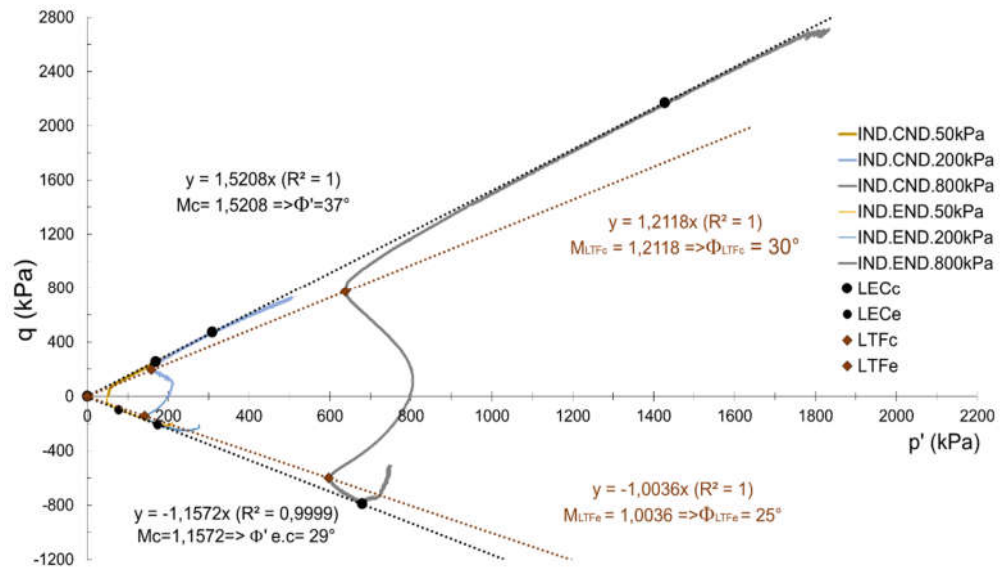


Figura 45 - Ensaio de compressão e extensão não drenados em amostras indeformadas com a representação da LEC e LTF.

Os resultados demonstram boa coerência entre as curvas no que se refere a possível definição tanto da LEC quanto da LTF, obtendo  $R^2$  muito próximos de 1 para todos os casos. Como já pode ter sido percebido os resultados de compressão e extensão são diferentes, sempre em ensaios de extensão se obtendo valores de  $\Phi$  inferiores ao de compressão. A mesma avaliação foi feita para amostras reconstituídas tipo Moncorvo, com as definições dos pontos feitas com os mesmos critérios.

As amostras tipo Moncorvo apresentaram valores de  $\Phi'$  e  $\Phi_{LTF}$ , semelhantes aos obtidos com as amostras indeformadas, principalmente em relação aos ensaios de extensão. Outro fator evidente é que a diferença entre a transformação de fase e o estado crítico é maior nas amostras reconstituídas, ou seja, como se nas amostras indeformadas o estado crítico estivesse mais próximo da linha de transformação de fase do que para as amostras reconstituídas.

Destaque para o ensaio da amostra indeformada 50 kPa, onde não foi possível determinar o valor de menor  $p'$ , já que como citado anteriormente não ocorre excessos de poro pressão nesta amostra e não temos um movimento inicial para a esquerda ( $p', q$ ). Os resultados das determinações da  $\Phi'_{LEC}$  e  $\Phi_{LTF}$ , em ensaios de compressão e extensão para amostras reconstituídas tipo Moncorvo estão na Figura 46.



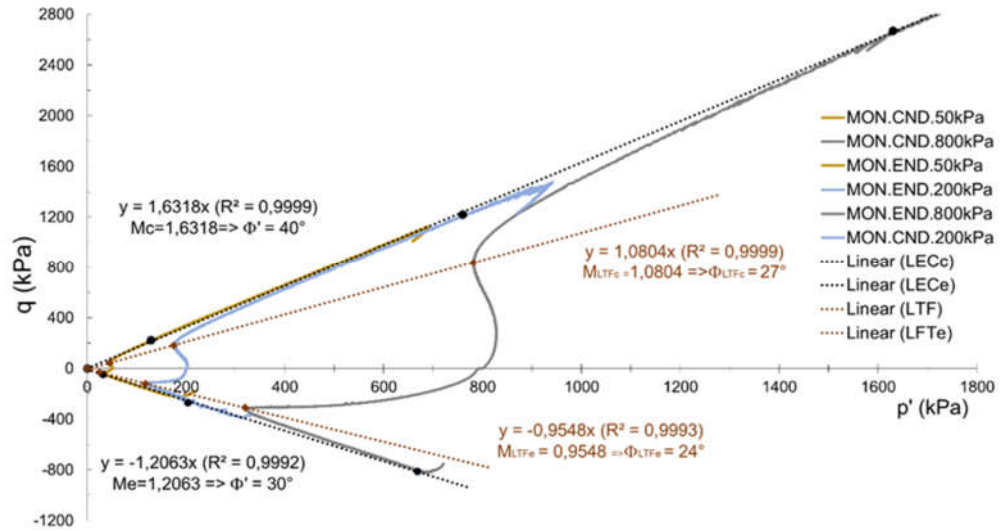


Figura 46- Resultados das determinações da  $\Phi'_{LEC}$  e  $\Phi_{LTF}$ , de compressão e extensão para amostras reconstituídas tipo Moncorvo.

Na Figura 47 foram plotados todos os resultados de ensaios realizados nas amostras indeformadas e reconstituídas tipo Moncorvo, juntamente com seus respectivos ensaios de compressão unidimensional (edométrico), com o objetivo de tentar identificar a sua LEC, como comparativo foram plotadas as curvas obtidas por Murthy, (2007), com diferentes percentuais de silt.

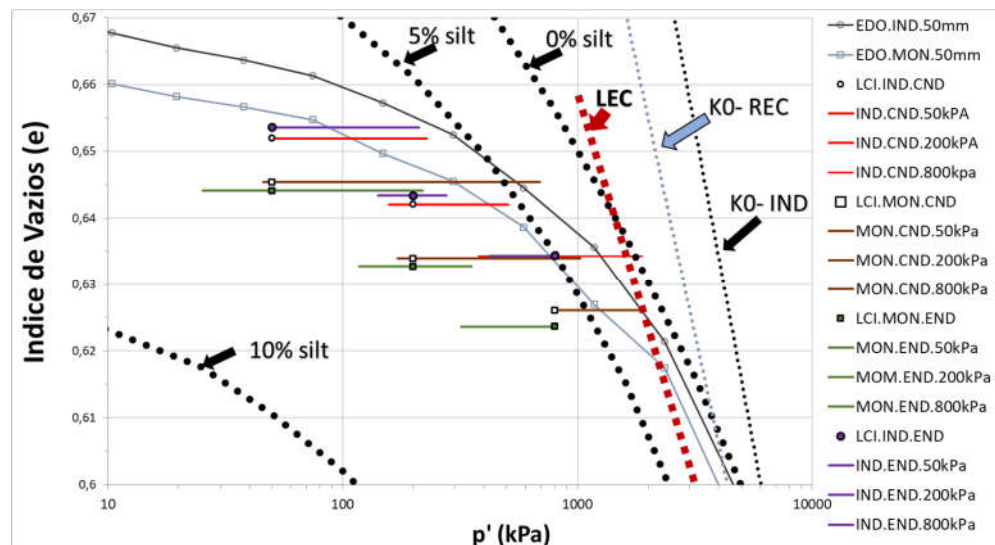


Figura 47 - Resultados ensaios de compressão e extensão em amostras Indeformadas e reconstituídas tipo Moncorvo, plano  $p'$ , e.

Como é possível observar na figura 47 nem todas as amostras atingiram, a LEC, o autor entendeu que aparentemente tinha atingido poro pressão e tensão constantes (IND.CND.800kPa, Figura 43), por se ter somente um ponto e as curvas do ensaio edométrico não apresentar um tendencia de reta, se optou por calcular a inclinação da reta pela linha de consolidação do ensaio edométrico (K0). Os resultados estão indicados na Tabela 10.

## 4.2 AMOSTRAS COM AREIA (RECONSTITUIDAS TIPO BRUMADINHO)

### 4.2.1 Características físicas e de identificação

#### 4.2.1.1 Composição física e mineralógica

As curvas granulométricas das amostras tipos Brumadinho podem ser observados na Figura 47, e comparadas não só a Figura 8 deste documento como a Figura 48, indicando que estas estão dentro do que é esperado para este tipo de material. Vale destacar que as curvas estão dentro do intervalo para o qual foram produzidas, atendendo assim o objetivo inicial, com apenas uma pequena variação próxima ao valor da abertura da peneira #200.

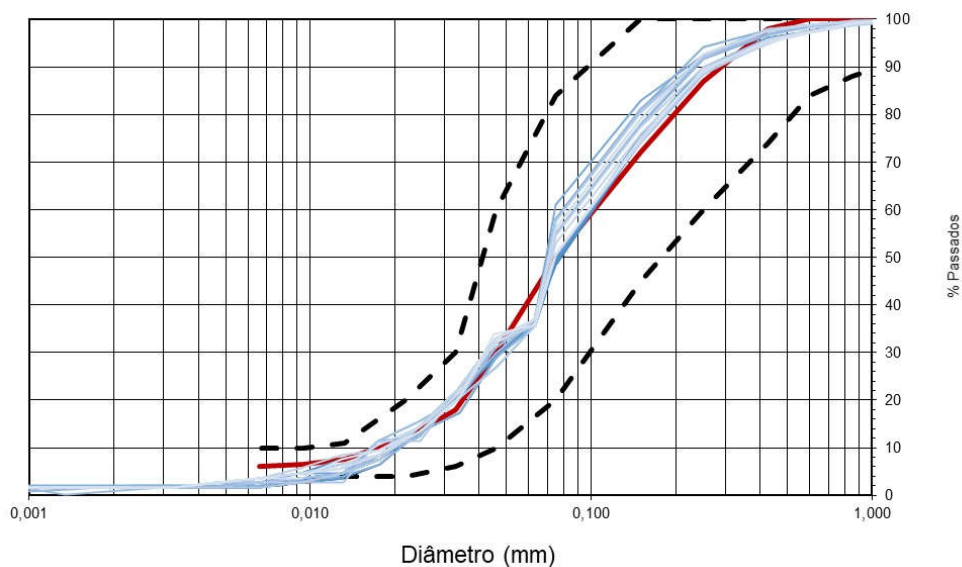


Figura 48- Curvas granulométricas das amostras reconstituídas tipo brumadinho e intervalo das curvas obtidas por Silva (2010) para o material oriunda da barrem córrego do Feijão em Brumadinho.

Da mesma forma que para as amostras tipo Moncorvo material tem curva granulométrica semelhante ao encontrado na literatura, mas teve uma leve mudança em sua inclinação, passando a ser mais bem graduada em relação as curvas anteriores, provavelmente pela adição de novos tamanhos de grão em sua composição.

Neste caso temos uma granulometria mais grosseira que o material anterior, com cerca de 50 % do solo composto por Areia fina e seus outros 50 % Silte. Novamente destaco o fato de que talvez o método de ensaios por sedimentação pode não ser ideal para a análise deste material em função da presença de materiais com duas densidades bem distintas (quartzo  $2,65 \text{ g/cm}^3$  e ferro  $7,87 \text{ g/cm}^3$ ), por esse motivo propositalmente se optou por somente adicionar os materiais que eram possíveis de se medir por peneiramento, evitando as interferências do suas respectivas densidades.

#### 4.2.1.2 Índices Físicos

Foram realizados 24 ensaios de peso específico relativo das partículas (G), que já foram apresentados em sua totalidade na Tabela 5, com valor médio 3,65, Valor inferior ao obtido nas amostras tipo Moncorvo, o que é esperado já que foi adicionado ao material grande quantidade de partículas de quartzo. Mesmo com uma redução significativa de 4,69 para 3,65 ainda podem ser considerados valores elevados se comparados a solos convencionais, ainda devido à grande presença do mineral ferro na sua composição. Novamente são resultados compatíveis com valores encontrados em materiais semelhantes.

O percentual de umidade das amostras foi de 13,38 %, valores inferiores ao descritos em resultados obtidos nas amostras tipo Moncorvo, isso pode ter ocorrido devido a alteração da inclinação da curva granulométrica, tornando o material com uma característica de mais bem graduado que o material anterior, isso deve em tese ter reduzido mesmo que levemente o seu índice de vazios em relação as amostras tipo Moncorvo.

#### 4.2.1.3 Plasticidade

Os resultados dos ensaios para a obtenção dos Limites de Atterberg apresentado na tabela 5 foram realizados um total de 24 ensaios de Limite de Liquidez e 24 ensaios de Limite de Plasticidade, com valores médios de 17,68 % para Limite de Liquidez e 14,72 % para Limite de Plasticidade. Em relação ao limite de liquidez, o valor levemente inferior aos obtidos nas amostras tipo Moncorvo parecem ser coerentes já que solos mais arenosos (9 ou maiores tamanhos de grãos) tendem a ter limites inferiores aos valores obtidos em solos de menos granulometria, isso independente da mineralogia que também pode ser significativa.

Já o Limite de plasticidade teve ligeiramente superior, talvez em função do empirismo do ensaio, poderia ser considerado como resultados iguais, o que diverge do esperado conforme citado o que já foi citado em relação ao limite de Liquidez. Fato é que em função do ensaio ser realizado somente com material passante na peneira n°40 com abertura 0,425 mm, a adição do material com maior granulometria pode ter causado um menos impacto neste ensaio específico.

#### 4.2.1.4 Mineralogia

Neste caso também não foram feitas análises para a avaliação da composição mineral do material, mas devido a sua característica visual e seu G, é possível perceber que se trata de um material com alto teor de ferro, mas valor reduzido se comparado ao material anterior. Conforme Figura 39 é possível dizer que o teor de ferro que estava por volta de 75 % ou mais agora pode estar na faixa de 40 %.

#### 4.2.2 Permeabilidade

Na Figura 49 estão apresentados os resultados dos ensaios de percolação realizado imediatamente após etapa de consolidação das amostras triaxiais reconstituídas tipo Brumadinho.



Figura 49 - Resultados dos ensaios de permeabilidade realizados pós etapa de consolidação dos ensaios triaxiais nas amostras indeformadas tipo brumadinho.

Os valores de permeabilidade encontrados são coerentes com a literatura (ver Fig.9), e ficam muito próximos da faixa de valor obtida nas amostras Indeformadas e tipo Moncorvo, e novamente é possível observar que não ocorreu uma relação direta entre as tensões de consolidação e as permeabilidades.

#### 4.2.3 Comportamento Mecânico

##### 4.2.3.1 Compressão unidimensional

Para as amostras tipo Brumadinho também foram feitos ensaios edométricos do topo (A) e da base (C). Os resultados dos ensaios em relação a compressão unidimensional podem ser observados na Figura 50, destaque para as linhas de definidas para obtenção dos índices de compressão e recompressão ( $C_c$  e  $C_r$ ), com seus resultados expostos na Tabela 8.

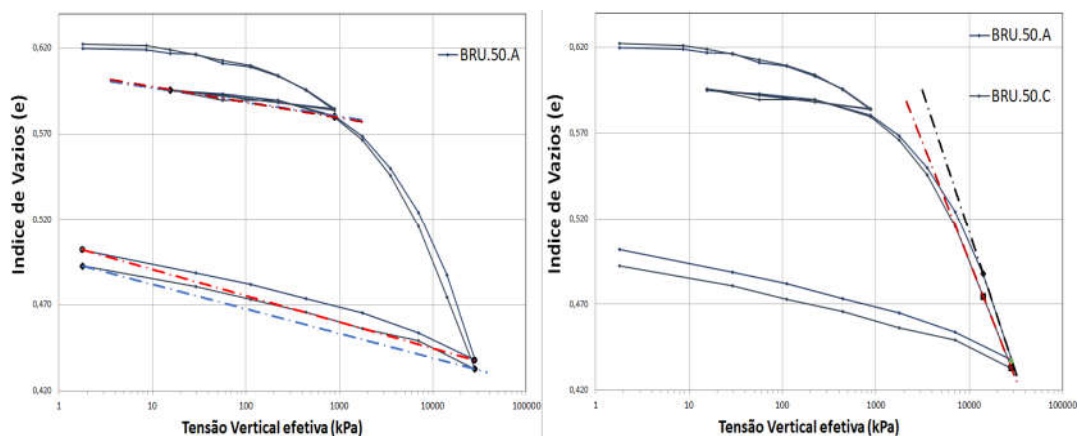


Figura 50 – Comparativo entre amostras do topo e base do bloco com areia 50 e 70 mm, com as linhas a demonstração das linhas utilizadas para definição dos índices de compressão ( $C_c$ ) e recompressão ( $C_r$ ).

Tabela 8 - Resumo dos resultados de Cc e Cr para amostras tipo brumadinho.

| Amostra   | Índice de compressão (Cc) | Índice de recompressão (Cr) |
|-----------|---------------------------|-----------------------------|
| BRU.50. A | 0,165                     | 0,015 – 0,064               |
| BRU.50. C | 0,139                     | 0,016 – 0,060               |

Podemos observar respostas muito parecidas entre as amostras de topo (A) e de base (C), comprovando a boa repetibilidade entre amostras de pontos bem diferentes do bloco. Em relação aos índices de compressão e recompressão é possível observar na Tabela 8 que existe grande semelhança entre nos resultados obtidos, novamente tendo uma diferença nas inclinações das retas entre a primeira e a segunda fase de descarga, e com valores levemente inferiores ao obtidos pelas amostras indeformadas e tipo Moncorvo. Como nas amostras anteriores, o comportamento de livro não foi encontrado gerando uma dificuldade em encontrar uma reta entre mais de dois pontos, seja no trecho inicial, final ou nas fazes de descarga ou recarga. O fato de a inclinação das retas de compressão e recompressão terem tido uma leve redução na sua inclinação, pode indicar que o material está menos compressível, o que faz sentido tendo em vista que materiais mais granulares, ou neste caso com maiores tamanhos de grãos podem apresentar recalques muito inferiores a materiais finos como argila por exemplo.

Além disso talvez a nova composição granulométrica, mas bem graduada tenha produzido um material com menor índice de vazios e conseqüentemente com maior densidade relativa, mesmo que ligeiramente, e isso pode ter influenciado nestes resultados.

#### 4.2.3.2 Comportamento tensão-deformação-resistência ao corte

Para a obtenção de parâmetros de tensão- deformação e resistência ao corte para amostras reconstituídas tipo, foram realizados ensaios triaxiais de compressão e extensão drenados e não drenados além de ensaios dinâmicos não drenados. Na Tabela 9 temos um resumo dos ensaios.

Tabela 9 - Resumo dos ensaios triaxiais em amostras reconstituídas tipo brumadinho.

| Amostras                   | tipo de ensaio | Teor em água (w%) | Índice de vazios final (ef) | Parâmetro B |
|----------------------------|----------------|-------------------|-----------------------------|-------------|
| BRU.CND.50kPa              | CND            | 16,64             | 0,607                       | 0,99        |
| BRU.CND.200kPa             | CND            | 16,24             | 0,593                       | 0,98        |
| BRU.CND.800kPa             | CND            | 15,76             | 0,575                       | 0,97        |
| BRU.END.50kPa              | END            | 16,69             | 0,609                       | 0,97        |
| BRU.END.200kPa             | END            | 16,29             | 0,595                       | 0,99        |
| BRU.END.800kPa             | END            | 15,87             | 0,579                       | 0,99        |
| BRU.CD.200kPa              | CD             | 17,13             | 0,625                       | 1,00        |
| BRU.ED.200kPa              | CD             | 16,00             | 0,584                       | 0,99        |
| BRU.CDP'.200kPa            | CD             | 17,45             | 0,637                       | 0,97        |
| BRU.EDP'.200kPa            | CD             | 14,40             | 0,526                       | 0,97        |
| BRU.CD- $\sigma_3$ .200kPa | CD             | 17,97             | 0,656                       | 0,99        |
| BRU.ED- $\sigma_3$ .200kPa | ED             | 15,51             | 0,566                       | 1,00        |
| BRU.DND.40kPa              | ND             | 16,70             | 0,578                       | 0,97        |
| BRU.DND.60kPa              | ND             | 16,37             | 0,572                       | 0,98        |
| BRU.DND.80kPa              | ND             | 16,30             | 0,570                       | 0,99        |
| BRU.DND.100kPa             | ND             | 16,41             | 0,572                       | 0,99        |
| BRU.DND.200kPa             | ND             | 16,51             | 0,574                       | 1,00        |

Na Figura 51 temos a representação dos resultados dos ensaios de compressão e extensão triaxial no plano  $p'$ ,  $q$  para as amostras tipo Brumadinho, também estão representadas as suas respectivas evoluções da tensão de desvio ( $q$ ) em relação a deformação, evolução da variação do poro pressão ( $Du$ ), e o comportamento da relação entre  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ , para cada uma das tensões de consolidação. É possível observar uma diferença de comportamento entre as amostras submetidas a 50 kPa e 200 kPa em relação a de 800 kPa, as duas primeira (200 kPa e 800 kPa), apresentaram um menor excesso de poro pressão. Já a de 800 kPa gera uma quantidade de excessos de poro pressão inicial superior, principalmente em extensão tendo um deslocamento pra esquerda bem mais pronunciado ( $p'$ ,  $q$ ). Se observarmos a variação de poro pressão ( $Du$ ), vamos perceber que a amostra 800 kPa tem um comportamento inicial com tendência a comprimir mais se comparado as outras duas. Este comportamento também é percebido nas amostras de 50 kPa e 200 kPa, mas de forma menos acentuada.

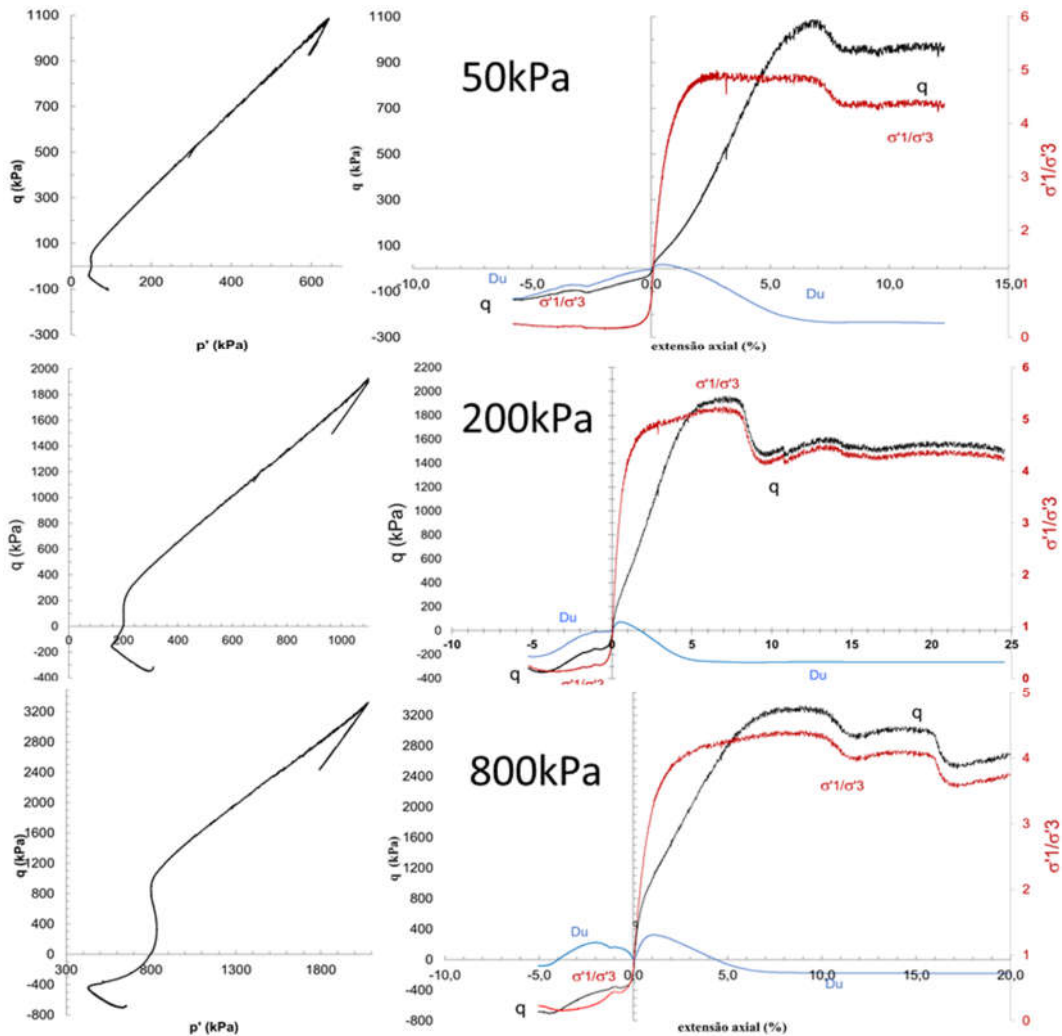


Figura 51 - Representação dos resultados dos ensaios de compressão e extensão triaxial (plano  $p'$ ,  $q$ ) ( $Du$ ) e ( $\sigma_1 / \sigma_3$ ) para as amostras reconstituídas tipo Brumadinho.

Com os resultados obtidos e interpretados em termos do espaço  $p'$ - $q$  foram feitas tentativas de se determinar as linhas de transformação de fase (LTF) e a linha de estados críticos (LEC), para as amostras reconstituídas tipo Brumadinho. A Figura 52 temos os ensaios de compressão e extensão com as representações das possíveis linhas de estado crítico e de transformação de fase. Os pontos para determinação da LEC foram determinados a partir do maior valor da relação entre  $\sigma'1$  e  $\sigma'3$ , e para a LTF foram determinados a partir do menor valor de  $p'$ . Foram ainda determinados o  $M$ , o ângulo de atrito no estado crítico ( $\Phi'$ LEC) e o ângulo de atrito na linha de transformação de fase ( $\Phi$ LTF) tanto para compressão com extensão.

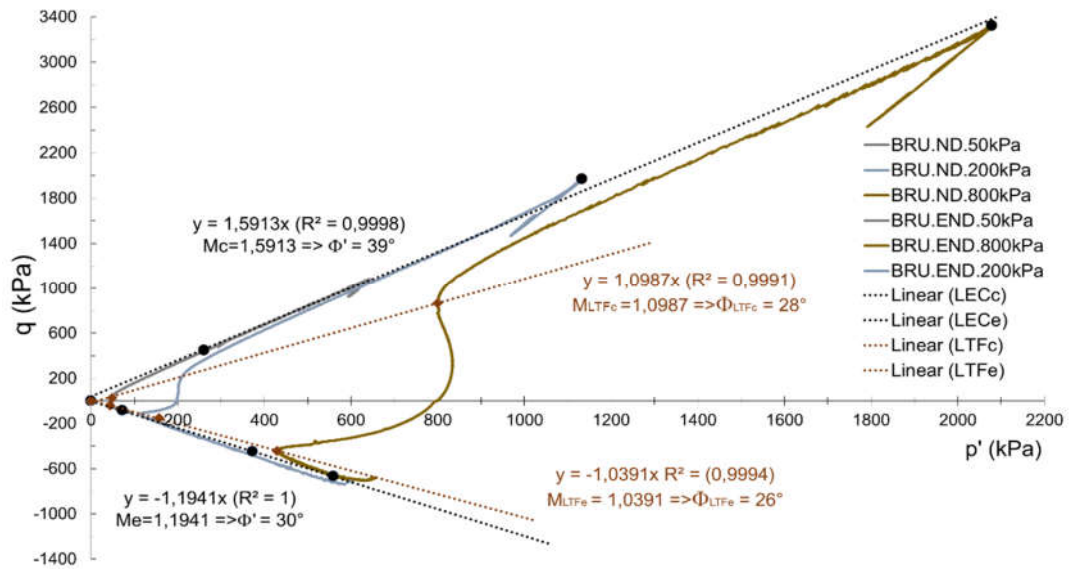


Figura 52- Resultados das determinações da  $\Phi'$ LEC e  $\Phi$ LTF, de compressão e extensão para amostras reconstituídas tipo Brumadinho.

Os resultados demonstram boa coerência entre as curvas no que se refere a possível definição tanto da LEC quanto da LTF, obtendo  $R^2$  muito próximos de 1 para todos os casos. Também para as amostras tipo Brumadinho os resultados de compressão e extensão são diferentes, sempre em ensaios de extensão se obtendo valores de  $\Phi$  inferiores ao de compressão.

As amostras tipo Brumadinho apresentaram valores de  $\Phi'$  e  $\Phi$ LTF, semelhantes aos obtidos com as amostras indeformadas e tipo Moncorvo, inclusive em relação aos ensaios de extensão, ou seja, mesmo com a alteração na granulometria acabou que não houve mudança significativa nos parâmetros de resistência ao corte. Vale destacar que para a amostra de 200 kpa não foi possível determinar o ponto de menor valor de  $p'$ , pois a amostra não apresentou deslocamento para a esquerda com excessos de poro pressão iniciais pouco significativos.

Além dos ensaios não drenados de compressão e extensão, para as amostras tipo Brumadinho foram feitos 6 ensaios drenados, 3 de compressão e 3 de extensão, sendo 2  $p'$  contante, 2 com redução de  $\sigma'3$  e 2 convencionais. Na Figura 53 estão apresentados os resultados de e ensaios.

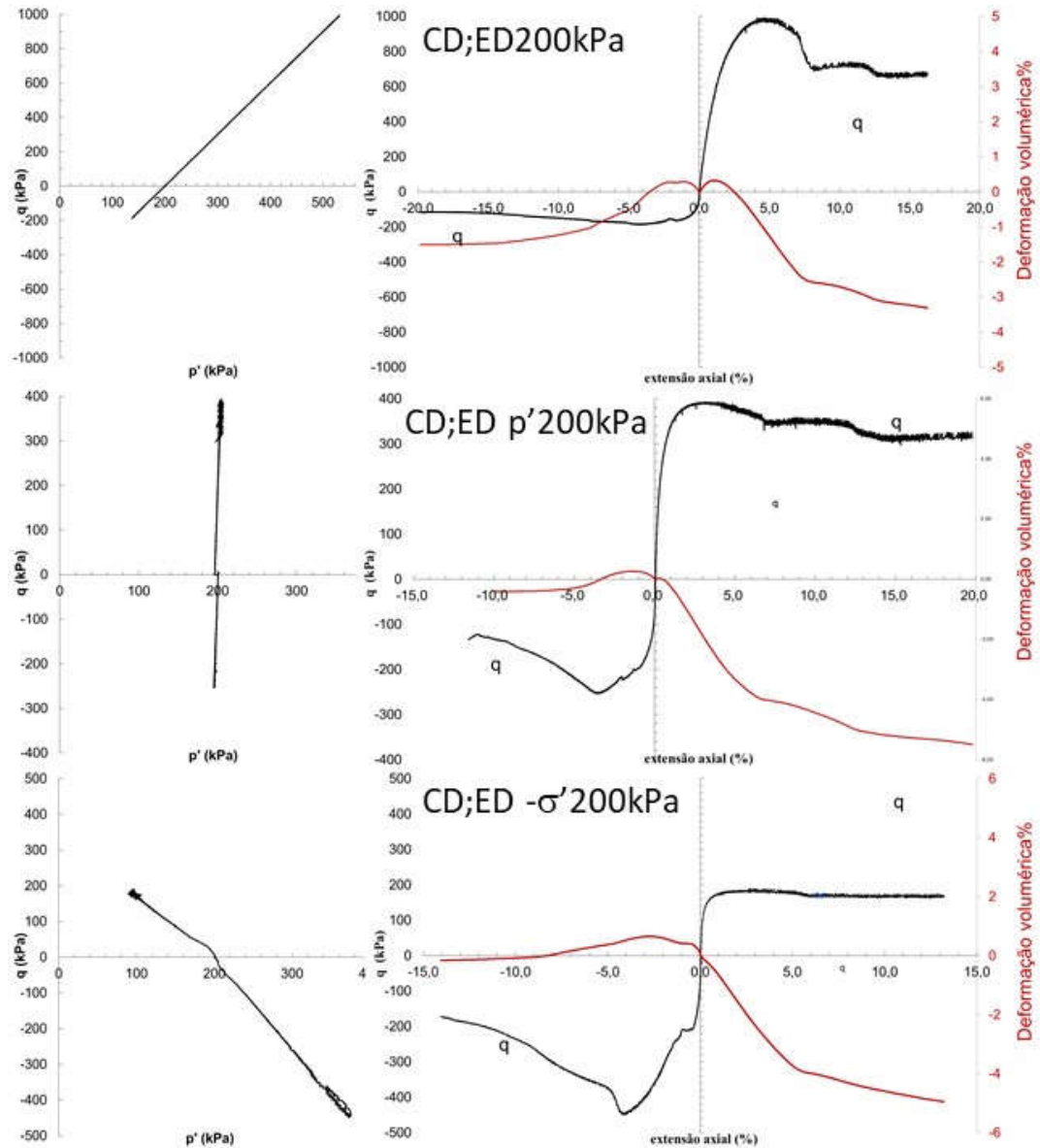


Figura 53 – Comparativo de caminho de tensões  $p'$ - $q$ , corte compressão não drenado x corte por compressão não drenado com redução da tensão média, amostra com areia, consolidação 200 kPa.

Em relação aos resultados dos ensaios drenados, podemos observar uma maior anisotropia no comportamento, por exemplo, ensaios com o  $p'$  constante de extensão é possível notar um valor máximo de  $q$  (pico) e uma maior contração durante o corte, que não é observado no ensaio de  $p'$  constante em compressão. Para os outros ensaios, variação de  $q$  ou a redução de  $\sigma'3$ , o valor de  $q$  máximo é dependente da trajetória de tensões, mas é visível que compressão tende sempre a dilatar mais. Os ensaios drenados de certa forma confirmam o comportamento já observado nos ensaios não drenados, mostrando que apesar de uma contração inicial as amostras tendem a dilatar após maiores deslocamentos, variando quando e em intensidade dependendo da sua trajetória e seu estado de tensão.



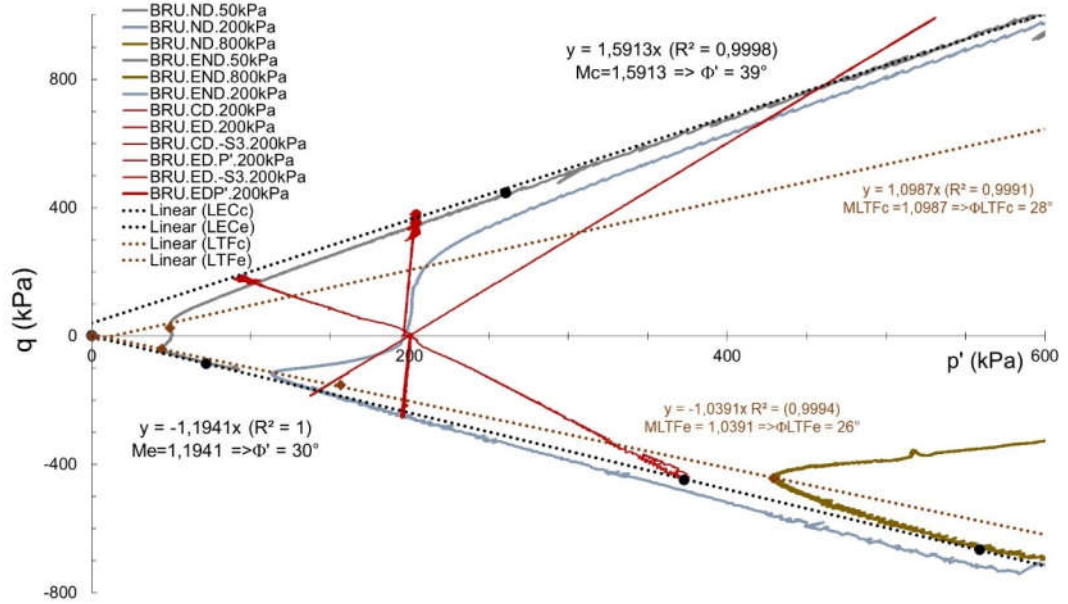


Figura 54- Resultados dos ensaios de compressão e extensão drenados e não plotados juntos, com destaque para as tensões de 200 kPa.

Na Figura 54 foram plotados todos os resultados de ensaios realizados nas amostras tipo brumadinho exceto pelos ensaios dinâmicos, juntamente com seus respectivos ensaios de compressão unidimensional (edométrico), com o objetivo de tentar identificar a sua LEC.

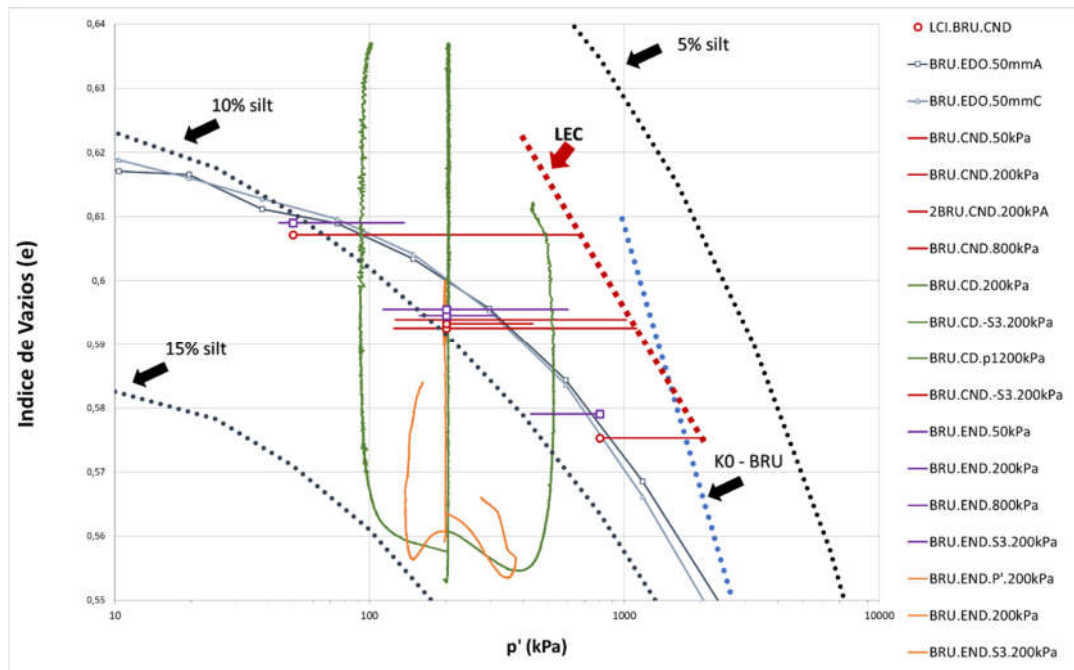


Figura 55- Resumo de ensaios triaxiais de compressão e extensão drenados e não drenados para amostras tipo brumadinho.

Como é possível observar na Figura 55, novamente como já havia ocorrido para as amostras indeformadas e tipo Moncorvo, somente alguns dos ensaios, atingiram tensão e

variação de volume constantes, neste caso não se fez uso da variação de volume pois se trata de um ensaio não drenado e se fez uso da variação de poro pressão. Para todas as outras amostras foram somente indicadas qual seria seu destino, entendendo que seria a linha ali indicada como LEC.

Para os ensaios drenados de compressão, também é possível observar um tendência a ir para a mesma direção, indicando que estão se encaminhando ao estado crítico, já para os ensaios drenados e extensão, a não ser pelo ensaio de  $p'$  constante, essa trajetória até a LEC, não é tão evidente, não só por não ir tão longe, mas por não demonstrar um caminho tão claro. Na tabela 10 está um resumo dos parâmetros obtidos e na Figura 56 dados obtidos em ensaios de 3 diferentes tipos de material da barragem de brumadinho após acidente, para efeito de comparação. Lembrando que o trabalho citado fez somente ensaios de compressão, e o que é chamado de “evoluída” seria a linha de estado crítico alterada pelo esmagamento de partículas.

Tabela 10 – Tabela com parâmetros de estados críticos e transformação de fase para todas as amostras testadas.

| Tipo de Amostra | $\Phi_{LEC}$ | $\Phi_{LTF}$ | MLEC | $\lambda$ |
|-----------------|--------------|--------------|------|-----------|
| Indeformada     | 37°          | 30°          | 1,52 | 0,028     |
| Indeformada     | 29°          | 25°          | 1,57 | 0,028?    |
| -               | -            | -            | -    | -         |
| Moncorvo        | 40°          | 27°          | 1,63 | 0,028     |
| Moncorvo        | 30°          | 24°          | 1,21 | 0,028?    |
| -               | -            | -            | -    | -         |
| Brumadinho      | 39°          | 28°          | 1,59 | 0,029     |
| Brumadinho      | 30°          | 26°          | 1,19 | 0,029?    |

| Material | Condição | $\phi'_{EC}$ (°) | M (-) | $\lambda$ (-) |
|----------|----------|------------------|-------|---------------|
| Tipo 1   | Original | 34,96            | 1,42  | 0,053         |
| Tipo 1   | Evoluída | 34,96            | 1,42  | 0,056         |
| Tipo 2   | Original | 34,54            | 1,40  | 0,037         |
| Tipo 2   | Evoluída | 34,54            | 1,40  | 0,051         |
| Tipo 3   | Original | 33,62            | 1,36  | 0,043         |
| Tipo 3   | Evoluída | 33,62            | 1,36  | 0,050         |

Figura 56- Tabela com resultados de parâmetros de estado crítico, em trabalho realizado pela Vale nos rejeitos da barragem do córrego do feijão em brumadinho 08/2021.

Com o intuito de verificar de forma básica o comportamento a cargas dinâmicas nas amostras tipo Brumadinho, foram feitos 5 ensaios dinâmicos, apresentados na Figura 57.

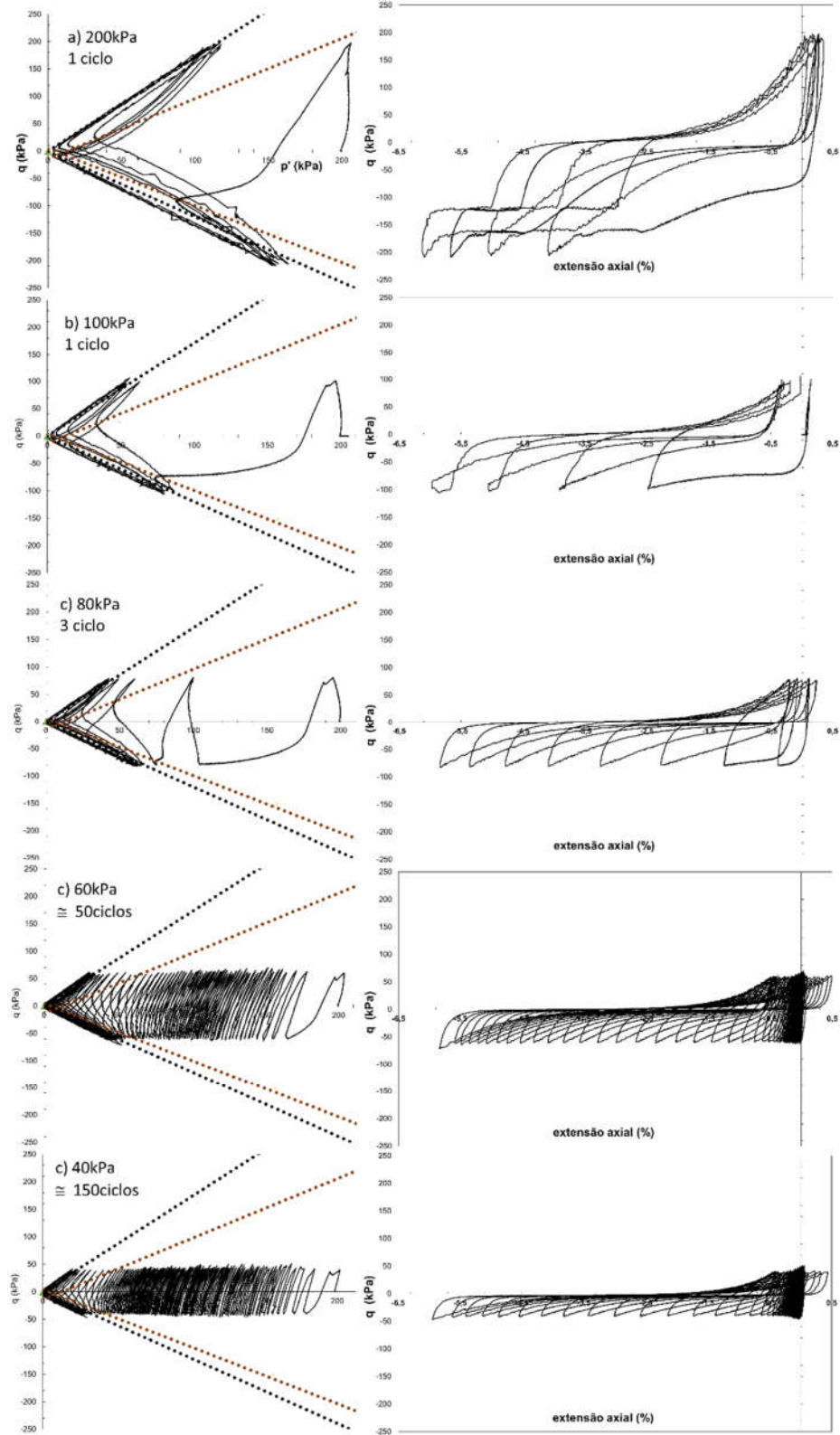


Figura 57- Resultados dos ensaios dinâmicos não drenados amostras reconstituídas tipo Brumadinho.

As respostas das amostras submetidas a cargas dinâmicas demonstram manter o seu comportamento orientado pela linha de estados críticos e de transformação de fase dos ensaios de compressão e extensão não drenado, independente da carga aplicada, da variação do número de ciclosse ainda após atingir a liquefação ou formar a “borboleta”. Também fica claro que a tensão aplicada é determinante para a quantidade de ciclos necessária para se atingir a liquefação e que essa resposta não é linear. A seguir serão expostas algumas imagens relativas aos ensaios triaxiais realizados, na Figura 58 podemos observar uma sequência de um ensaio de extensão não drenada em uma amostra tipo Moncorvo, é possível ver uma redução do diâmetro com os planos de corte bem definidos, até que certo momento ocorre a separação total entre as partes, restando somente a resistência da membrana. Já na imagem 59 podemos ver uma amostra Indeformada em ensaio de extensão (a), onde fica evidente alguns buracos, reforçando as incertezas de ensaios neste tipo de amostras, (b) um ensaio de compressão não drenada em uma amostra tipo Moncorvo e (c) tipo brumadinho. São praticamente iguais a olho nu, a não ser pelo fato de a amostra tipo brumadinho aparentar ser mais rugosa, o que provavelmente é devido a sua granulometria pouco mais grosseira.

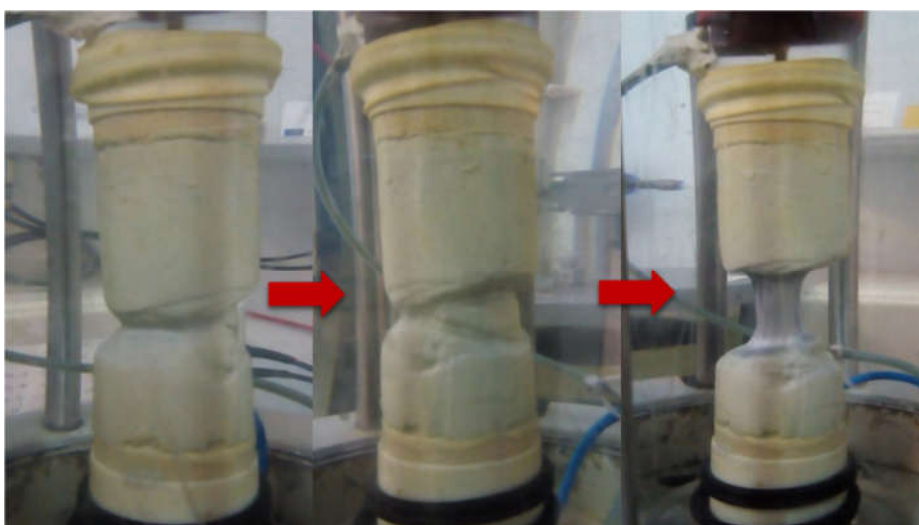


Figura 58- Sequência de fotos ensaio não drenado de extensão amostra tipo Moncorvo.

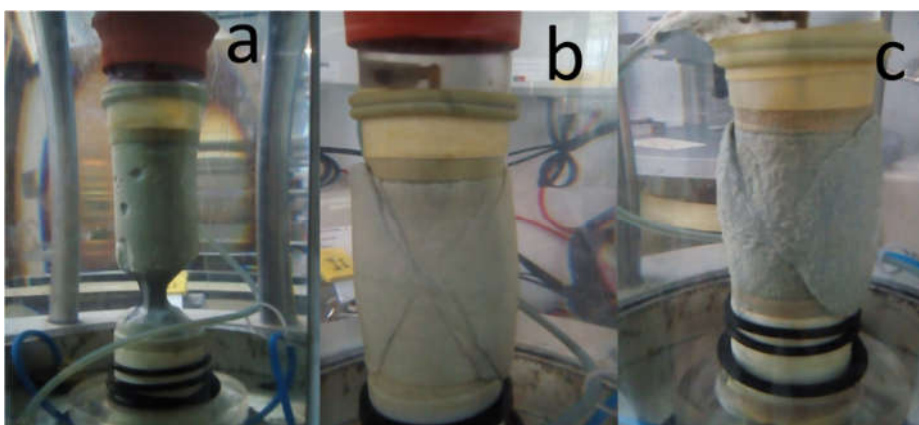


Figura 59- (a) amostra Indeformada em extensão não drenada; (b) amostra tipo Moncorvo em compressão não drenada; (c) amostra tipo brumadinho em compressão não drenada.

## 5 CONCLUSÃO

A extração mineral está crescendo, e o armazenamento de rejeitos é cada vez mais necessário, e tem causado muitos problemas, com acidentes graves, sendo o conhecimento destes materiais pobre, do ponto de vista geotécnico. Este trabalho procurou ajudar a ultrapassar essa limitação com uma caracterização vasta de um rejeitado de minério de ferro do ponto de vista físico e mecânico, utilizando amostras intactas e reconstituídas de uma mina de ferro de Torre de Moncorvo.

Esta pesquisa teve como objetivo principal o estabelecimento e validação de um processo de reconstituição adequado à preparação de amostras de rejeito de minério de ferro a fim de desenvolver uma caracterização detalhada de rejeitos de mineração, mais especificamente minério de ferro através de ensaios normalmente utilizados na caracterização física e mecânica de materiais geotécnicos seja com amostras indeformadas e reconstituídas de diferentes composições. Avaliou ainda a capacidade para reproduzir amostras reconstituídas homogêneas que sejam representativas dos rejeitos da exploração de minério de ferro.

Para isto além da revisão bibliográfica para melhor entendimento do problema, foi realizada a tentativa do desenvolvimento de um método de reconstituição que fosse o dentro do entendimento do autor o mais fiel possível aos mecanismos de deposição do material *in situ*, tentativa esta que foi testada de forma exaustiva com um total de 288 ensaios de caracterização (granulometrias, limites de Atterber, peso específico(G) e umidades), 10 ensaios edométricos e pelo menos 54 tentativas de ensaios triaxiais de diversos tipos, com muitos que não chegaram ao fim, mas trouxeram evolução para o conhecimento do autor. A preparação de amostras reconstituídas é um problema crítico nestes estudos, pois é preciso ter amostras uniformes e representativas da realidade. Boa parte deste trabalho visou avaliar a possibilidade de preparar amostras utilizando uma pasta com teor em água elevado (slurry). A partir disto foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

→ Tendo em vista os resultados obtidos pelos ensaios de caracterização nas amostras retiradas tanto do bloco tipo Moncorvo, como do Bloco tipo Brumadinho, foi possível afirmar que o método de reconstituição de amostras desenvolvido se mostrou para estes materiais eficiente no que diz respeito a homogeneidade, ou seja, foi possível afirmar que as amostras eram comparáveis entre si.

→ Em relação as amostras reconstituídas tipo Moncorvo serem representativas das amostras Indeformadas, conforme já citado isso não foi possível de se avaliar através da caracterização física, pois se trata do mesmo material, então somente podemos levar em consideração os resultados dos ensaios edométricos e triaxiais, que para este material apresentaram um resultado satisfatório, tendo em vista que tanto para os triaxiais quanto para os edométricos foram obtidos resultados muito semelhantes, tanto em parâmetros como em comportamento.

Talvez um ponto a ser observado seja em relação ao índice de vazios, em função de a amostra ser extremamente colapsível ao manuseio, foi necessário aumentar a carga de pré consolidação dos blocos de 25 kPa para 50 kPa, isto fez com que as amostras indeformadas apresentassem um índice de vazios ligeiramente superior as reconstituídas, podendo gerar alguma discrepância. Outro fator é que materiais naturais sempre tem algum grau de heterogeneidade, sendo muitas vezes impossível de serem percebidos, talvez com mais repetições seria possível minimizar estes efeitos, mas em função da dificuldade de se obter amostras indeformadas isto não foi possível.

→ Amostras tipo Brumadinho, como já citado se mostraram representativas entre si, mas apesar de os seus resultados serem coerentes com a literatura e do ponto de vista de características físicas, resultados de parâmetros de estado crítico não foram tão coerentes com os dados reais. Os índices de vazios das amostras tipo Brumadinho e as ensaiadas por outros autores demonstraram diferenças significativas, que podem ter gerado essas discrepâncias. Mas fato é que estes autores também realizaram seus estudos através de métodos de reconstituição, a chamada compactação úmida, que em geral produz corpos de prova com elevado índice de vazios, nem sempre sendo representativo do índice de vazios natural. Como não temos amostras indeformadas para efetiva comparação, a conclusão é que apesar de alguma ressalvas, principalmente ao que se refere ao índice de vazios inicial, o método pode ser considerado efetivo para reconstituição de amostras deste tipo de material.

→ Em relação a linha de estados críticos, este autor teve grande dificuldade em encontrá-la no plano  $p'$  e, tendo em vista que muito raramente os ensaios chegaram a um comportamento de tensão e volume constantes, talvez o deslocamento imposto a amostra não foi suficiente, além de não se encontrar uma linha reta nos ensaios edométricos, criando várias inclinações possíveis, este autor não foi capaz de definir essa informação com precisão.

Em todos os casos as amostras demonstraram anisotropia entre ensaios de compressão e extensão, mesmo em ensaios drenados, pode ser uma limitação do ensaio de extensão que como vimos na Figura 57, em certo ponto o ensaio já não está mais medindo qualquer amostra e somente a membrana, podendo não ser possível desta forma chegar a um volume constante.

Outro fator importante é que devido ao alto grau de estrangulamento da amostra em extensão, que não consegue ser corrigido de maneira eficaz, podendo gerar um erro muito grande na avaliação da tensão que nos ensaios de compressão ocorrem, mas são menos significativos, pois a variação do diâmetro é menor.

→ De forma geral com poucas exceções para os estados de tensão avaliados, todas as amostras ensaiadas tiveram um comportamento contrativo no início e após a linha de transformação de fase passou a dilatante, com endurecimento a grandes deformações, comportamento que também pode ser encontrado em solos granulares.

→ Mesmo com sua baixa plasticidade o material se mostrou eficiente na utilização de técnicas de reconstituição que normalmente são utilizadas em solos argilosos, com algumas adaptações.

→ Os resultados obtidos sugerem que o conhecimento destes materiais depende fortemente de vários fatores, incluindo as trajetórias de tensões, do ponto de vista monotônicos ou cíclicos, podendo ser avaliados à luz de teorias estabelecidas para o comportamento de solos granulares.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar de o método ter sido considerado eficaz, para a reconstituição de amostras dos materiais estudados, alguns aspectos poderiam ajudar a melhorar a técnica, e colaborar com a evolução do conhecimento. Por esse motivo gostaria de sugerir alguns tópicos que poderiam ser estudados em trabalhos futuros.

→ Avaliar o uso da técnica em outros materiais, de preferência que se possa comparar com amostras indeformadas, para perceber o comportamento real.

→ Tentar uma melhor definição da linha de estados críticos (LEC), talvez para isso se faz necessário ensaios com maiores níveis de deformação, ou explorar ensaios triaxiais ao máximo de deformação ou outros ensaios como o hollow cylinder apparatus HCA.

→ Realizar ensaios com outros tipos de consolidação, nomeadamente anisotropia, que é mais realista, e para tensões de consolidação muito altas, que podem ser importantes na base das grandes barragens de rejeito e que alguns autores dizem que pode induzir colapso.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrão, P.C. Sobre a deposição de rejeitos de mineração no Brasil. In: Simpósio sobre barragens de rejeitos e disposição de resíduos industriais e de mineração, REGEO'87. 1987, Rio de Janeiro. Anais., 1987. v. 1, p. 1-9.
- Alarcon-Guzman, A., Leonards, G. A. e Chameau, J. L. (1988). Undrained monotonic and cyclic strength of sands. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114 (10): 1089- 1109.
- Abreu, É. J. A., 2012. “Estudo das condições de liquefação da areia de Coimbra em triaxial estático e cíclico”. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto.
- ASTM., 2011. “Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system).” ASTM D2487, West Conshohocken, PA.
- Azeiteiro, R. J. N., Coelho, P. A. L. F., Taborda, D. M. G. & Grazina, J. C. D. (2017). Critical state-based interpretation of the monotonic behaviour of Hostun sand. *ASCE J. Geotech. Geoenviron. Engng* 143, No. 5, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001659](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001659).
- Bedin, J., 2010. *Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração*. Tese de Doutorado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Bandini, P., Sathiskumar, S., 2009, Effects of silt content and void ratio on the saturated hydraulic conductivity and compressibility of sand-silt mixtures, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Been, K. e Jefferies, M., 1985. A state parameter for sands. *Géotechnique*, 35 (2): 99-112.
- Been, K., Jefferies, H. G. e Hachey, J. E. (1991). The critical state of sands. *Géotechnique*, 41 (3): 365-381.
- Bjelkevik, A. 2005, "Stability of Tailings Dams Focus on Water Cover Closure", Licentiate Thesis, Luleå University of Technology, Sweden, .
- Camacho, David L.D., Coelho, Paulo A.L.F., Gobbi, Felipe S., Araújo Santos, Luís M. 2021. Validação da reconstituição de amostras de rejeitos de minério de Ferro.
- Campos, T. M. P. (1984). Two low plasticity clays under cyclic and transient loading. Tese de Doutorado, Imperial College London, London [citado em Coelho, 2000].
- Campos, Nelson 2010. A odisseia do ferro de Moncorvo até à ferrominas. Foto de grupo de mineiros recrutados no concelho de Moncorvo, em 1936. Foto arquivada no centro de documentação do Museu do Ferro & Região de Moncorvo.
- Carraro, J. Antonio H.; PREZZI, Monica. A new slurry-based method of preparation of specimens of sand containing fines. *Geotechnical Testing Journal*, v. 31, n. 1, p. 1-11, 2008.

- Casagrande, A., 1936. Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, January: 257- 275.
- Castro, G., 1969. Liquefaction of sands. Tese de Doutorado, Harvard University, Cambridge.
- CBDB. 2011. A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI : cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens / [coordenador, supervisor, Flavio Miguez de Mello ; editor, Corrado Piasentin]. - Rio de Janeiro, 2011.
- Coelho, P. A. L. d. F., 2007. In situ densification as a liquefaction resistance measure for bridge foundations. Tese de Doutorado, University of Cambridge, Cambridge.
- Espósito, T.J., 2000. Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 363p.
- Fevereiro, C. M. P. 2015. O Sinclinal de ferro de Torre de Moncorvo - Um recurso mineral como catalisador de um Tempo Intermitente. Universidade do Minho, Escola de Arquitectura. Dissertação de Mestrado Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Arquitectura.
- GALVÃO SOBRINHO, Antonio Rafael de Vasconcelos. **Metodologia para implantação de um sistema de disposição de rejeitos em minério de ferro na região do semiárido: estudo de caso.** 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Hight, D. W., 1983. *Laboratory investigations of sea-bed clays*. Tese de Doutorado, Imperial College London, London.
- Henriques, A. B. Caracterização e estudo das propriedades eletrocinéticas dos minerais de ferro: hematita, goethita e magnetita. Tese de doutorado Universidade Federal de Minas Gerais, MG, Brasil, 2012.
- Hu L., Wu H., Zhang L., Zhang P. & Wen Q. 2017. Geotechnical Properties of Mine Tailings, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering* Vol. 29 (2), 04016220 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001736](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001736).
- Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração/Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 2016.
- Ishihara, K., 1985. Stability of natural deposits during earthquakes. 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 2: 321- 376.
- Ishihara, K., Yasuda, S., 1975. Sand liquefaction in hollow cylinder torsion under irregular excitation. *Soils and Foundations*, 15 (1): 45-59.

- Ishihara, K., Acacio, A. A., Towhata, I., 1993. Liquefaction-induced ground damage in Dagupan in the July 16, 1990 Luzon earthquake. *Soils and Foundations*, 33 (1): 133-154.
- Jefferies, M., Been, K., 2006. *Soil Liquefaction: a critical state approach*, 1.<sup>a</sup> edição. Taylor & Francis, Abington.
- Lambe, W.T., Whitman, R.V., 1972. Laboratory Test to Study Hydraulic Fill. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(3): pp.405-417
- KÜPPER, A.M.A.G. (1991) Design of Hydraulic Fill. PhD Thesis, Dept of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Canada, 525p. *Mecânica de Suelos*. Centro Regional de Ayuda Técnica, México/Buenos Aires, 582 p.
- Liu S., Henderson, M., 2020. An Overview on Methodologies for Tailings Dam Breach Study, Tailings and Mine Waste 2020 International Conference, Keystone, Colorado, USA, November 15-18, 2020.
- Lozano, E. F. A., 2006. Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica. Dissertação de mestrado- escola politécnica da universidade de São Paulo, departamento de Engenharia de estruturas e Fundações.
- McRoberts, E. C., J. A., 1992. Sladen. "Observations on static and cyclic sand-liquefaction methodologies." *Canadian Geotechnical Journal* 29.4 (1992): 650-665.
- Miura, S. e Toki, S. (1982). A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand. *Soils and Foundations*, 22 (1): 61-77.
- Moretti, M.R.; Cruz, P.T., 1996. Aterros Hidráulicos e sua Aplicação na Construção de Barragens. 100 Barragens Brasileiras, Casos Históricos, Materiais de Construção, projetos, Oficina de Textos, São Paulo, SP, p. 556-591.
- Morgenstern, N.R., Küpper, A.A.G., 1998. Hydraulic Fill Structures – A perspective. Specialty Conference on Hydraulic Fill Structures, Hydraulic Fill Structures, ASCE, Fort Collins, USA, pp. 1-31.
- Murthy, T. G., Loukidis, D., Carraro, J. A. H., Prezzi, M., & Salgado, R. (2007). Undrained monotonic response of clean and silty sands. *Géotechnique*, 57(3), 273–288.
- Ofoegbu S.U., 2019. Characterization studies on Agbaja iron ore: a high-phosphorus content ore. *SN Applied Sciences* 1, 204, Springer. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0218-9>.
- Oliveira, R. P., 2020. Estudo comparativo da Resistência não drenada liquefeita a partir de correlações propostas para ensaios de campo de CPTU. Dissertação de mestrado Universidade federal de Ouro Preto MG.

- Ratton, R.B., 1993. Ensaio Triaxiais em Areia Saturada. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 167 p.
- Ribeiro, L.F., 2000. Simulação Física do Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicado a Barragens de Rejeitos. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 235 p.
- Poulos, S. J., 1981. The steady state of deformation. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107 (GT5): 553-562.
- Rotta, L.H.S., Alcântara, E.; Park, E., Negri, R.G.; Lin, Y.N.; Bernardo, N.; Mendes, T.S.G; Filho, C.R.S., 2020. The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 90, p. 102119, 2020.
- Russo, F. de M., 2007. Comportamento de barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico: caracterização laboratorial e simulação numérica do processo construtivo. Tese de Doutorado em Geotecnia. Universidade de Brasília.
- Santos, L. M. A., 2015. Caracterização do comportamento mecânico da areia de Coimbra sob ações generalizadas. 2015. Tese de Doutorado.
- Silva, W.P., 2010. Study of the Potential for Static Liquefaction of a Tailings Dam constructed by the Upstream Method using the Methodology of Olson (2001). MSc Thesis, Federal University of Ouro Preto- UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil (in Portuguese).
- Silva, Rodolfo Gonçalves Oliveira da. Caracterização de concreto asfáltico elaborado com rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero [manuscrito] / Tese Doutorado Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós Graduação em Geotecnia. Área de concentração Engenharia Geotécnica 2017.
- Soares, L., 2010. Barragem de rejeitos. In: Tratamento de minérios, 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap.19. p. 831-888.
- Rodriguez, J., Johansson, J. & Edeskär, T., 2012. Particle shape determination by two-dimensional image analysis in geotechnical engineering. In: (Ed.), Proceedings of Nordic Conference on Soil Mechanics and Geotechnical NGM: . Paper presented at Nordic Geotechnical Meeting: 09/05/2012 - 12/05/2012 (pp. 207-218). Copenhagen: Danish Geotechnical Society.
- Rodriguez, J. M. & Edeskär, T. (2013). Case of study on particle shape and friction angle on tailings (ed.). Paper presented at . *Journal of Advanced Science and Engineering Research*, 3(4), 373-387.
- WANG, Shuying; LUNA, Ronaldo; STEPHENSON, Richard W. A slurry consolidation approach to reconstitute low-plasticity silt specimens for laboratory triaxial testing. *Geotechnical Testing Journal*, v. 34, n. 4, p. 288-296, 2011.

VAID, Y.P., and NEGUSSEY, D (1988). Preparation of Reconstituted Sand Specimens. *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, ASTM STP 977, Robert T. Donaghe, Ronald C. Chaney, and Marshall L. Silver, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 405-417.

Valer - EDUCAÇÃO VALE Curso de Mineração - Básico Módulo III: Beneficiamento Mineral, <https://portaldamineracao.com.br/>, acessado em agosto de 2020.

Vick, S. G. (1983). *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*. Wiley.

Vick, S. 1990, "Planning, design, and analysis of tailings dams, BiTech", Publishers, Vancouver.

Tatsuoka F, Ochi K, Fujii S, Okamoto M. Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods. *Soils Found* 1986;26(3):23–41. [54]