

UDO HENRIQUE CORDEIRO DOS SANTOS

**ESTUDO DO ENCHIMENTO DE UMA BARRAGEM COM REJEITOS DE  
MINERAÇÃO DE BAUXITA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

Santos, Udo Henrique Cordeiro dos, 1994-  
S237e           Estudo do enchimento de uma barragem com rejeitos de  
2019           mineração de bauxita / Udo Henrique Cordeiro dos Santos. –  
Viçosa, MG, 2019.  
xi, 72 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Cláudio Henrique de Carvalho Silva.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f.68-72.

1. Solos - Compactação - Simulação por computador.  
2. Taludes (Mecânica do solo). 3. Deformação (Mecânica).  
4. Barragens de rejeitos. I. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 624.151363

UDO HENRIQUE CORDEIRO DOS SANTOS

**ESTUDO DO ENCHIMENTO DE UMA BARRAGEM COM REJEITOS DE  
MINERAÇÃO DE BAUXITA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de fevereiro de 2019.



---

Enivaldo Minette



---

Roberto Lopes Ferraz



---

Cláudio Henrique de Carvalho Silva  
(Orientador)

“Foi o tempo que dedicastes à tua rosa que a fez tão importante” (Antoine de Saint-Exupéry).

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Sonia e Aguinaldo, por todo amor, carinho e fé que tiveram.

Aos professores Cláudio Henrique de Carvalho Silva, Dario Cardoso de Lima e Roberto Lopes Ferraz, pela orientação e apoio dado, sem os quais não seria possível realizar esse trabalho.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Viçosa.

Ao eng. Alfredo Mucci Daniel e a BAUMINAS Mineração Ltda pelo apoio técnico e acesso às instalações e processos da Barragem de Rejeitos de Bom Jardim.

Aos secretários da pós-graduação Cilene Knauf e Thiago Chagas.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil, em especial Leonício e Giovani, por toda a ajuda no desenvolvimento dos ensaios.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	ix
RESUMO .....	x
ABSTRACT .....	xi
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Considerações Iniciais .....	1
1.2 Justificativa .....	2
1.3 Objetivos .....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 Sobre o Alumínio .....	3
2.1.1 Histórico do Alumínio .....	3
2.1.2 Extração da Bauxita .....	4
2.2 Barragens de Rejeitos .....	5
2.2.1 Considerações Gerais .....	5
2.2.2 Método de Alçamento por Montante .....	6
2.2.3 Método de Alçamento por Jusante .....	7
2.2.4 Método da Linha de Centro .....	7
2.3 Beneficiamento da Bauxita .....	8
2.4 Comportamento dos Rejeitos Depositados em Barragens .....	9
2.4.1 Sedimentação .....	10
2.4.2 Adensamento .....	11
2.4.2.1 Sistema de coordenadas .....	11
2.4.2.2 Modelagem do processo de adensamento .....	12
2.4.3 Ressecamento .....	14
2.5 Ensaio de Adensamento Hidráulico (HCT) .....	15
2.5.1 Bomba de fluxo .....	15

2.5.2	Célula triaxial .....	17
2.5.3	Transdutor diferencial de pressão.....	18
2.5.4	Sistema de aplicação de carga .....	19
2.5.5	Aquisição de dados .....	19
2.5.6	Procedimento do ensaio HCT.....	19
2.5.7	Determinação dos parâmetros do processo de adensamento.....	22
2.5.8	Modelagem do enchimento pelos programas CONDES0 e FSconsol .....	24
2.6	Ensaio de adensamento incremental (SIC).....	26
2.7	Ensaio de adensamento com velocidade de deformação controlada (CRS).....	30
2.7.1	Considerações sobre a velocidade do ensaio CRS .....	32
2.7.2	Determinação da velocidade de deformação .....	34
2.8	Conclusões Parciais .....	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	38
3.1	Localização e características da barragem de rejeitos .....	38
3.2	Tanques de Sedimentação Preliminar .....	40
3.3	Local de coleta das amostras de rejeito .....	42
3.3.1	Local de coleta dos rejeitos finos .....	42
3.3.2	Local de coleta de rejeitos finos sedimentados .....	43
3.3.3	Local de coleta do material antes do processo de lavagem .....	44
3.4	Caracterização dos materiais .....	45
3.5	Análises do processo de adensamento dos rejeitos .....	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	47
4.1	Caracterização dos materiais .....	47
4.2	Ensaio de Adensamento HCT .....	50
4.3	Ensaio de Adensamento CRS.....	56
4.4	Ensaio de Adensamento Incremental (SIC) .....	57
4.5	Comparação dos resultados .....	58
4.6	Simulação do enchimento da barragem.....	59

4.6.1	CONDES0 .....	59
4.6.2	FSconsol .....	61
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	68

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Métodos de alteamento: (a) montante (b) jusante e (c) linha de centro .....	8
FIGURA 2: Fluxograma da produção de sulfato de alumínio. ....	9
FIGURA 3: Estado de suspensão ao longo do tempo. ....	10
FIGURA 4: Bomba de fluxo .....	16
FIGURA 5: Câmara triaxial e transdutor de poropressão .....	17
FIGURA 6: Transdutor diferencial .....	18
FIGURA 7: Ensaio coluna determinação $e_{00}$ . ....	20
FIGURA 8: Esquema do Ensaio HCT. ....	21
FIGURA 9: Área de inserção dos pontos da curva de compressibilidade no FSconsol. ....	25
FIGURA 10: Ilustração da curva de enchimento conforme depósitos ao longo do tempo.....	26
FIGURA 11: Prensa para ensaio de adensamento incremental.....	27
FIGURA 12: Determinação tensão pré-adensamento pelo Método de Casagrande. ....	28
FIGURA 13: Determinação tensão pré-adensamento pelo Pacheco.....	28
FIGURA 14: Determinação $c_v$ pelo Método de Casagrande.....	29
FIGURA 15: Determinação $c_v$ pelo Método de Taylor.....	30
FIGURA 16: Componentes da célula do ensaio CRS.....	31
FIGURA 17: Sessão típica da barragem de Bom Jardim.....	39
FIGURA 18: Visão da área da Barragem Bom Jardim. ....	40
FIGURA 19: Ponto de lançamento do rejeito para sedimentação do rejeito grosso.....	41
FIGURA 20: Tanque de sedimentação preliminar.....	41
FIGURA 21: Retirada do rejeito grosso do tanque de sedimentação. ....	41
FIGURA 22: Local de coleta do rejeito fino.....	42
FIGURA 23: Retirada das amostras.....	42
FIGURA 24: Local de coleta do rejeito fino com amostrador shelby. ....	43
FIGURA 25: Retirada do tubo shelby.....	44
FIGURA 26: Curva granulométrica do rejeito fino. ....	47
FIGURA 27: Curva granulométrica do rejeito após lavagem.....	48
FIGURA 28: Distribuição das frações que compõem o material explorado.....	49
FIGURA 29: Gráfico de poropressão gerada x tempo do ensaio de adensamento hidráulico 18.005.....	51
FIGURA 30: Gráfico de poropressão gerada x tempo do ensaio adensamento hidráulico 18.016. .....	51

FIGURA 31: Gráfico de poropressão gerada x tempo do ensaio de adensamento hidráulico 18.018.....	52
FIGURA 32: Gráfico de poropressão gerada x tempo do ensaio de permissividade 18.005.....	52
FIGURA 33: Gráfico de poropressão gerada x tempo do ensaio de permissividade 18.016.....	53
FIGURA 34: Gráfico de poropressão gerada x tempo do ensaio de permissividade 18.018.....	53
FIGURA 35: Curva de compressibilidade do ensaio HCT.....	54
FIGURA 36: Curva de condutividade hidráulica do ensaio HCT.....	55
FIGURA 37: Sedimentação da amostra na célula de ensaio.....	55
FIGURA 38: Curva e x $\sigma'$ - CRS.....	56
FIGURA 39: Variação de $u_b/\sigma'$ - CRS.....	57
FIGURA 40: Curva e x $\sigma'$ - SIC.....	58
FIGURA 41: Curvas de compressibilidade.....	58
FIGURA 42: Curva cota x volume do reservatório da Barragem Bom Jardim.....	59
FIGURA 43: Curvas cotas de enchimento CONDES0.....	60
FIGURA 44: Índices de vazios ao longo da altura do barramento.....	61
FIGURA 45: Colunas equivalentes ao nível da barragem.....	62
FIGURA 46: Curva cota de enchimento FSconsul – 18.005.....	63
FIGURA 47: Curva cota de enchimento FSconsul – 18.016.....	63
FIGURA 48: Curva cota de enchimento FSconsul – 18.018.....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Velocidade do ensaio segundo ASTM D4186. ....	35
Tabela 2: Caracterização do rejeito fino da Barragem de Bom Jardim .....	47
Tabela 3: Separação do material britado na peneira #10 (2 mm).....	48
Tabela 4: $e_{00}$ do rejeito fino da Barragem de Bom Jardim.....	50
Tabela 5: Parâmetros de entrada no SICTA. ....	54
Tabela 6: Parâmetros de saída no SICTA .....	54
Tabela 7: Áreas equivalentes na etapa de enchimento. ....	62

## RESUMO

SANTOS, Udo Henrique Cordeiro dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Estudo do Enchimento de uma Barragem com Rejeitos de Mineração de Bauxita.** Orientador: Cláudio Henrique de Carvalho Silva.

A extração de minérios está ligada com a produção de grandes quantidades de rejeitos em forma de finos ou lama que são depositados geralmente em barragens de rejeitos. O comportamento do adensamento dos rejeitos do processo de mineração de bauxita na barragem de rejeitos é possível de ser determinado com o uso de uma teoria do adensamento de grandes deformações tendo em vista os valores altos de adensamento (até 40%) que ocorrem nesse tipo de material. Esse trabalho utiliza os dados da barragem de rejeitos da lavra de bauxita, denominada Barragem Bom Jardim, localizada em Mirai-MG para estudar o adensamento dos rejeitos e contribuir para aplicação de técnicas que possam determinar a vida útil de uma barragem bom como técnicas que possibilitem prolongar esse tempo. Os ensaios de adensamento realizados foram: adensamento hidráulico (HCT), adensamento edométrico (SIC) e adensamento com velocidade de deformação constante (CRS). No ensaio HCT, um dos parâmetros de maior interesse é o  $e_{00}$  que foi determinado por 3 métodos diferentes: béquer, prato e coluna, sendo com mais confiabilidade o método da coluna. Para o estudo do enchimento da barragem foram utilizados dois programas de simulação, o CONDES0 e FSconsol. Os resultados obtidos nos programas apresentaram um comportamento de adensamento semelhante em disposição incremental de rejeitos. Os tempos para o enchimento da barragem foram de 55 anos no CONDES0 e 58 anos no FSconsol. Além do processo de adensamento esse trabalho analisou o sistema de manejo dos rejeitos utilizado nesta planta e que separa parte dos rejeitos arenosos dos rejeitos finos, concluindo que este contribui para o prolongamento da vida útil de barragens de rejeitos.

## ABSTRACT

SANTOS, Udo Henrique Cordeiro dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Study of Filling of a Dam with Bauxite Mining Rejects**. Advisor: Cláudio Henrique de Carvalho Silva.

Extraction of ores is linked with the production of large quantities of tailings in the form of fines or sludge that are usually deposited in tailings dams. The behavior of the bauxite mining tailings densities in the tailings dam is possible to be determined using a theory of the large deformation consolidation in view of the high consolidation values (up to 40%) that occur in this type of material. This work uses the data from the bauxite reject dam, called Bom Jardim Dam, located in Miraf-MG to study the consolidation of the tailings and contribute to the application of techniques that can determine the useful life of a good dam as techniques that enable prolong this time. The consolidation tests were: hydraulic consolidation (HCT), edometric consolidation (SIC) and constant strain rate (CRS). In the HCT test, one of the parameters of greatest interest is  $e_{00}$ , which was determined by 3 different methods: beaker, dish and column, with the most reliable column method. Two simulation programs, CONDES0 and FSconsol, were used to study the dam filling. The results obtained in the programs showed a similar consolidation behavior in incremental tailings disposal. The times for filling the dam were 55 years in CONDES0 and 58 years in FSconsol. In addition to the consolidation process, this work analyzed the tailings management system used in this plant, which separates part of the sandy tailings from the fine tailings, concluding that it contributes to the extension of the life of tailings dams.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

A mineração é um dos setores mais importantes da economia brasileira sendo que este setor responde por 4,3 % do Produto Interno Bruto do país (IBRAM, 2019). Considerando-se a exploração apenas de bauxita, a produção bruta nacional foi da ordem de 30 milhões de toneladas no ano de 2017 (IBRAM, 2017).

No entanto, a extração de minérios está ligada com a produção de grandes quantidades de rejeitos em forma de finos ou lama que, ao lado da lavra de extração, geram grandes passivos ambientais da atividade de mineração.

Como opção à disposição dos rejeitos finos gerados no processo de beneficiamento primário, são implantadas barragens de rejeitos, cujo projeto, construção e operação envolvem conhecimentos de engenharia geotécnica.

Segundo o Relatório de Segurança de Barragens da ANA (2018) existem 790 barragens utilizadas para a contenção de rejeitos, barragens essas que podem causar danos as populações localizadas a jusante além do dano potencial ao meio ambiente. Nesse contexto a determinação do tempo necessário para o enchimento de barragens e técnicas de manejo dos rejeitos contribuem para facilitar o gerenciamento da exploração na lavra e a segurança da barragem.

O projeto de uma barragem de rejeito envolve o conhecimento das propriedades do material, tais como: massa específica, granulometria e variação das propriedades de compressibilidade e resistência ao cisalhamento ao longo do tempo. O processo de disposição dos rejeitos feito na forma de lama com teor de sólidos da ordem de 25 % a 40 % faz com que a lama depositada nos reservatórios passe inicialmente pelos processos de sedimentação e em que suas partículas se acomodam continuamente, tanto pelo peso próprio quanto pela percolação de água; e em seguida, ocorre o adensamento da lama sobre o efeito do aumento das tensões decorrentes do processo de enchimento do reservatório. Posteriormente, após o enchimento do reservatório, ocorre o processo de dessecação, com a consequente formação de trincas de ressecamento (ALMEIDA, OLIVEIRA FILHO e NOGUEIRA, 2005).

O comportamento correspondente ao adensamento ou consolidação dos rejeitos do processo de mineração de bauxita na barragem de rejeitos é possível de ser estudado com o uso da teoria do adensamento de grandes deformações de Gibson, England e Huney (1967), tendo em vista os valores elevados de adensamento (até 40%) que ocorrem nesse tipo de material. A

modelagem matemática é auxiliada pelo CONDES0 (YAO e ZNIDARCIC, 1997) e pelo FSconsol (GWP SOFTWARE INC., 2007), softwares que calculam a variação do índice de vazios com a evolução do processo de adensamento.

## **1.2 Justificativa**

Os custos e impactos ambientais da disposição dos rejeitos na forma de barragens são elevados e permanecem mesmo quando cessadas as atividades de mineração. O adequado dimensionamento da barragem, considerando a vida útil e o volume de rejeitos total a serem depositados, tendo em vista a tomada de decisões sobre lavra e quantidade de produção, é fator crucial para o sucesso da atividade mineradora.

O comportamento dos rejeitos no processo de adensamento é diverso da sua forma natural, sendo que, quando o mesmo se encontra na forma de lama grandes deformações ocorrem. Logo, é importante determinar qual o índice de vazios após o processo de adensamento para relacioná-lo com a produção mensal da mineração e assim determinar o tempo de vida útil da barragem, informação relevante para as tomadas de decisão da extração na mina.

## **1.3 Objetivos**

O objetivo principal dessa pesquisa é gerar parâmetros experimentais para alimentar modelos matemáticos do comportamento dos rejeitos no processo de consolidação para estimar o processo de enchimento da barragem de rejeitos de Bom Jardim determinando, portanto, a sua vida útil.

Avaliar técnicas de manejo do processo produção de rejeitos como as técnicas de separação dos rejeitos grossos por meio de tanques intermediários impactam no tempo de enchimento da barragem.

As análises do processo de adensamento dos rejeitos finos têm também como objetivo a comparação dos resultados em função dos parâmetros de entrada obtidos por ensaios de adensamento edométrico, adensamento com velocidade de deformação controlada (CRS) e adensamento hidráulico (HCT).

Finalmente, deseja-se fazer uma avaliação crítica dos softwares utilizados nesse trabalho para a realizar as modelagens do enchimento de barragens.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Sobre o Alumínio

O alumínio é o terceiro elemento em maior concentração na superfície do planeta Terra, não existindo naturalmente na sua forma metálica, sendo encontrado em associação com o oxigênio. O alumínio foi o último dos metais comuns a ser usado em processos industriais (VILLAR, 2002).

A resistência à corrosão e a alta condutibilidade elétrica e térmica do alumínio possibilita a aplicação em diversos setores. Brito e Vieira (2010), levantam algumas de suas aplicações:

- Revestimento e ferramentas dos meios de transportes tais como automóveis; aviões; barcos; bicicletas etc;
- Empacotamento de latas de bebidas; folha de alumínio, embalagens de alimentos etc.
- Tratamento da água, usado como agente coagulante;
- Na Construção civil, utilizado em caixilharia, decoração e nas estruturas;
- Na Medicina é utilizado com antiácidos e alguns analgésicos;
- Variados utensílios e ferramentas da cozinha: talheres; panelas; pia etc;
- Linhas de transmissão elétrica, apesar de a sua condutividade elétrica ser apenas 60%, devido ao seu baixo peso;
- É utilizado na engenharia aeronáutica (as amálgamas do alumínio com outros metais têm uma importância vital na construção de aviões e foguetões);
- Proponentes e explosivos;
- Revestimento de espelhos de telescópios.

O alumínio não é encontrado na forma metálica na natureza. Devido à alta afinidade pelo oxigênio, ele ocorre como íon  $Al^{3+}$ , nas formas combinadas, em rochas e minerais (CONSTANTINO *et al.*, 2002).

#### 2.1.1 Histórico do Alumínio

Na Pérsia em 6000 a.C. fabricavam potes de cerâmica com um silicato hidratado de alumínio. Outras aplicações foram realizadas na Babilônia e no Egito em 3000 a.C. na fabricação de tintas, cosméticos e produtos medicinais (MÁRTIRES, 2001).

O alumínio recebeu esse nome de Humphrey Davy em 1808, que provou a existência do metal. A rocha bauxita, de origem do alumínio, foi descoberta em 1821 no sul da França perto da aldeia de Lês Baux por P. Berthier (BRITO e VIEIRA, 2010).

Em 1825 o físico dinamarquês Hans-Christian Ørsted consegue isolar o alumínio a partir do cloreto de alumínio, porém nesses primeiros anos o metal alumínio se encontrava tão valioso quanto joias e prata. A produção destinava o uso praticamente como mordente na indústria têxtil (SAMPAIO, ANDRADE e DUTRA, 2005).

Quase simultaneamente, em 1886 o norte-americano Charles Martin Hall e o francês Paul Louis Toussaint Héroult desenvolveram o processo de produção industrial do alumínio, que passou a ser conhecido por Hall-Héroult (ABAL, 2017).

Em 1888, o químico alemão Karl J. Bayer melhorou o processo de obtenção do óxido de alumínio (alumina), denominado de Sistema Bayer (VILLAR, 2002).

Na segunda guerra ocorreu uma intensificação da exploração, novos depósitos foram achados na Guiana, Suriname, Grécia, Hungria, Jamaica e na antiga Iugoslávia. Em 1943, 14 milhões de toneladas de alumínio foram produzidas (BÁRDOSSY, 1997).

Atualmente as principais reservas de bauxita, rocha origem dos compostos de alumínio, estão localizadas na Austrália, Guiné e Brasil (IBRAM, 2019).

### **2.1.2 Extração da Bauxita**

A bauxita é uma rocha de cor avermelhada constituída de minerais de óxido de alumínio e ferro, é encontrada a poucos metros da superfície do solo, sendo que a cor da rocha é definida conforme o traço de óxidos de ferro, onde teores de 2 a 4% caracterizam as bauxitas brancas e em proporções maiores são as bauxitas vermelhas. A exploração da bauxita é motivada para a extração do alumínio (SAMPAIO, ANDRADE e DUTRA, 2005).

Os principais constituintes da bauxita são a gibbsita ( $\gamma\text{-Al(OH)}_3$ ), a bohemita ( $\gamma\text{-AlOOH}$ ) e o diásporo ( $\alpha\text{-AlOOH}$ ), em proporções variadas. As impurezas são frequentes, principalmente a halloysita, caulinita, nontrolita, óxidos de ferro, de titânio e sílica (CONSTANTINO, *et al.*, 2002).

A formação da bauxita está relacionada com o clima tropical, tendo em vista que a temperatura média acima de 20 °C e a alteração entre períodos de seca e umidade produzem o

efeito de lixiviação que, quando associado à porosidade da rocha, promove a remoção da sílica e o acúmulo dos óxidos de alumínio e ferro (SAMPAIO, ANDRADE e DUTRA, 2005).

Na região de Mirai-Mg, os depósitos de bauxita encontram-se modelados em morros meia-laranja com topos bauxitizados, onde duas camadas podem ser destacadas: a bauxita com teores de  $Al_2O_3$  maiores que 40% na parte superior dos morros e o saprólito com teores menores que 40% e textura argilosa e areno-argilosa na camada inferior (BORGES e CARVALHO, 1990).

O processo de lavra consiste na retirada do topsoil, que é a camada superior que contém matéria orgânica e cobertura vegetal e será armazenada para posterior utilização no processo de recuperação da área explorada. A camada de bauxita, logo abaixo, possui espessura média de 4 a 6 m, a qual é extraída com o uso de retroescavadeiras, sendo o transporte realizado por caminhões até a planta de processamento (DONOGHUE, FRISCH e OLNEY, 2014).

Com o objetivo de separar a bauxita dos rejeitos, é promovido o beneficiamento do minério por meio da separação granulométrica dos materiais extraídos e dos teores de bauxita. O beneficiamento envolve as seguintes etapas:

- Britagem, onde o minério é fragmentado em tamanhos menores que possibilitam o seu processamento e retirada do material que envolve a bauxita;
- Deslamagem, onde é feita a lavagem do minério, retirando os rejeitos que estejam o envolvendo;
- Deslamagem/Lavagem/Classificação granulométrica (2 mm) com 2 tromels;
- Peneiramento com 3 decks (retenções em 19 mm, 2mm e 0,5mm);
- Passante em 0,5 mm classificação em roscas e Jigues;

Após esta fase de processamento primário, os rejeitos são encaminhados para a disposição em barragens ou pilhas de rejeito, enquanto os minérios contendo bauxita são separados granulometricamente em pilhas para posterior transporte e/ou armazenamento.

## **2.2 Barragens de Rejeitos**

### **2.2.1 Considerações Gerais**

Os rejeitos podem ser dispostos de três formas principais: a céu aberto, subterrânea e subaquática. A forma mais utilizada é a céu aberto, que engloba as pilhas de estéreis e as barragens de contenção de rejeitos (LOZANO, 2006).

Em virtude da granulometria fina e do alto teor de água, os rejeitos do processamento de bauxita são encaminhados para a disposição em barragens de rejeitos por ação hidráulica. Além de reter os rejeitos, as barragens têm o papel de reservar água que é reutilizada no processamento e também para regularizar a vazão do curso d'água à jusante da planta de beneficiamento.

A escolha do tipo da barragem depende principalmente da topografia natural, das condições geológico-geotécnicas do local, das características granulométricas e propriedades de compressibilidade e resistência dos rejeitos, além de fatores econômicos e ambientais (LEMOS JÚNIOR, 2012). Dadas as características intrínsecas dos rejeitos finos de bauxitas, granulometria típica de argila a argila siltosa e a forma de lançamento como lama com teor de sólidos da ordem de 25 a 30 %, as barragens de rejeito tendem a ser do tipo aterro compactado de terra homogênea.

A técnica construtiva de barragens de rejeito de mineração contempla as alternativas de alteamento por jusante, de alteamento por montante e alteamento pela linha de centro. Um compilado das discussões é apresentado nos próximos tópicos.

### **2.2.2 Método de Alteamento por Montante**

Nesse método, a estrutura do barramento é iniciada a partir de um dique de partida, construído com materiais de boa qualidade, como enrocamento ou material argiloso compactado. A lama dos rejeitos é descarregada ao longo da crista do dique. Conforme ocorre a sedimentação do material, é formada uma praia de rejeitos. Como os materiais de maior granulometria sedimentam primeiro, eles ficam mais próximos do barramento, contribuindo para a estabilidade do maciço (REZENDE, 2013).

O alteamento é realizado com a construção de um novo dique sobre os rejeitos que já estão no reservatório. Este processo se repete com os alteamentos sucessivos até a elevação final prevista. Conforme o processo avança, cada vez mais o eixo da barragem é deslocado para o interior do montante do barramento. O dique inicial geralmente é sempre mais alto que os diques das etapas seguintes para aumentar a estabilidade do maciço como um todo (LOZANO, 2006).

Dentre as vantagens desse modelo, destacam-se: baixo custo de execução, tendo em vista o volume menor de material dos diques, e a facilidade de construção, mesmo em regiões de inclinações acentuadas (CHAMMAS, 1989).

Como desvantagens do método, podem ser citadas: baixa segurança (comparando com os outros métodos construtivos), susceptibilidade à liquefação e a possibilidade de ocorrer efeito de

piping, devido à linha freática estar muito próxima de talude da jusante e os rejeitos não serem compactados (CHAMMAS, 1989).

Este método não é empregado normalmente para barragens de rejeitos de mineração de bauxita em razão da natureza compressiva dos rejeitos finos que torna o maciço instável e sujeito a grandes variações de recalques e poropressões.

### **2.2.3 Método de Alçamento por Jusante**

Neste método, os alçamentos da barragem são realizados no sentido à jusante da barragem, envolvendo o barramento inicial (dique de partida). Assim, o sistema de drenagem interna da barragem deve ser conectado entre os diversos alçamentos e o tapete drenante na base (CHUQUIMUNI, 2005).

Dentre os principais pontos positivos desse método, destaca-se o melhor controle da percolação de água no barramento, propiciando garantias de melhor estabilidade da barragem, uma vez que todo o corpo da barragem consiste de aterro compactado. As limitantes do processo são a complexidade de realizar o alçamento, a adequação dos sistemas de drenagem, a maior quantidade de material para realizar os alçamentos e o espaço necessário à jusante do barramento. Portanto, este método tende a ser mais oneroso ao empreendedor (CHAMMAS, 1989).

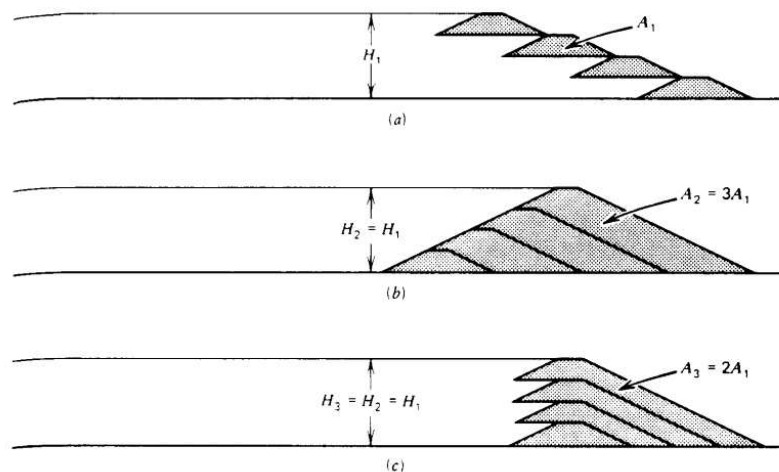
### **2.2.4 Método da Linha de Centro**

Esse método pode ser considerado uma junção dos métodos anteriores, porque o eixo da barragem é mantido na posição original enquanto ocorrem os alçamentos. Como nos outros métodos, inicialmente é construído um dique de partida, e, nos alçamentos subsequentes, o eixo da barragem não é deslocado. Tipicamente, um pequeno aterro é construído à jusante do eixo e a parte do alçamento é apoiada nos rejeitos depositados à montante do barramento principal (CHUQUIMUNI, 2005).

Em termos comparativos, este método se mantém intermediário aos outros anteriormente descritos, aproximando as vantagens e as desvantagens. Apresenta os mesmos problemas descritos para o método de alçamento por montante e não é comumente utilizado em projetos de barragens de rejeito de mineração de bauxita (LOZANO, 2006).

A Figura 1 ilustra esquematicamente os métodos de alçamento, onde A e H representam respectivamente a área e a altura de cada dique do construindo em cada etapa do alçamento.

FIGURA 1: Métodos de alteamento: (a) montante (b) jusante e (c) linha de centro



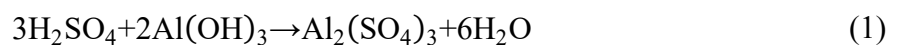
Fonte: (VICK, 1990).

### 2.3 Beneficiamento da Bauxita

O processamento da bauxita quando destinado para o uso metálico utiliza o sistema Bayer, sistema que envolve a dissolução dos compostos de alumínio em um meio básico. Porém a bauxita também pode ser destinada a produção de sulfato de alumínio. Um dos fatores para a determinação do uso é baixo teor de ferro na bauxita o que facilita o beneficiamento do sulfato de alumínio.

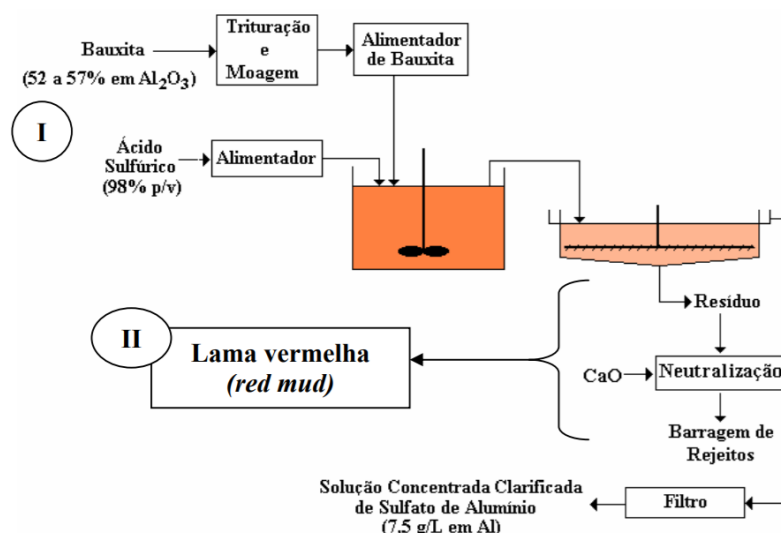
Sulfato de alumínio é um sal de fórmula  $Al_2(SO_4)_3$ , que tem a aplicação principal como floculante no tratamento de água para abastecimento urbano, outro uso é o emprego na indústria com a função de clarificação de águas industriais (SILVA e ALEJANDRO, 2005).

A sua produção a partir da bauxita envolve o tratamento com ácido sulfúrico pela equação base:



O processo resumido para produção do sulfato de alumínio pode ser visto na Figura 2:

FIGURA 2: Fluxograma da produção de sulfato de alumínio.



Fonte: (SILVA e ALEJANDRO, 2005).

O resíduo da adição ácida apresenta pH próximo de 1,5, o que impossibilita o seu descarte sobre o solo ou corpos de água e, portanto, requer que seja realizada a sua neutralização. Esse resíduo após a realização da regularização do pH, é conhecido como lama vermelha (SILVA e ALEJANDRO, 2005).

A composição da lama vermelha varia dependendo de fatores, como a natureza da bauxita, e de técnica de separação empregada. Normalmente, é composta por ferro, titânio e sílica presentes na bauxita, além do alumínio que não foi extraído durante o refino, combinado com o sódio sob a forma de um silicato hidratado de alumínio e sódio de natureza zeolítica (SILVA FILHO, ALVES e DA MOTTA, 2007).

A disposição desses rejeitos utiliza normalmente técnicas secas em virtude da maior segurança, facilidade de manuseio e menor volume de material (NGUYEN e BOGER, 1998). A alternativa mais frequente para disposição da lama vermelha é o “drystacking”. A área de disposição é dividida em leitos de secagem, onde a lama vermelha é descarregada até atingir uma determinada altura, passando-se a seguir para o leito de secagem livre e assim por diante. Quando todos os leitos de secagem estiverem ocupados, repete-se o ciclo, depositando uma nova camada de lama vermelha no leito de secagem inicial. O “dry-stacking” permite a diminuição da umidade através da evaporação e da drenagem (SOFRÁ e BOGER, 2002).

#### 2.4 Comportamento dos Rejeitos Depositados em Barragens

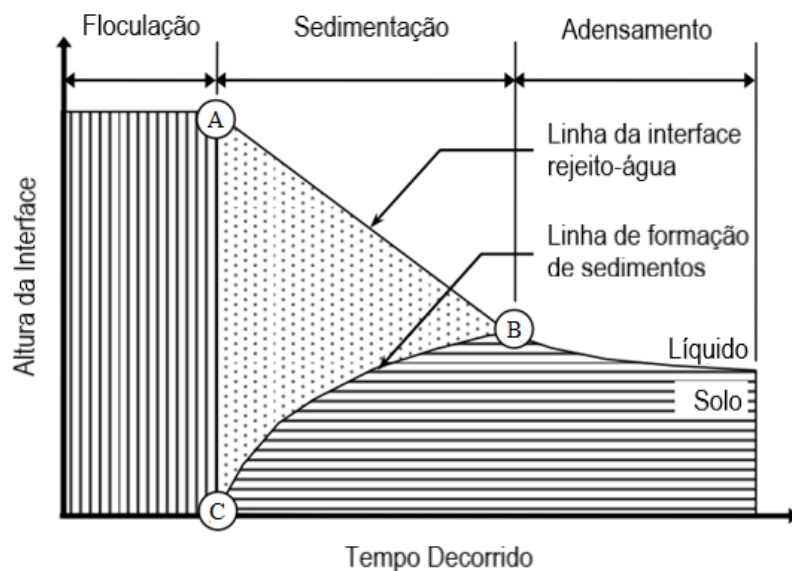
Os rejeitos possuem comportamentos geotécnicos e mecânicos diferentes dos apresentados por solos naturais. Após o lançamento dos rejeitos na barragem, eles estão

inicialmente em um estado de floculação, em seguida inicia-se o desenvolvimento do processo de sedimentação por peso próprio e posterior adensamento (CHAMMAS, 1989). Essas etapas ocorrem de maneira simultânea, conforme processo de sedimentação e posterior adensamento dos rejeitos ilustrado na Figura 3:

A principal diferença entre os processos de sedimentação e adensamento é a existência ou não de tensões efetivas. Enquanto as partículas sólidas não estão em contato, a deposição é descrita pelo processo de sedimentação. A ocorrência das tensões efetivas implica o fim da sedimentação e o início do processo de adensamento (QUISPE, 2011).

Nos parágrafos seguintes, é feita uma descrição sucinta dos dois processos e das leis físicas e modelos matemáticos que permitem a sua descrição em função do tempo transcorrido, após o lançamento da lama no lago de rejeitos da barragem.

FIGURA 3: Estado de suspensão ao longo do tempo.



Fonte: Adaptado Imai (1981).

### 2.4.1 Sedimentação

O comportamento de sedimentação pode ser determinado pela Lei de Stokes, onde a velocidade de sedimentação do material disperso depende da velocidade de sedimentação e a concentração das partículas sólidas (LIMA e LUZ, 2001).

$$v_s = v_s(v_{stokes}, \Pi) \quad (2)$$

Em que:

$v_s$  é a velocidade de sedimentação, assumida como independente do tempo;

$v_{\text{stokes}}$  é a velocidade de Stokes para uma partícula;

$n$  é a porosidade.

Além do estudo da constituição da camada de material, é preciso avaliar como o material chegou ao atual estado, ou seja, caracterizar a formação da camada depositada através da sedimentação.

Para a avaliação das condições dinâmicas em que o sedimento se encontra, é preciso descrever as propriedades das partículas que compõem o rejeito depositado, como o tamanho, a forma e a densidade (SOARES, 2010).

Os índices de vazios em solos granulares depositados são influenciados pela intensidade e forma de deposição. Ocorrendo deposições turbulentas, seria provocada a formação de maiores índices de vazios (VILLAR, 2002).

#### **2.4.2 Adensamento**

A hipótese de deformações infinitesimais da teoria do adensamento de Terzaghi para o processo de adensamento dos solos finos apresenta incoerências em virtude das condições das duas últimas hipóteses simplificadoras adotadas (i. a compressibilidade e condutividade hidráulica são constantes durante o processo de consolidação e ii. as tensões totais permanecem constantes no interior do solo à medida que a consolidação ocorre), não sendo apropriada para descrever o processo de adensamento dos rejeitos, que ocorre com deformações finitas (BOTELHO, 2001).

Gibson, England e Hussey (1967) e Schiffman (1980) desenvolveram uma teoria unidimensional, denominada teoria do adensamento com deformações finitas ou teoria do adensamento de grandes deformações, que é mais adequada para estudar o adensamento de rejeitos. Porém, o movimento das partículas durante o processo de adensamento ocorre de maneira complexa e a adoção de sistema de coordenadas apropriados se torna útil no tratamento matemático do processo.

##### **2.4.2.1 Sistema de coordenadas**

A dinâmica do comportamento dos fluidos exige abordagens próprias da mecânica dos fluidos, mesmo obedecendo aos princípios básicos de conservação de massa e energia da

mecânica clássica. Para a análise do comportamento das partículas, existem dois sistemas de coordenadas tipicamente usados (GOBBI, *et al.*, 2010).

No sistema de coordenadas lagrangeanas, as propriedades da partícula são determinadas conforme a sua posição inicial ( $a$ ). Durante o fluxo do fluido, cada partícula tem suas próprias propriedades, como densidade, velocidade ou impulso, e essas propriedades podem mudar com o tempo. O sistema é baseado na proposição de conservação de massa de Newton (QUISPE, 2011).

Gobbi et al. (2010) aponta que no sistema langrangeano, essas propriedades são em função da condição inicial, independentemente do tempo. Como experimentalmente é difícil considerar o comportamento de uma partícula em um mesmo instante, esse sistema é restrito a simulações matemáticas. No sistema de coordenadas eulerianas ( $\xi$ ) as deformações são tomadas a partir de uma região do fluxo, e o acompanhamento de como as partículas se comportam nessa região a partir de suas posições iniciais (GOBBI, *et al.*, 2010).

Uma aplicação dos sistemas de coordenadas é feita para analisar o excesso de poropressão. Como a poropressão ( $u$ ) é dada em função da posição e do tempo, logo no sistema de coordenadas eulerianas e langragianas, respectivamente, o excesso de poropressão pode ser expresso por:

$$u = u(\xi, t) \quad (3)$$

$$u = u(a, t) \quad (4)$$

Porém, como nas coordenadas eulerianas a posição num tempo  $t$  é dada também em função da posição inicial e do tempo, assim, o excesso de poropressão pode ser reescrito como:

$$u = u(\xi(a, t), t) \quad (5)$$

Na teoria do adensamento de Gibson, England e Hussey (1967), os autores recomendam a utilização do sistema de coordenadas langragianas para a condição do adensamento a grandes deformações.

#### **2.4.2.2 Modelagem do processo de adensamento**

A teoria do adensamento de Gibson, England e Hussey (1967) para deformações finitas foi originalmente desenvolvida para camadas finas e homogêneas de argilas saturadas. Mais tarde, ficou provado que a teoria também era válida para a adensamento com grandes

deformações de camadas espessas, podendo-se considerar o peso próprio, tanto na fase sólida como na fase líquida. Esta teoria descreve de forma adequada a magnitude da deformação dos solos altamente compressíveis, baseada nas seguintes suposições:

- Meio saturado constituído de três componentes: sólidos, estrutura do solo e vazios preenchidos de água;
- Interação entre o esqueleto do solo e os vazios preenchidos com água;
- A lei de Darcy governa o movimento do fluxo;
- Sólidos e água são incompressíveis;
- A massa dos sólidos e do líquido são consideradas separadamente e não existem reações químicas entre os elementos constituintes.

A equação diferencial do adensamento unidimensional de grandes deformações em coordenadas lagrangeanas é a seguinte:

$$\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right) \frac{d}{de} \left[ \frac{k}{(1+e)} \right] \frac{\partial e}{\partial a} - \frac{\partial}{\partial a} \left[ \frac{k}{\gamma_w} \frac{(1+e_0)}{(1+e)} \frac{d\sigma'}{de} \frac{\partial e}{\partial a} \right] = \frac{1}{(1+e_0)} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (6)$$

Onde:

$\gamma_w$  é o peso específico da água em  $\text{kN/m}^3$ ;

$\gamma_s$  é o peso específico dos sólidos em  $\text{kN/m}^3$ ;

$a$  é a coordenada lagrangeana;

$e$  é o índice de vazios;

$e_0$  é o índice de vazios para ( $t = 0$ );

$k$  é o coeficiente de condutividade hidráulica em  $\text{m.s}^{-1}$ ;

$t$  é o tempo.

Para o estudo do comportamento dos rejeitos considerando os efeitos unidimensionais, a expressão da compressibilidade do rejeito com a predominância das tensões verticais foi apresentada por Liu e Znidarcic (1991):

$$e = A(\sigma' + Z)^B \quad (7)$$

Em que:

$\sigma'$  (kPa) é tensão efetiva vertical;

As constantes A (kPa<sup>-1</sup>), B (adimensional) e Z (kPa) são parâmetros de ajuste, ou seja, são coeficientes a serem determinados experimentalmente. No estudo apresentado por Liu e Znidarcic (1991), estes coeficientes de ajuste são obtidos no ensaio de adensamento com percolação induzida ou ensaio de adensamento hidráulico (HCT).

De forma análoga, a relação entre a condutividade hidráulica (k) e o índice de vazios (e) é expressa por Somogy (1980):

$$k = Ce^D \quad (8)$$

Onde:

C (m.s<sup>-1</sup>) e D (adimensional) são parâmetros da equação que podem ser determinados a partir do ensaio de adensamento hidráulico (HCT).

### **2.4.3 Ressecamento**

Ao final do processo de formação do lago de rejeitos, em que cessa o lançamento da lama no lago, ocorre o processo de secamento da lama a partir da superfície exposta e prosseguindo em profundidade. Conforme a camada do topo de rejeito fino é exposta às condições atmosféricas, a camada se contrai devido às deformações que ocorrem por causa do processo de ressecamento. Inicialmente ocorrem as deformações verticais (unidimensionais) e em seguida ocorre uma contração tridimensional, que são deformações volumétricas causadas pela abertura de trincas de ressecamento (ABU-HEJLEH e ZNIDARČIĆ, 1995a).

Com a combinação dos efeitos da evaporação e da drenagem ocorre a contração do solo, gerando forças de tração que são as responsáveis pelas trincas. As primeiras trincas (primárias) possuem orientação paralela, enquanto as secundárias são aproximadamente normais às primárias. Combinando as ações, há a formação de colunas de solo com seções quadrangulares ou hexagonais na superfície (SILVA e OLIVEIRA FILHO, 2003).

O índice de vazios, no instante da abertura da trinca, relaciona-se com a tensão vertical total através da "cracking function". Essa relação pode ser obtida, experimentalmente, através de ensaio de laboratório ou de observações de campo.

A " $\alpha$  function" foi introduzida no modelo para descrever a geometria das trincas, desde o momento em que a contração tridimensional livre se inicia, até um determinado índice de vazios  $e$ . A " $\alpha$  function" é a razão entre o volume da coluna de solo trincada e a sua altura, sendo expressa em unidade de área.

Para a "cracking function" e para a " $\alpha$  function", Yao e Znidarcic (1997) desenvolveram as seguintes funções empíricas:

$$e_{CR} = \frac{1}{d} + \frac{1}{(b\sigma_{CR} + a)^c} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{1+e}{1 + \frac{2}{3}e_{CR} + \frac{1}{3}e} \quad (10)$$

Em que  $\sigma_{CR}$  é a tensão vertical na abertura da trinca,  $e_{CR}$  é o índice de vazios na abertura da trinca;

$e_{CR}$  é o índice de vazios na abertura da trinca;

$a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  – são parâmetros da equação, determinados através de ensaios de laboratório em centrífuga.

## 2.5 Ensaio de Adensamento Hidráulico (HCT)

Os rejeitos finos são submetidos a ensaios de adensamento com percolação induzida, adensamento HCT (BOTELHO, 2001) (ABU-HEJLEH, 1993). Esse ensaio consiste na aplicação de um fluxo induzido em um corpo de prova constituído por lama, em que as forças de percolação promovem o processo de adensamento.

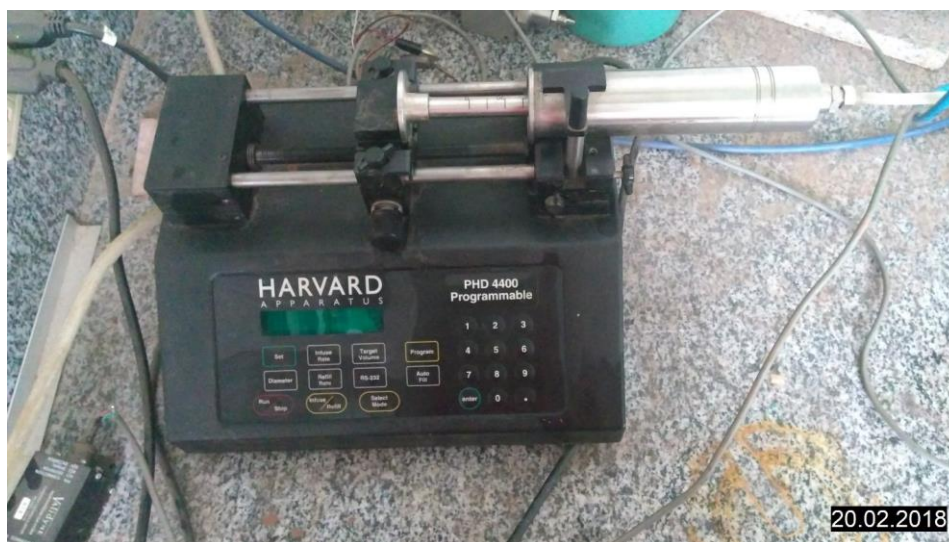
O equipamento para a realização do ensaio é descrito por Botelho (2001) e é composto por uma célula triaxial modificada, bomba de fluxo, painel de controle de pressão, transdutor diferencial de pressão, sistema de carregamento e sistema de aquisição de dados.

### 2.5.1 Bomba de fluxo

A bomba de fluxo é fabricada pela Harvard Apparatus Company, modelo PHD 4400 Programmable, que consiste de uma seringa de aço inoxidável com capacidade de 100 ml, apresentada na Figura 4. O mecanismo de funcionamento com a utilização de um motor de velocidade variável controla o sistema de infusão/remoção de fluxo da seringa. Esse motor é

ligado a uma caixa de engrenagens e a um parafuso sem fim que é responsável pelo direcionamento do pistão da seringa.

FIGURA 4: Bomba de fluxo



Fonte: Próprio autor.

A bomba de fluxo induz um fluxo controlado, podendo ser de sucção ou de injeção, em que se especifica a velocidade do fluxo com elevada acurácia e resolução. A velocidade de sucção e injeção pode ser calibrada de 0,0001  $\mu\text{l/hora}$  até 220,82 ml/min. Nos ensaios a velocidade do fluxo deve ser tal que resulte em uma poropressão entre 2 kPa e 5 kPa, e conforme recomendações, esta não deve ser menor que 0,3 kPa, nem maior que 10 kPa (BOTELHO, 2001).

Ainda segundo Botelho (2001), na fase de adensamento induzido por fluxo, recomenda-se as vazões típicas para lamas siltosas,  $q = 0,4$  a 3 ml/min, e para lamas silto-argilosas,  $q = 0,1$  a 0,2 ml/min. Na fase do ensaio de permeabilidade, recomenda-se vazões típicas para lamas siltosas,  $q = 0,1$  a 0,4 ml/min e, para lamas silto-argilosas,  $q = 0,006$  a 0,025 ml/min.

Alternativamente, pode-se utilizar seringas e/ou combinação de seringas de forma a obter-se uma capacidade volumétrica maior, pois, ao término do curso do pistão da seringa, é necessário interromper temporariamente o ensaio, e esvaziar a seringa, para então prosseguir o processo de adensamento induzido por fluxo.

A lama a ser ensaiada deve estar num teor de sólidos tal que o índice de vazios seja maior que o índice de vazios correspondente àquele obtido para as condições de tensão vertical efetiva nula. Portanto, antes do lançamento da amostra de lama na câmara da célula HCT é necessário a determinação deste índice de vazios e, caso necessário, efetuar a diluição da lama.

## 2.5.2 Célula triaxial

O ensaio é realizado em uma célula triaxial adaptada a partir de uma célula utilizada em ensaios triaxiais convencionais. Nesta célula substituiu-se a base por uma outra, composta por uma base acoplada a uma câmara cilíndrica de acrílico com diâmetro interno de 81,2 mm e altura de 166,8 mm (com régua acoplada para verificação da altura do corpo de prova) e pedra porosa, enquanto que o topcap, adaptado ao diâmetro da câmara, é perfurado para permitir a instalação de pedra porosa.

A base da célula possui quatro saídas, todas controladas por válvulas de esfera, sendo uma delas conectada ao reservatório estático contendo água destilada; a segunda é conectada ao sistema de ar comprimido para aplicação da contrapressão na amostra; a terceira saída é conectada na bomba de fluxo, local em que se adapta uma conexão de desvio para o transdutor de pressão diferencial; e a quarta saída é conectada na outra extremidade do transdutor de pressão diferencial. A célula triaxial e as conexões do transdutor podem ser vistas na Figura 5.

No topo da célula existe um suspiro para possibilitar a saída do ar durante o enchimento da câmara, uma haste de carregamento para a aplicação de cargas no corpo de prova durante o ensaio de adensamento por percolação induzida (fase de carregamento em etapas). Também é acoplado um extensômetro com a função de determinar a altura do corpo de prova durante as fases do ensaio.

FIGURA 5: Câmara triaxial e transdutor de poropressão



Fonte: Próprio autor.

### 2.5.3 Transdutor diferencial de pressão

O transdutor diferencial de pressão é o equipamento com a função de medir as diferenças de pressão entre o topo e a base do corpo de prova que está sendo submetido a um fluxo induzido. Este fluxo promove a geração de uma diferença de poropressão medida entre o topo e a base do corpo de prova, que gera o processo de adensamento da lama. O transdutor é conectado a um sistema de aquisição de dados e a um microcomputador, o que possibilita o monitoramento da poropressão de forma contínua durante todo o ensaio. O transdutor diferencial de pressão pode ser visto na Figura 6.

FIGURA 6: Transdutor diferencial



Fonte: Próprio autor.

O transdutor possui duas câmaras de aço inoxidável, com uma saída de pressão e válvula de sangria em cada uma. Uma das saídas de pressão é conectada à base do corpo de prova para medir a poropressão gerada durante o ensaio (a mesma saída que é conectada a bomba de fluxo), enquanto a outra é conectada ao reservatório de pressão possibilitando a determinação da diferença de pressão.

O transdutor deve ser calibrado para a realização da leitura da pressão, a qual é obtida por meio de uma equação linear. A equação de calibração é inserida no programa de aquisição de dados e apresenta os valores corrigidos automaticamente.

A calibração é feita com o uso de um sistema de duas buretas graduadas conectadas entre si com uma mangueira com válvula e duas saídas. As buretas são preenchidas com água destilada e niveladas, cada uma das saídas é conectada na saída do transdutor, são retiradas quaisquer bolhas de ar no circuito e a válvula que conecta as duas buretas é fechada. A válvula

de sangria de um dos lados do transdutor é então aberta entre estágios sucessivos de leitura para diferentes alturas da coluna de água registrada nas buretas.

#### **2.5.4 Sistema de aplicação de carga**

Para a fase de carregamento em etapas do ensaio HCT, a carga é aplicada por meio de pesos que são colocados no pendural que é apoiado no pistão da célula triaxial. Alternativamente pode-se usar cilindros pneumáticos para a aplicação deste carregamento, o qual geralmente resulta em um acréscimo de tensão vertical da ordem de 50 kPa.

#### **2.5.5 Aquisição de dados**

O transdutor diferencial é ligado a um sistema de aquisição de dados, que por meio do programa de aquisição transfere os dados para serem armazenados num microcomputador. O intervalo das leituras pode ser definido em função da duração do ensaio e pode ser ajustado em qualquer momento durante a execução do mesmo.

Os dados obtidos são plotados em um gráfico com a variação da poropressão gerada em função do tempo, para orientar o usuário quanto ao término do ensaio.

#### **2.5.6 Procedimento do ensaio HCT**

O ensaio de HCT consiste de quatro etapas distintas: determinação do índice de vazios para tensão efetiva nula, adensamento hidráulico induzido por percolação, ensaio de carregamento em etapas e o ensaio de condutividade hidráulica (BOTELHO, 2001).

Após a preparação da amostra diluída, determina-se o índice de vazios correspondente à tensão efetiva nula ( $e_{00}$ ). Nesse procedimento o material é colocado em dois béqueres de vidro formando uma camada de 50 mm. A seguir esses béqueres são fechados com sacos plásticos e elásticos para evitar a evaporação da água. Esse material é deixado em repouso por alguns dias para que se sedimente. Após esse período observa-se a formação de uma lâmina de água na superfície da amostra, que deve ser retirada cuidadosamente. A seguir, coleta-se certa quantidade de lama da superfície com auxílio de uma pipeta ou bomba de fluxo, para a determinação do seu teor de umidade. Considerando-se que a lama se encontra totalmente saturada, determina-se então o índice de vazios correspondente à tensão efetiva nula ( $e_{00}$ ).

Como alternativa, o  $e_{00}$  pode ser determinado utilizando o método do prato, onde a amostra é colocada em um prato de aproximadamente 25 cm de diâmetro, sendo que o diâmetro

maior tem o objetivo de facilitar a retirada da água na parte superior e a coleta do material no estado de sedimentação sem tensões.

O  $e_{00}$  é calculado no método do béquer e pelo prato conforme a equação:

$$e_{00} = G_s \cdot w_{00} \quad (11)$$

Onde:

$G_s$  é a densidade específica dos grãos dos sólidos;

$w_{00}$  é a umidade das amostras retiradas na superfície sedimentada.

Silva (2008) em virtude da imprecisão do método do béquer para a determinação do  $e_{00}$  propôs o ensaio de sedimentação em coluna, conforme ilustrado na Figura 7.

FIGURA 7: Ensaio coluna determinação  $e_{00}$ .



Fonte: Próprio autor.

Nesse ensaio deve ser determinado o índice de vazios inicial ( $e_0$ ) e a altura inicial ( $H_{0col}$ ) da mistura na coluna. Relacionando esses valores é possível determinar a altura dos sólidos na coluna ( $H_{Scol}$ ) pela equação:

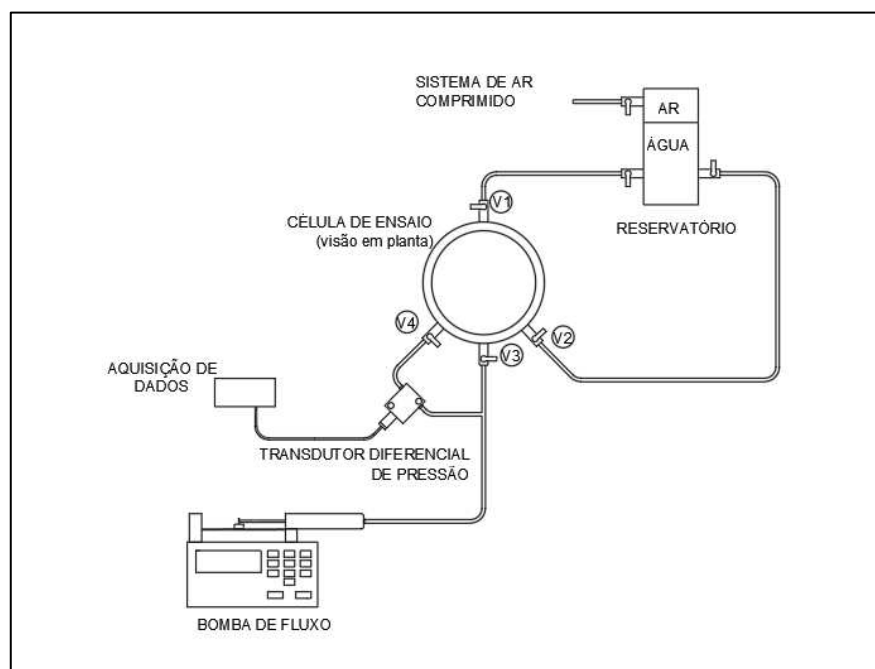
$$H_{Scol} = \frac{H_{0col}}{1+e_0} \quad (12)$$

Após a sedimentação mede-se a altura final do material na coluna ( $H_F$ ), sendo valor de  $e_{00}$  calculado conforme a equação:

$$e_{00} = \frac{H_{Fcol}}{H_{Scol}} - 1 \quad (13)$$

O esquema para a realização do ensaio pode ser visto na Figura 8, devendo-se tomar o cuidado de antes do ensaio verificar se as válvulas estão entupidas, em especial no transdutor de pressão diferencial, sendo que as mangueiras das conexões não podem ser dobradas ou conter bolhas.

FIGURA 8: Esquema do Ensaio HCT.



Fonte: Próprio autor.

A lama homogeneizada, na condição de tensão efetiva nula, é colocada na câmara de adensamento com o auxílio de uma concha e/ou um funil, para passar à etapa de adensamento induzido por percolação. Essa fase consiste na aplicação no corpo de prova de um fluxo induzido e descendente imposto por uma bomba de fluxo, que provocará o adensamento pelas forças de percolação. Quando a diferença de pressão entre o topo e a base da amostra tornar-se constante, a altura final da amostra ( $H_f$ ) é medida. Segundo Znidarcic et al. (1992) esse valor de diferença de pressão nunca pode ser inferior a 0,3 kPa e superior a 10 kPa. Em seguida calcula-se a tensão efetiva na sua base ( $\sigma'_b$ ) pela equação:

$$\sigma'_b = \sigma'_0 + \gamma_w H_s (G_s - 1) + \Delta P_s \quad (14)$$

A altura equivalente dos sólidos  $H_s$  (m) é determinada por:

$$H_s = \frac{W_d}{G_s \gamma_w A_s} \quad (15)$$

Onde:

$W_d$  é peso seco da amostra (kN);

$A_s$  é a área da seção transversal da amostra ( $m^2$ );

$\Delta P_s$  é a diferença de pressão entre o topo e a base para a etapa de adensamento hidráulico induzido por forças de percolação (kPa).

A seguir, são aplicadas tensões efetivas verticais incrementais ( $\sigma'_L$ ) no topo da amostra, monitorando o deslocamento vertical resultante ao longo do tempo. Quando o deslocamento estabilizar, mede-se a altura da amostra ( $H_L$ ) e calcula-se o índice de vazios correspondente ( $e_L$ ) utilizando a equação:

$$e_L = \left( \frac{H_L}{H_S} \right) - 1 \quad (16)$$

Mantendo-se o carregamento realiza-se o ensaio de condutividade hidráulica, aplicando uma vazão  $q$  constante. Quando a diferença de pressão entre o topo e a base for constante, registra-se este valor ( $\Delta P_L$ ) e calcula-se o coeficiente de condutividade hidráulica ( $k_L$ ) pela equação:

$$k_L = \frac{v H_L \gamma_w}{\Delta P_L} \quad (17)$$

A velocidade de fluxo ( $v$ ) imposta (m/s) é dada pela equação:

$$v = \frac{q}{A_s} \quad (18)$$

### 2.5.7 Determinação dos parâmetros do processo de adensamento

O programa SICTA (Seepage Induced Consolidation Analysis), desenvolvido por Abu-Hejleh e Znidarcic (1995b), é usado para análise dos resultados dos ensaios HCT e permite a obtenção dos parâmetros de adensamento de solos altamente compressíveis.

Para a determinação dos coeficientes A, B, C, D e Z das expressões de compressibilidade (Equação 7) e condutividade hidráulica (Equação 8), inicialmente deve ser feita a escolha dos parâmetros B e D como parâmetros independentes. Os parâmetros A, C e Z são obtidos por otimização via método de Gauss-Newton resolvendo as equações 19 a 21 (ZNIDARČIĆ, *et al.*, 2011).

$$Z = \frac{\sigma'_L}{\left(\frac{e_L}{e_{00}}\right)^{\frac{1}{B}} - 1} \quad (19)$$

$$A = \frac{e_{00}}{Z^B} \quad (20)$$

$$C = \frac{k_L}{e_L^D} \quad (21)$$

O programa computacional denominado SICTA – “Seepage Induced Consolidation Test Analysis” (ABU-HEJLEH e ZNIDARČIĆ, 1995b), possui os seguintes dados de entrada:

- Peso específico da água ( $\gamma_w$ );
- Peso específico das partículas dos sólidos ( $\gamma_s$ );
- Altura inicial da amostra ( $H_0$ );
- Índice de vazios correspondente à tensão efetiva nula ( $e_{00}$ );
- Tensão efetiva aplicada no início do ensaio ( $\sigma'_0$ );
- Velocidade de Darcy ( $v$ );
- Altura fina da amostra ( $H_L$ );
- Diferença de poropressão entre o topo e a base da amostra ( $u_b$ );
- Índice de vazios da amostra ao fim do carregamento ( $e_L$ );
- Tensão efetiva que a amostra foi submetida ao final do ensaio ( $\sigma'_b$ );
- Coeficiente de permeabilidade ( $k_L$ )

Além desses dados são inseridos alguns parâmetros para a realização da análise, sendo eles:

- O número de nós na interação, mínimo de 30, máximo de 100, sendo o padrão 41;
- O valor de erro total aceitável, mínimo de  $1 \times 10^{-3}$ , máximo de  $1 \times 10^{-5}$ , sendo o padrão  $1 \times 10^{-4}$ ;

- O número mínimo de interações para que a precisão do erro seja atingida, mínimo de 15, máximo de 30, sendo o padrão 25.

Para a análise dos dados também são necessárias algumas estimativas de alguns parâmetros listados a seguir:

- O limite inferior para o parâmetro B: valor mínimo assumido igual a -5;
- O limite superior para o parâmetro B: valor máximo sugerido igual a -0,05;
- O valor inicial para o parâmetro B: valor sugerido igual a -0,25;
- O limite inferior para o parâmetro D: valor mínimo sugerido igual a 0,1;
- O limite superior para o parâmetro D: valor máximo sugerido igual a 8;
- O valor inicial para o parâmetro D: valor sugerido igual a 3,5;
- A diferença mínima total normal, mínimo de  $1 \times 10^{-5}$ , máximo de  $1 \times 10^{-3}$  e valor sugerido igual a  $1 \times 10^{-4}$ ;
- O número mínimo de interações para que a diferença seja atingida, mínimo de 40, máximo de 60 e valor sugerido de 50.

O programa SICTA foi originalmente escrito em linguagem de programação FORTRAN e o código fonte está disponível nas referências citadas e foi disponibilizado na forma de um arquivo executável pelos autores.

### **2.5.8 Modelagem do enchimento pelos programas CONDES0 e FSconsol**

O CONDES0 é um programa elaborado por Yao e Znidarcic (1997) sendo empregado na análise de adensamento unidimensional com grandes deformações e ressecamento de solos finos altamente compressíveis. O algoritmo de cálculo utiliza a técnica de diferenças finitas e a teoria de Gibson, England e Hussey (1967).

No programa, as equações governadoras do adensamento e do ressecamento, as condições de contorno e a equação que modela os fenômenos físicos na interface solo trincado/não trincado são discretizadas, espacialmente, em uma malha uniforme, onde adota-se uma forma mista dos métodos das diferenças central e avançada, com um esquema de integração implícito no tempo (ABU-HEJLEH e ZNIDARČIĆ, 1995a).

Para a realização da simulação, como dados de entrada são necessários os seguintes:

- Parâmetros de compressibilidade e permeabilidade (A, B, C, D e Z);

- Os parâmetros da "cracking function" e o valor de  $\eta$ , caso se deseje avaliar a fase da contração tridimensional,
- A densidade real dos grãos do solo e o peso específico da água;
- A altura inicial ( $H_0$ ) ou os dados referentes à formação da camada (fases de enchimento), a condição de contorno imposta na base e no topo da camada;
- O valor dos índices de vazios mínimo ( $e_{\min}$ ) e o de formação da crosta ( $e_{cv}$ ),
- O tempo inicial para a análise e os tempos para a emissão dos arquivos de saída,
- O intervalo de tempo máximo a ser utilizado.
- O perfil de índices de vazios inicial, para o caso onde as condições iniciais não serem aquelas do final da sedimentação (ALMEIDA, OLIVEIRA FILHO e NOGUEIRA, 2005).

O FSconsol é um programa similar de adensamento de grandes deformações 1-D com base na teoria de deformações finitas. A deposição dos rejeitos pode ser realizada por meio do lançamento de uma altura, ou considerando uma área e o lançamento de um volume de rejeitos nessa área. Conforme se altera a altura do barramento, a área equivalente pode ser atualizada, nos dois casos podem ser considerados carregamentos pontuais ou distribuídos ao longo do tempo. A curva de compressão ( $e - \sigma'$ ) no FSconsol segue a equação:

$$e = A \cdot \sigma'^B + M \quad (22)$$

As variáveis A, B e M são parâmetros empíricos semelhantes aos da Equação 7. No caso da condutividade hidráulica a equação utilizada é idêntica à equação 8.

A partir dos parâmetros obtidos no SICTA, a inserção dos dados no FSconsol pode ser realizada pela opção Data, nessa guia são inseridos os índices de vazios para cada tensão aplicada. A guia "Compressibility Data" pode ser vista na Figura 9;

FIGURA 9: Área de inserção dos pontos da curva de compressibilidade no FSconsol.

Compressibility Data		
#	Stress	Void Ratio
	Pascals	
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0

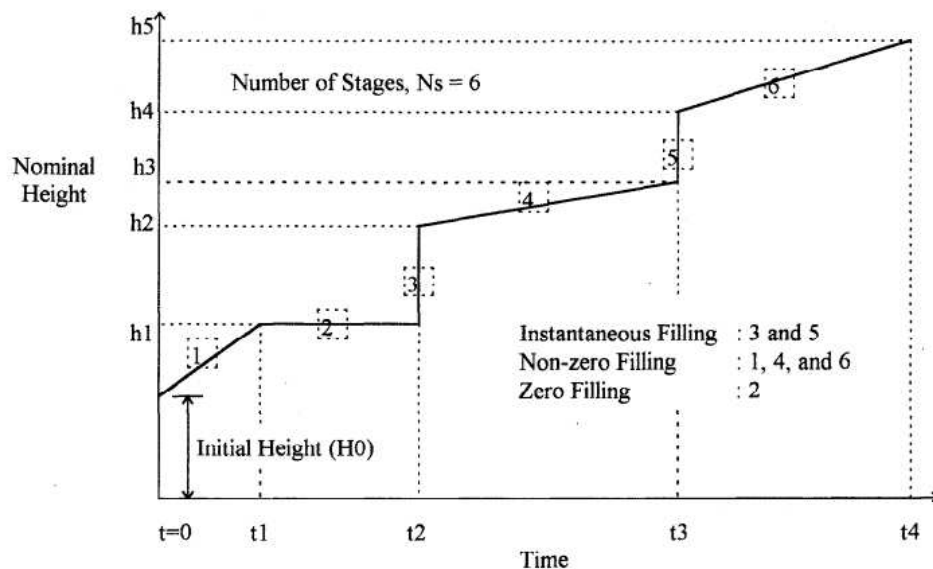
Fonte: GWP Software Inc. (2007).

O resultado das análises no CONDES0 e no FSconsol é a curva de enchimento da barragem de rejeitos ao longo do tempo, considerando a evolução do processo de adensamento.

A curva de enchimento do reservatório representa a evolução das cotas dos depósitos de rejeitos acumulados ao longo dos anos. A chamada curva de enchimento nominal representa a condição teórica de um arranjo envolvendo, exclusivamente, o teor de sólidos presentes nos rejeitos lançados (mantendo-se a condição saturada dos rejeitos e desconsiderando-se quaisquer efeitos de adensamento). A curva de enchimento corrigida engloba os efeitos do adensamento ocorridos nos rejeitos depositados anteriormente e os efeitos do lançamento das etapas em análise (PEREIRA, 2006).

A ilustração do comportamento da curva de enchimento, conforme as diversas etapas (nula, pontual ou distribuída) de lançamento de material em uma barragem pode ser vista na FIGURA 10.

FIGURA 10: Ilustração da curva de enchimento conforme depósitos ao longo do tempo.



Fonte: (YAO e ZNIDARCIC, 1997).

## 2.6 Ensaio de adensamento incremental (SIC)

As maiores tensões aplicadas no ensaio HCT estão na faixa de 50 kPa, porém outros ensaios de adensamento como o incremental (ou edométrico) e o CRS podem mostrar qual o comportamento do material acima desse nível de tensões. Cabe ressaltar que esses ensaios não são destinados para a análise do material na forma de lama sendo, portanto, empregadas as amostras de rejeito em um estado já adensado na barragem.

O ensaio de adensamento incremental (SIC - Standard Incremental Consolidation)) tem suas bases nos estudos de Terzaghi e Fröhlich (1936). O princípio básico é aplicação incremental e gradativa de uma tensão vertical, sobre um corpo de prova confinado por um anel metálico e pedras porosas no topo e no fundo que possibilitam somente o escoamento da água em seu interior e a deformação vertical. O incremento da tensão deve ser realizado após a estabilização do estágio anterior, o que geralmente ocorre em 24 horas (MONTEMEZZO, 2005).

A prensa utilizada no ensaio é a CONBEL™ Consolidation Load Frames, que utiliza pressões pneumáticas para instantaneamente aplicar o valor da tensão desejada. Esta prensa possui extensômetro eletrônico, associado à aquisição de dados que possibilita leituras das deformações verticais durante cada estágio de carga. A prensa utilizada pode ser vista na Figura 11:

FIGURA 11: Prensa para ensaio de adensamento incremental.



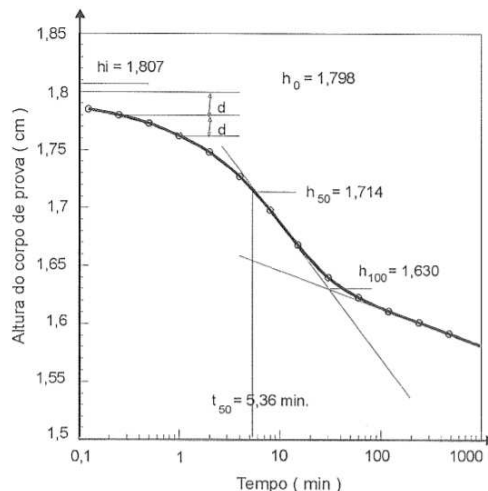
Fonte: Próprio autor.

A tensão de pré-adensamento é o maior valor de tensão efetiva vertical a que o solo foi submetido em campo. Essa tensão pode ser definida por meio de métodos gráficos, sendo os principais o de Casagrande (1936) e Pacheco Silva (1970).

No método de Casagrande é utilizado o gráfico de índice de vazios em função dos valores das tensões verticais em escala logarítmica. No ponto de maior curvatura são traçadas duas retas, a primeira tangente à reta virgem e a segunda na horizontal. A tensão de pré-adensamento

do solo é determinada pela interseção do prolongamento da bissetriz ao ângulo formado por estas duas retas com o prolongamento da reta de compressão virgem do solo, como é ilustrado na Figura 12.

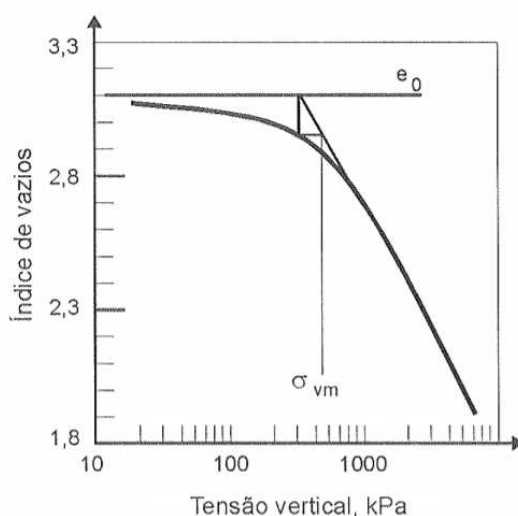
FIGURA 12: Determinação tensão pré-adensamento pelo Método de Casagrande.



Fonte: Pinto (2006).

O Método de Pacheco Silva também utiliza o gráfico de índice de vazios versus tensão vertical em escala logarítmica, para a determinação da tensão de pré-adensamento. Neste método prolonga-se a reta virgem até encontrar a reta horizontal do índice de vazios inicial. Desse ponto de intercessão é traçada uma reta vertical até a curva de compressão, desse encontro é traçada uma reta horizontal até que encontre o prolongamento da reta virgem, a abscissa desse ponto será o valor da tensão de pré-adensamento, o procedimento é ilustrado na Figura 13.

FIGURA 13: Determinação tensão pré-adensamento pelo Pacheco.



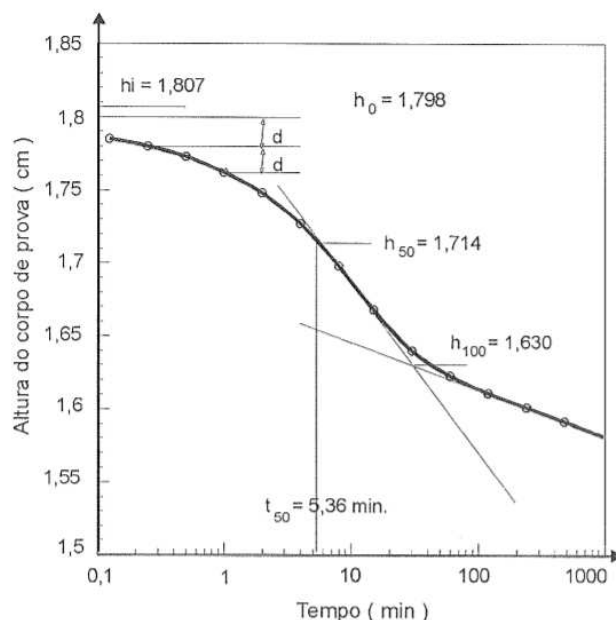
Fonte: Pinto (2006).

O coeficiente de adensamento vertical ( $c_v$ ) é outro parâmetro de interesse no ensaio de adensamento incremental. Ele é calculado para cada estágio de carregamento pelo método de Casagrande (1936) ou Taylor (1942). O primeiro método utiliza o gráfico índice de vazios versus logaritmo do tempo e o segundo utiliza o gráfico índice de vazios versus raiz quadrada do tempo.

No método de Casagrande (1936) inicialmente deve ser determinada a altura do corpo de prova no início do adensamento primário usando a parte parabólica no trecho de adensamento primário, como apresentado na Figura 14.

A altura final do adensamento primário é dada pela ordenada do ponto formado a partir da interseção da tangente do ponto de inflexão da curva e a assíntota do trecho final da curva.

FIGURA 14: Determinação  $c_v$  pelo Método de Casagrande.



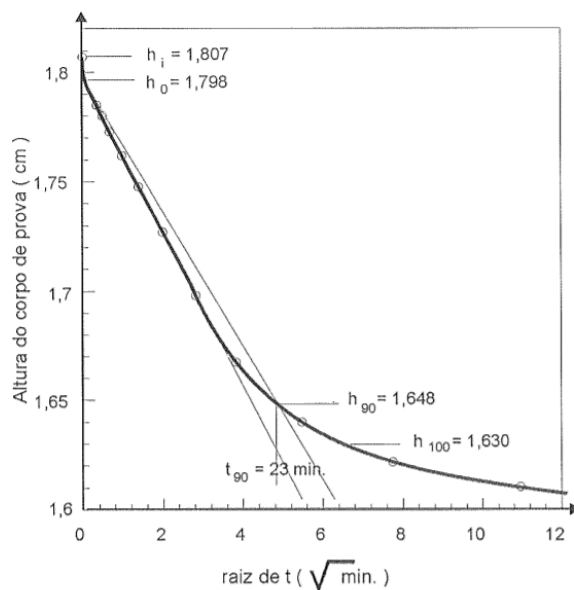
Fonte: Pinto (2006).

A altura do corpo de prova com 50% do adensamento ( $H_{50}$ ) é a média desses dois valores. Com o tempo relativo a essa altura ( $t_{50}$ ), determina-se o  $c_v$  conforme a equação:

$$c_v = \frac{0,197H_{50}^2}{t_{50}} \quad (23)$$

No método de Taylor (1942) os dados estão na escala de raiz do tempo, o trecho inicial assemelha-se a uma reta, dessa reta é traçada uma segunda reta com o valor das abscissa multiplicado por 1,15. Como mostrado na Figura 15.

FIGURA 15: Determinação  $c_v$  pelo Método de Taylor.



Fonte: Pinto (2006).

No ponto onde a reta citada anteriormente cruza com a curva do adensamento são retirados o tempo ( $t_{90}$ ) e altura ( $H_{90}$ ) em que ocorrem 90% do adensamento. Aplica-se a seguinte fórmula para determinar o  $c_v$ .

$$c_v = \frac{0,848H_{90}^2}{t_{90}} \quad (24)$$

As principais limitações do ensaio de adensamento incremental são tempo decorrido para a realização do ensaio e as limitações decorrentes das hipóteses levantadas por Terzaghi sobre a constância da condutividade hidráulica e da compressibilidade do solo durante a realização do ensaio, além de não considerar a ocorrência do adensamento secundário ao longo do primário, como apontado por Wahls (1962).

## 2.7 Ensaio de adensamento com velocidade de deformação controlada (CRS)

O Adensamento com Velocidade Controlada de Deformação, também denominado Constant Rate of Strain Consolidation (CRS), é uma forma de analisar o comportamento de adensamento de uma amostra de solo. Diferentemente do Ensaio Incremental, nesse caso não são realizados aumentos da tensão aplicada e a espera da estabilização do adensamento da amostra para o carregamento, sendo proposta a aplicação de uma deformação constante em função do tempo (FOX, PU e CHRISTIAN, 2014).

Os primeiros ensaios foram realizados por Hamilton e Crawford (1959), como alternativa para a determinação da tensão de pré-adensamento com um tempo de ensaio menor que o adensamento edométrico incremental.

Para a utilização dessa técnica, além da leitura da deformação vertical, devem ser analisadas a poro pressão na parte inferior da amostra, o que provocou uma dificuldade inicial para a utilização da técnica, em função da necessidade de se registrarem continuamente as leituras destes parâmetros durante todo o ensaio, e em intervalos reduzidos de tempo. Para tanto, exige-se um sistema de aquisição de dados e dispositivos elétricos e/ou eletrônicos para a medição das forças aplicadas, dos deslocamentos do topo da amostra, e das poropressões, de forma simultânea e ao longo de todo o tempo de duração do ensaio. Portanto, a difusão desta técnica esteve diretamente relacionada ao desenvolvimento e barateamento da tecnologia associada aos transdutores, sistemas de aquisição de dados e computadores. Tipicamente, um equipamento CRS é composto pela estrutura de aplicação de carga axial com velocidade controlada, dotado de uma célula de carga, um transdutor pressão, e um transdutor de deslocamento tipo LVDT, além de uma célula de adensamento (SAMPLE e SHACKELFORD, 2012). Os componentes da célula do ensaio CRS podem ser vistos na Figura 16.

FIGURA 16: Componentes da célula do ensaio CRS



Fonte: Próprio autor.

O ensaio consiste na aplicação de uma tensão vertical no topo da amostra, que gera um excesso de poropressão a partir do topo e se propaga até a base da amostra. Este excesso de poropressão é medido pelo transdutor de pressão colocado na base da amostra.

Durante o ensaio são obtidas as leituras referentes a: i) deformação axial ( $\Delta H$ ); ii) carregamento axial ( $P$  ou  $\sigma_v$ ); iii) excesso das poropressões ( $\delta u$ ); iv) e o tempo decorrido ( $t$ ). Com base nessas leituras, calcula-se o coeficiente de adensamento ( $C_v$ ), índice de vazios ( $e$ ) e deformação vertical ( $\Delta H$ ) (MONTEMEZZO, 2005).

### 2.7.1 Considerações sobre a velocidade do ensaio CRS

A razão entre poropressão na base da amostra e a tensão vertical ( $u_b/\sigma_v$ ) é um dos parâmetros de maior importância no ensaio servindo como determinante da velocidade do ensaio.

Wissa et al (1971) propuseram uma abordagem diferente sobre a velocidade utilizada no ensaio baseado na teoria de Terzaghi (1943), onde adota-se a suposição que a amostra sofre deformações infinitesimais. As três últimas hipóteses adotadas por Terzaghi são substituídas por outras duas diferentes, conforme listado a seguir:

Hipóteses assumidas pela teoria de Terzaghi (1943):

- O módulo edométrico e permeabilidade do solo permanecem constantes durante o processo de adensamento;
- A tensão total se mantém constante ao longo do tempo;
- A tensão efetiva e o índice de vazios mantêm relação linear.

E as novas proposições:

- O coeficiente de adensamento  $c_v$  é constante;
- O coeficiente de permeabilidade ( $K$ ) e o coeficiente de compressibilidade volumétrica ( $m_v$ ) são independentes das tensões e deformações.

Como base nessas proposições os resultados do ensaio podem ser determinados através das seguintes equações:

#### a) Poropressão

Como a parte superior é drenada, nesse local a poropressão é igual a zero. Para as outras posições segue o valor da poropressão dado pela equação:

$$u = \frac{v \cdot \gamma_a \cdot H}{k} \left[ z - \frac{z^2}{2H} \right] \quad (25)$$

Onde,

$\nu$  é o coeficiente de Poisson;

$\gamma_a$  é o peso específico da água;

$k$  é o coeficiente de permeabilidade;

$z$  é a distância entre a face superior e o ponto analisado;

$H$  é a altura total do corpo de prova;

#### b) Coeficiente de Permeabilidade Volumétrica

Para atender à suposição de que  $m_v$  é constante a distribuição da poropressão deve ocorrer então independente do tempo. Logo o coeficiente de compressibilidade volumétrica é calculado por:

$$m_v = \frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \sigma_v} = \nu \frac{\Delta t}{\Delta \sigma_v} \quad (26)$$

Em que:

$\varepsilon$  é a deformação;

$\Delta \sigma_v$  é a variação da tensão total;

$\Delta t$  é o tempo decorrido.

#### c) Coeficiente de adensamento ( $c_v$ )

Para a determinação do coeficiente de adensamento no ensaio CRS Wissa et al. (1971) propuseram abordagens diferentes em relação a esse parâmetro, utilizando considerações lineares e não lineares, em função do comportamento do solo.

Comportamento Linear:

$$c_v = \frac{H^2}{2u_b} \cdot \left( \frac{\Delta \sigma_v}{\Delta t} \right) \quad (27)$$

Comportamento Não-Linear:

$$c_v = \frac{H^2 \cdot \log\left(\frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}}\right)}{2 \cdot \Delta t \cdot \log\left(1 - \frac{u_b}{\sigma_{v1}}\right)} \quad (28)$$

Onde:

H é a altura do corpo de prova;

$u_b$  é a poropressão na base;

$\Delta\sigma_v$  é a variação de tensão total;

$\Delta t$  é o intervalo de tempo;

$\sigma_{v1}$  é a tensão total no início do intervalo  $\Delta t$ ;

$\sigma_{v2}$  é a tensão total no tempo no final do intervalo  $\Delta t$ .

Porém Fox, Pu e Christian (2014) concluíram que a melhor forma de abordar o  $c_v$  num estágio n do ensaio CRS seria por meio da adaptação realizada pela ASTM D4186 (1989) com a compressão linear, utilizando a equação:

$$c_{v,n} = \frac{H_0 H (\Delta\sigma_{n+1} - \Delta\sigma_{n-1})}{2u_{b,n} (t_{n+1} - t_{n-1})} \quad (29)$$

d) Tensão efetiva vertical média ( $\sigma'_v$ )

O valor médio da tensão efetiva vertical, normalmente representado no eixo das abscissas nas curvas de “ $e \times \sigma'_v$  (escala Log)”, é dado pela equação:

$$\sigma'_v = \sigma_v - \frac{2}{3} u_b \quad (30)$$

### 2.7.2 Determinação da velocidade de deformação

A velocidade de deformação a ser empregada no ensaio CRS depende do tipo do solo, do equipamento disponível e dos objetivos específicos do ensaio.

Um dos aspectos importantes deste ensaio é a razão entre poro pressão medida na base da amostra e a tensão vertical ( $u_b/\sigma_v$ ) que serve como determinante da velocidade do ensaio.

Dentre as recomendações práticas deste ensaio, no que concerne à velocidade de aplicação das tensões verticais, é de consenso que a poro pressão gerada na base atinja um valor que não seja elevado para a obtenção de bons resultados de coeficientes de adensamento. Caso a velocidade de deformação seja elevada ocorreria a geração de elevados valores de poropressão e, conseqüentemente, gradientes hidráulicos muito superiores aos observados nas condições de campo. A limitação da velocidade de ensaio de forma que a relação  $u_b/\sigma_v$  não exceda 0,3, normalmente é aceita como razoável e os resultados do ensaio serão compatíveis com a teoria geral do adensamento.

A partir da fórmula do princípio das tensões efetivas ( $\sigma' = \sigma - u$ ), pode-se inferir algumas ponderações sobre o comportamento da velocidade. Caso a velocidade do ensaio seja muito elevada o valor da poropressão também será elevado o que reduzirá a pressão efetiva no sistema, por outro lado caso a velocidade do ensaio seja muito baixa a poro pressão tenderá a um valor muito baixo e pouco relevante na variação da pressão efetiva.

A ASTM D4186 (1989) recomenda a adoção da velocidade com base no Limite de Liquidez, segundo a Tabela 1:

Tabela 1: Velocidade do ensaio segundo ASTM D4186.

<b>Faixa de Limites de Liquidez (%)</b>	<b>Velocidade de Deformação (% /min)</b>
Até 40	0,04
40 a 60	0,01
60 a 80	0,004
80 a 100	0,001
100 a 120	0,0004
120 a 140	0,00001

Fonte: (ASTM, 1989)

Uma das desvantagens da orientação da ASTM, é que em casos de solos com um Limite de Liquidez muito elevados, tem-se tempos de ensaio muitos longos.

Para Smith e Wahls (1969) a relação ( $u_b/\sigma_v$ ) poderia ter o valor máximo de 50% e a velocidade seria então determinada pela equação empírica:

$$v = \frac{C_v C_c}{m^2 H (1 + e_0)} \cdot \left[ \frac{u_b / \sigma_v}{1 - 0,7 (u_b / \sigma_v)} \right] \quad (31)$$

Onde  $m$  é o coeficiente de proporcionalidade que corresponde à porcentagem da altura do corpo de prova [ $m = (H - \Delta h) / H$ ] encontrada no momento de valor máximo de  $u_b / \sigma_v$  (0,6 a 0,8). Impondo-se um valor de  $u_b / \sigma_v$ ,  $v$  é determinado pela seleção dos valores de  $C_v$ ,  $C_c$  e  $m$ . A relação máxima de  $u_b / \sigma_v$  para Smith é de 50%.

Wissa et al. (1971) apontam uma orientação diferente para a determinação da velocidade de carregamento, propondo uma estimativa de valores da razão  $u_b / \sigma_v$  bastante inferior, na faixa de 2% a 5%, então uma velocidade de 0,0025 a 0,009 mm/min.

Armours e Drnevich (1986) aplicaram o desenvolvimento teórico de Wissa et al (1971) estabelecendo uma equação empírica para a determinação da velocidade de deformação a ser utilizada para o ensaio CRS:

$$v = \frac{-C \cdot P_A \cdot k_0}{\gamma_A \cdot H_0^2} \log[1 - (u_b / \sigma_v)_{\max}] \quad (32)$$

Onde:

$C$  é um coeficiente dependente do índice de liquidez (IL) do material, pela equação:

$$C = e^{(8-3IL)} \quad (33)$$

$k_0$  é a condutividade hidráulica inicial;

$(u_b / \sigma_v)_{\max}$  é o valor máximo para a relação entre a poropressão e a tensão total.

A maior limitação dessa formulação é a necessidade de utilizar dados do ensaio como a condutividade hidráulica para a determinação da velocidade com que o ensaio deve ser realizado. Assim, seria necessário a realização de mais de um ensaio para calibração dos parâmetros de ensaio ou a determinação do coeficiente de permeabilidade utilizando algum outro tipo de ensaio.

## 2.8 Conclusões Parciais

Na literatura são encontrados alguns estudos sobre o enchimento de barragens (VILLAR, 2002); (PEREIRA, 2006) e (SILVA, 2008). Porém, apesar de existirem sistemas de separação dos rejeitos de Ferro através da sedimentação antes do lançamento desses rejeitos em barragens (SOARES, 2010), não são encontrados casos do uso dos tanques de sedimentação preliminares para os rejeitos da exploração de bauxita. É possível que sistemas de manejo similares não sejam

divulgados pelas empresas da área de mineração, mesmo que tais técnicas possuem potencial para otimização do gerenciamento das barragens de rejeitos.

Na equação geral do adensamento (Eq. 6) o sentido da análise do sentido das coordenadas a ser tomado (zero na parte inferior ou no topo) influência no sinal da primeira parcela, no trabalho original de Gibson, England e Huney (1967) é mantido o “±” no início da equação. A utilização apenas do sinal positivo decorre da preferência de se adotar o ponto de referência na parte inferior da camada do material em adensamento.

Sobre a mesma equação outro ponto a se discutir é a adoção da massa específica dos sólidos como um valor constante, sendo que na condição de exploração a mudança área de lavra pode encontrar um material com a densidade específica diferente daquela em que foi realizado o estudo.

A bomba utilizada no ensaio HCT deve ser robusta em função da contrapressão a que é submetida, caso a seringa seja cheia e seja preciso inverter o fluxo a bomba pode não ter força suficiente para sobrepor a contrapressão que foi aplicada.

A contrapressão utilizada no ensaio HCT segundo autores (BOTELHO, 2001); (LIU e ZNIDARČIĆ, 1991) tem a principal função de promover a saturação da amostra e pedras porosas utilizadas no procedimento. A amostra utilizada no HCT normalmente está na condição de lama o que já ocasiona a sua saturação e se as pedras porosas forem mantidas em saturação, poderia ser averiguado a necessidade e o impacto da aplicação da contrapressão no ensaio.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e características da barragem de rejeitos

O processo de geração de rejeitos, manejo, lançamento e a evolução do processo de enchimento do lago de rejeitos serão estudados para a Barragem de rejeitos Bom Jardim, que está localizada nas instalações de Mineração BAUMINAS, no município de Mirai em Minas Gerais.

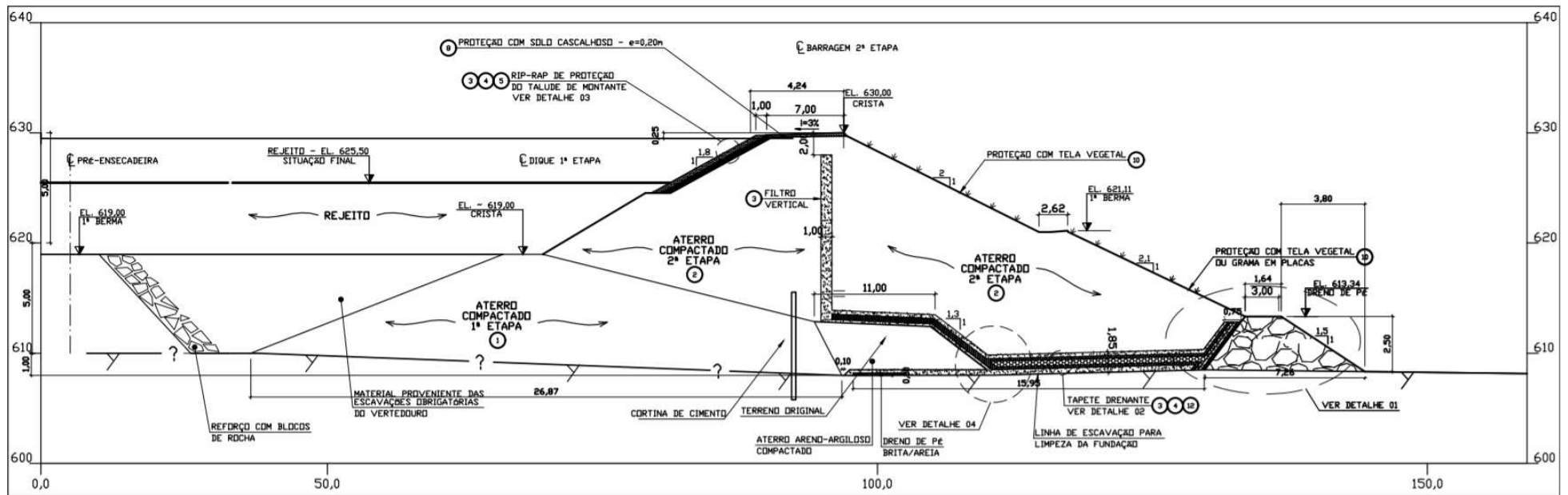
A Barragem de Bom Jardim apresenta as seguintes características:

- Cota de base da barragem 610,00 m;
- Cota da crista da barragem: 630,00 m;
- Bacia Hidrográfica: 7,2 km<sup>2</sup>;
- Altura do barramento: 23 m, sendo a altura máxima de deposição de rejeitos de 16 m;
- Comprimento de crista: 65,70 m;
- Área de Inundação (Elev. 626,50 m): 235 000 m<sup>2</sup> (23,5 ha);
- Área de Inundação (Elev. 630,00 m): 266 000 m<sup>2</sup> (26,6 há);
- Volume Total do Reservatório (Elev. 626,50 m) =  $1,93 \times 10^6$  m<sup>3</sup>;
- Volume de deposição de rejeitos até a Elev. 626,00 m: aproximadamente  $1,818 \times 10^6$  m<sup>3</sup>. A seção típica da barragem de Bom jardim é apresentada na Figura 17.

Geotecnicamente, a Barragem Bom Jardim pode ser descrita como uma barragem de terra homogênea com filtro vertical tipo chaminé.

A barragem Bom Jardim foi construída entre os anos de 2008 e 2009 e entrou em operação em 2009. No projeto original, não foi previsto o seu alteamento, no entanto, o mesmo é possível desde que seja feito pelo processo de alteamento por jusante.

FIGURA 17: Sessão típica da barragem de Bom Jardim



Fonte: Adaptado (GEOLABOR, 2009).

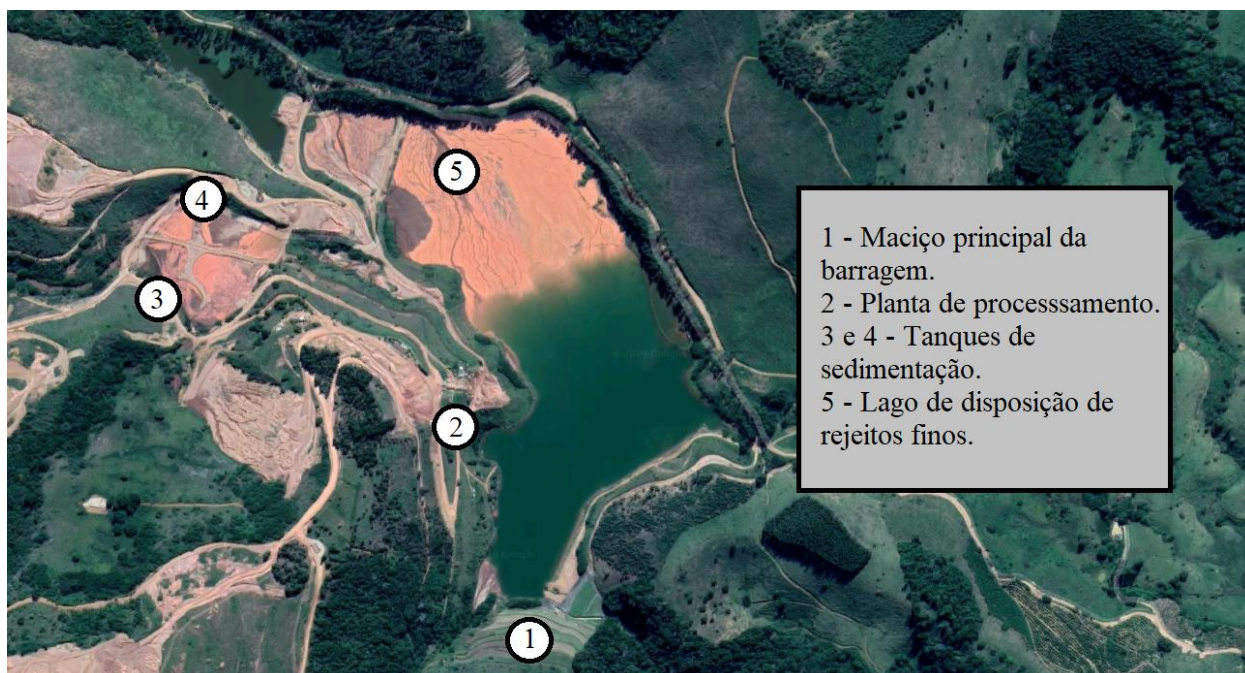
### 3.2 Tanques de Sedimentação Preliminar

A vida útil da barragem está condicionada à capacidade do reservatório de rejeitos. Foi implantado um sistema adequado de manejo dos rejeitos visando aumentar a vida útil da barragem. Este sistema de manejo consiste na construção de diques auxiliares onde se lança o rejeito total, oriundo do processo de lavagem do minério bruto. Por gravimetria, separa-se naturalmente a parte mais grossa (rejeitos arenosos) da parte fina (rejeitos finos compostos por silte e argila).

Quando um dos tanques é cheio, o mangote é trocado para a posição em um novo tanque de sedimentação adjacente. Aguarda-se até o rejeito grosso secar, cerca de cinco a sete dias, sendo coletado com escavadeiras e retornado para a área de lavra, preenchendo a cava da mina e facilitando a recuperação ambiental. Como o transporte dos rejeitos grossos retidos nos tanques de sedimentação é feito pelo mesmo caminhão que traz os produtos extraídos o que contribui para reduzir custos e facilitar o gerenciamento do barragem.

A vista geral da barragem com destaque para cada um dos locais do processamento dos rejeitos é mostrada na Figuras 18. Nas Figuras 19 a 21 pode ser visto o detalhamento do funcionamento dos tanques de sedimentação preliminar.

FIGURA 18: Visão da área da Barragem Bom Jardim.



Fonte: Adaptado Google Maps (2019).

FIGURA 19: Ponto de lançamento do rejeito para sedimentação do rejeito grosso.



Fonte: Próprio autor.

FIGURA 20: Tanque de sedimentação preliminar.



Fonte: Próprio autor.

FIGURA 21: Retirada do rejeito grosso do tanque de sedimentação.



Fonte: Próprio autor.

### 3.3 Local de coleta das amostras de rejeito

As amostras de rejeitos foram tomadas segundo três maneiras e locais diferentes.

#### 3.3.1 Local de coleta dos rejeitos finos

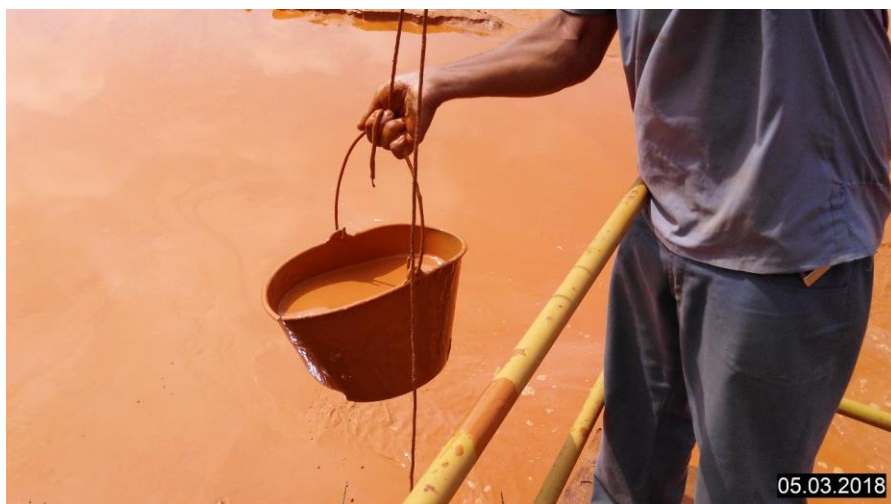
Foram realizadas coletas na tulipa onde o material fino sobrenadante, após passar pelo tanque de sedimentação, entra na barragem de rejeitos propriamente dito. Para a coleta foram seguidas as orientações de Goes, Possa e Luz (1991), a coleta foi realizada com auxílio de baldes e as amostras foram armazenadas em recipientes de capacidade de 30 l. Posteriormente essas amostras passaram por diluição para se garantir um teor de sólidos menor que aquele existe quando o índice de vazios está sob tensão efetiva nula ( $e_{00}$ ). A coleta das amostras da polpa do rejeito fino pode ser vista nas Figuras 22 e 23:

FIGURA 22: Local de coleta do rejeito fino.



Fonte: Próprio autor.

FIGURA 23: Retirada das amostras



Fonte: Próprio autor.

Essa amostra foi submetida aos seguintes ensaios:

1. Ensaio de caracterização: granulometria, LL e LP, massa específica dos sólidos;
2.  $e_{00}$  - índice de vazios inicial (sob tensão efetiva vertical nula);
3. Ensaio de adensamento hidráulico (HCT), da amostra original foram realizadas três réplicas do ensaio, denominadas 18.005, 18.016 e 18.018.

### 3.3.2 Local de coleta de rejeitos finos sedimentados

Também foram coletadas amostras de rejeito fino já em processo de adensamento na barragem de rejeitos. A coleta dessas amostras foi realizada utilizando tubos amostradores de parede fina (tipo shelby) segundo as orientações da NBR 9820 (1997).

Como a região de coleta não apresentava resistência adequada para a utilização de maquinário de sondagem SPT ou similares, as coletas foram realizadas a nível superficial utilizando escavadeira e enxada. Como o objetivo era avaliar o estado final após o adensamento dos rejeitos for concluído, a retirada do material superficial não causará interferência nos resultados, tendo em vista que, indiferentemente do índice de vazios inicial, os índices de vazios ao final do ensaio devem ser os mesmos. Além disso, o objetivo é a obtenção de material que possibilite a comparação do comportamento existente em campo com o que será modelado numericamente.

O local de coleta e o processo de retirada podem ser vistos nas Figuras 24 e 25:

FIGURA 24: Local de coleta do rejeito fino com amostrador shelby.



Fonte: Próprio autor.

FIGURA 25: Retirada do tubo shelby.



Fonte: Próprio autor.

Após a amostragem, as extremidades do tubo foram protegidas com parafina para evitar a perda de umidade e deformação das amostras.

Nessa amostra foram realizados os seguintes ensaios:

1. Ensaio de caracterização: granulometria, LL e LP, massa específica dos sólidos;
2. Ensaio de adensamento com velocidade de deformação constante (CRS);
3. Ensaio de adensamento edométrico incremental (SIC)

No ensaio de adensamento edométrico, o corpo de prova é moldado num anel tem diâmetro de 50 mm e altura de 21 mm, após montagem a célula é mantida submersa. Os estágios de carregamento foram: 5,5; 11,00; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa.

### **3.3.3 Local de coleta do material antes do processo de lavagem**

Por fim, foi realizada a coleta de amostras antes do processo de lavagem e separação da bauxita, em concordância com Goes, Possa e Luz (1991). As amostras foram coletadas em ponto localizado logo após a saída do britador e antes de entrar no lavador. Esta amostra contém a integridade do minério extraído nas cavas. A sua curva granulométrica representa a totalidade dos materiais envolvidos no processo de beneficiamento, incluindo a porcentagem de material

que é classificada como rejeito grosso ou arenoso, o rejeito fino argilo-siltoso, e a bauxita que é separada para aproveitamento comercial.

Nessa amostra, foi realizada uma lavagem na peneira 2 mm, simulando o processo executado no lavador, e posteriormente ensaios de caracterização para determinação da curva granulométrica.

### **3.4 Caracterização dos materiais**

Para a obtenção das características dos rejeitos finos, é necessário a realização de ensaio de granulometria (sedimentação e peneiramento), limites de consistência e massa específica dos sólidos.

A caracterização granulométrica será feita de acordo com as especificações da NBR 7181 (ABNT, 2018). Resumidamente o ensaio da sedimentação em proveta utilizou hexametáfosfato de sódio como defloculante, as porcentagens menores que 0,074 mm foram determinadas pela equação de Stokes a partir das leituras realizadas com densímetro, a fração retida na peneira de 0,074 mm foi seca e então realizou-se o peneiramento fino.

Para os ensaios de consistência foram seguidas as orientações da NBR 7180 (ABNT, 2016) para o limite de plasticidade (LP) e a NBR 6459 (2017) para o limite de liquidez (LL). Combinando esses valores é possível obter o índice de plasticidade (IP).

Para a massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ) segue-se as orientações da NBR 6458 (ABNT, 2017) onde foi utilizado o picnômetro e bomba de vácuo para a retirada do ar das amostras. Sendo realizadas 3 determinações para o cálculo da média aritmética como valor representativo, admitindo-se uma variação de  $\pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ .

Os parâmetros obtidos nos ensaios de caracterização servem de base para a interpretação dos demais ensaios a serem realizados.

### **3.5 Análises do processo de adensamento dos rejeitos**

Com a finalidade de estudar o processo de enchimento do lago de rejeitos foram realizadas análises do processo de adensamento segundo a teoria de adensamento com deformações finitas (GIBSON, ENGLAND e HUSSEY, 1967), utilizando os dois pacotes de software disponíveis descritos no Capítulo 2.

Em complementação, foi realizada uma análise dos percentuais de rejeitos, incluindo os rejeitos arenosos e os rejeitos finos, após a separação da bauxita, para avaliação dos volumes a serem efetivamente lançados na barragem de rejeitos (rejeitos finos argilo-siltosos), e dos rejeitos grossos (rejeitos areno-siltosos) que são transportados e depositados na cava da mina.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização dos materiais

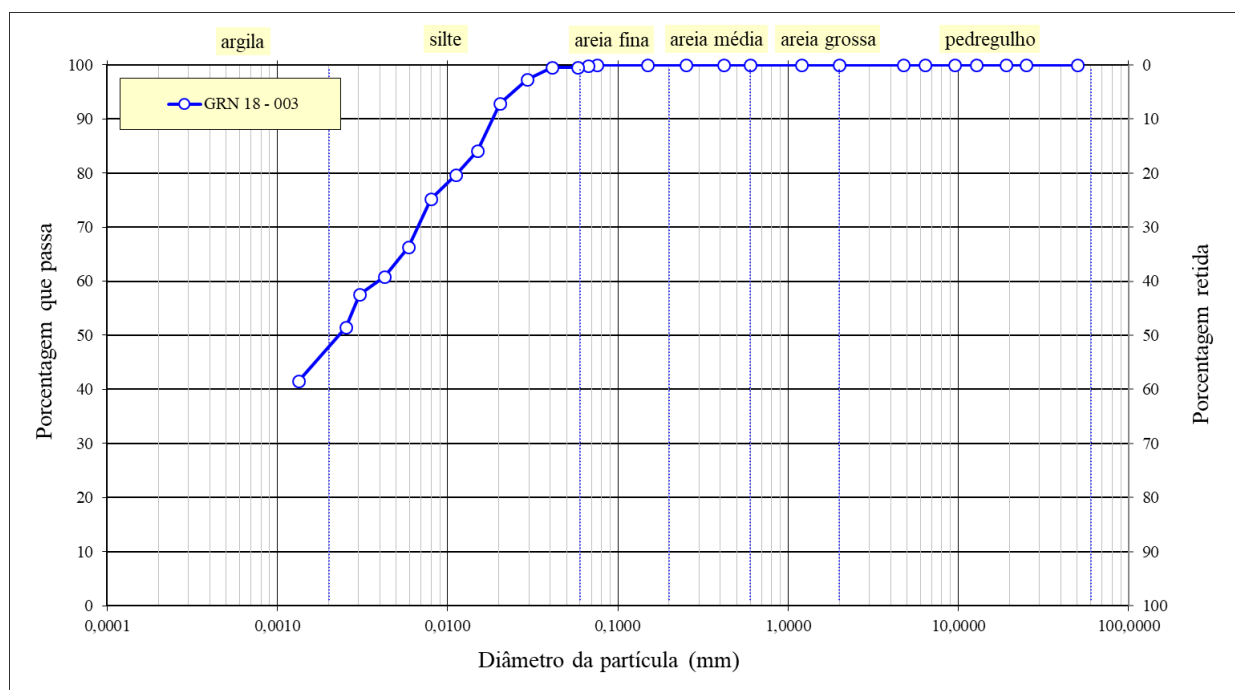
O resultado da caracterização do rejeito fino é apresentado na Tabela 2, enquanto a curva granulométrica está na Figura 26.

Tabela 2: Caracterização do rejeito fino da Barragem de Bom Jardim

Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	LP (%)	IP (%)
0,5	51,4	48,1	2,519	36	24	12

Fonte: Próprio autor.

FIGURA 26: Curva granulométrica do rejeito fino.



Fonte: Próprio autor.

Para o enchimento da Barragem de Bom Jardim, foi adotada a produção média de 3.390 toneladas de Bauxita por mês, que deve ser processada no lavador, conforme informação da BAUMINAS. A menor peneira utilizada no processo de separação de resíduos e produtos é a #10 (abertura da malha de 2 mm).

Para se determinar qual a porcentagem de material explorado que é classificado como bauxita e qual a porcentagem de rejeitos foi coletada uma amostra do material explorado e britado, antes de sua entrada no lavador e realizando seu peneiramento e lavagem na peneira #10, obtiveram-se os resultados que são apresentados na Tabela 3:

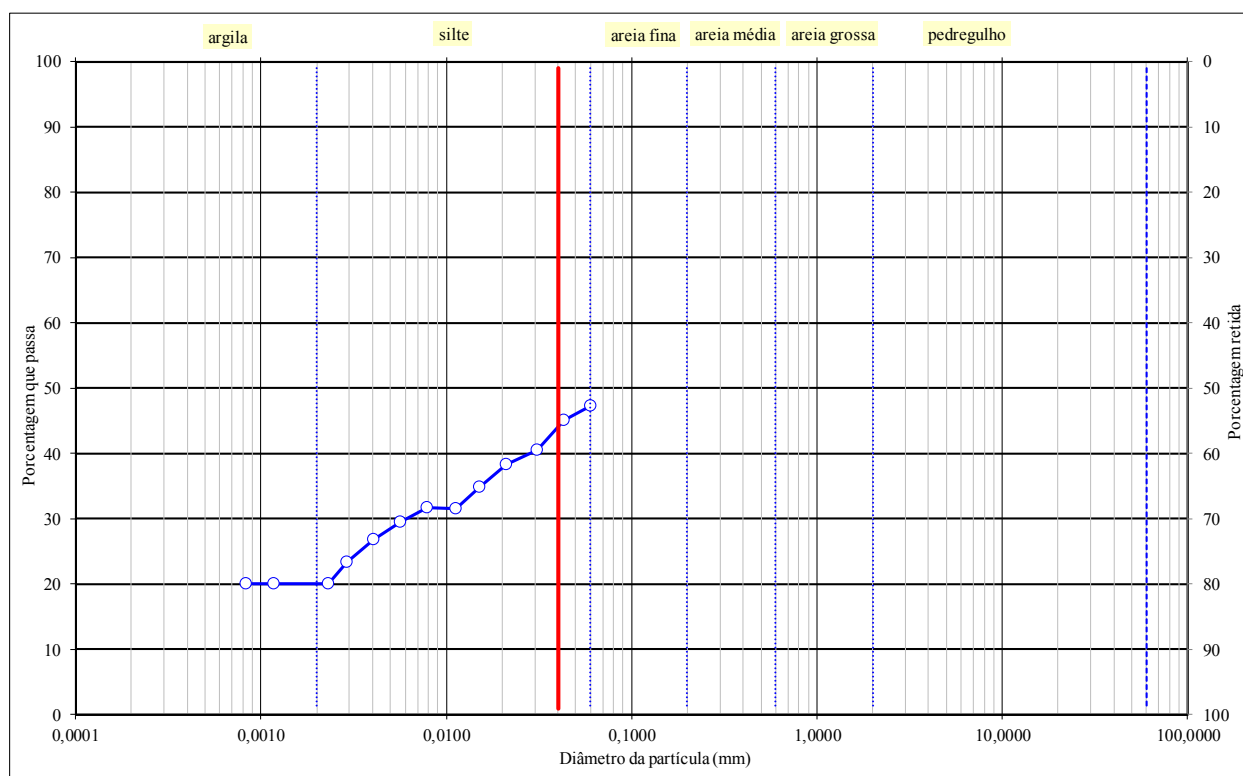
Tabela 3: Separação do material britado na peneira #10 (2 mm).

Massa Úmida (total) (g)	1060	% massa seca
Massa Seca	947	100 %
Retido #10	333	35,16 %

Fonte: Próprio autor.

É possível observar que do total de material explorado que é oriundo da cava da mina, 35,16 % são separados e tratados comercialmente como bauxita, enquanto o restante, 64,87 % de todo o material explorado, são considerados rejeitos. Com base na produção mensal, é possível definir que são produzidos mensalmente cerca de 6.260 toneladas de rejeitos. A curva granulométrica da parte menor que a peneira #10 está na Figura 27.

FIGURA 27: Curva granulométrica do rejeito após lavagem.



Fonte: Próprio autor.

Considerando-se a técnica de manejo atualmente empregada na planta, o montante total de rejeitos é lançado em tanques de sedimentação, para a separação dos rejeitos grossos que se sedimentam por ação de seu peso próprio. A parcela de rejeito fino permanece como o sobrenadante e é conduzida para a disposição final na barragem de rejeitos.

Comparando-se os resultados das curvas granulométricas mostradas na Figura 26 (rejeito fino) e Figura 27 (rejeito total), pode-se inferir que a fração de rejeitos total menor que 2 mm e

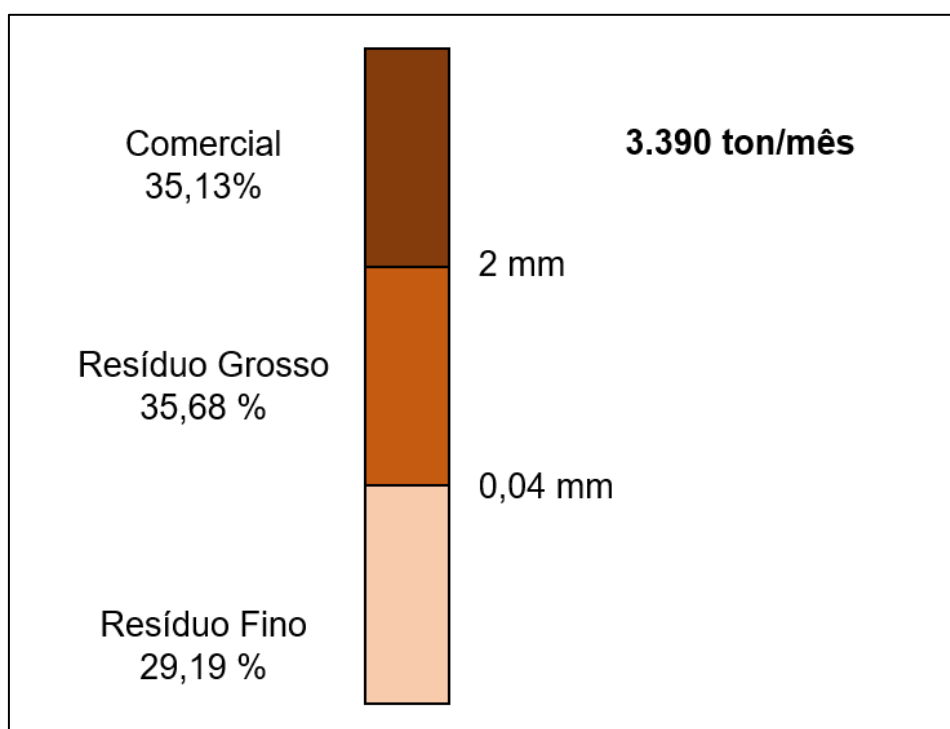
maior que 0,04 mm é da ordem de 55 % em relação ao rejeito total gerado no processo de beneficiamento primário (britagem e lavagem). Portanto, cerca de 55 % dos rejeitos gerados são compostos por rejeitos grossos arenosos que não necessariamente precisam ser lançados no lago da barragem de rejeitos, i.e, podem ser dispostos em pilhas de estéril e/ou dispostos na cava de mina, ou reaproveitados para outros fins.

Assim, cerca de 45 % dos rejeitos são compostos por rejeitos finos (argilo-siltosos) que são lançados efetivamente no lago da barragem de rejeitos ao longo da vida útil do empreendimento.

Relacionando-se com os valores de produção em toneladas, os rejeitos finos depositados na barragem por mês equivalem a 2.817 toneladas. Considerando o peso específico dos sólidos de 2,519 g/cm<sup>3</sup> o volume de sólidos anual de rejeitos finos é de 44.404 m<sup>3</sup>. Sendo os rejeitos lançados na barragem na condição de tensão efetiva nula ( $e_{00}$ ), o volume anual de rejeitos é então estimado em 57.823 m<sup>3</sup>.

Em relação ao material explorado na cava da mina, os percentuais relativos de cada uma das parcelas correspondem a: 35,13 % de Bauxita; 35,68 % de Rejeito grosso arenoso e; 29,19 % de rejeito fino (argilo-siltoso). O esquema da distribuição dos materiais pode ser visto na Figura 28.

FIGURA 28: Distribuição das frações que compõem o material explorado.



Fonte: Próprio autor.

## 4.2 Ensaio de Adensamento HCT

Os resultados das determinações do índice de vazios sob condições de tensão efetiva vertical nula ( $e_{00}$ ) para os três métodos empregados, conforme descritos no Capítulo 2, são mostrados na tabela 4:

Tabela 4:  $e_{00}$  do rejeito fino da Barragem de Bom Jardim

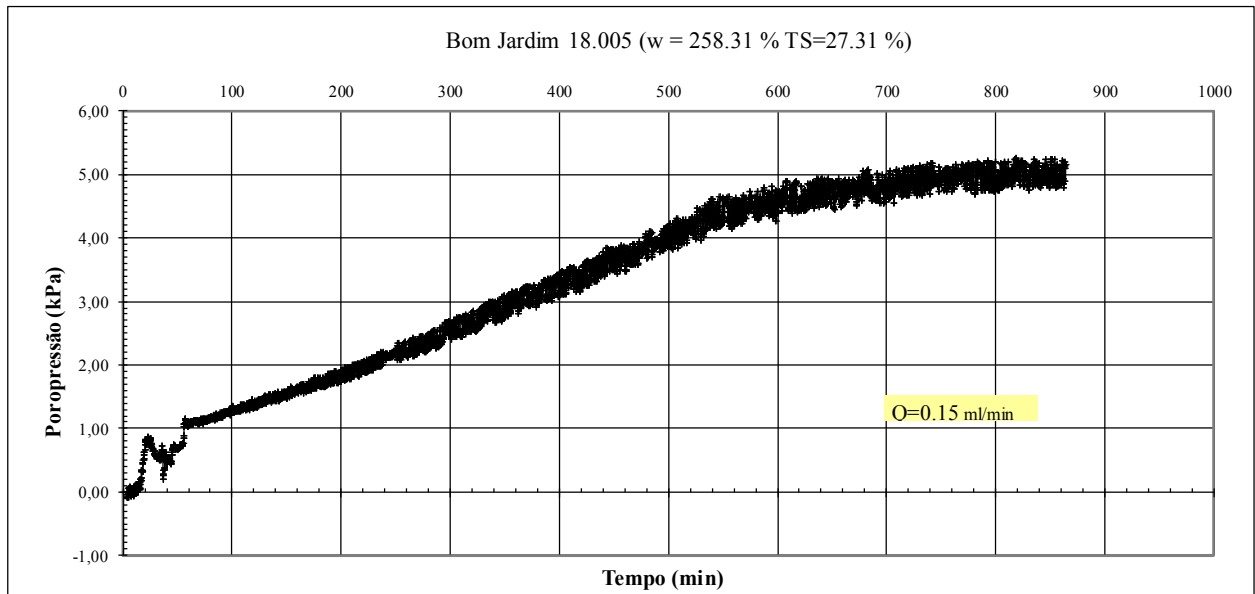
	<b><math>e_{00}</math></b>
Método do Béquero	4,040
Método do Prato	5,483
Método da Coluna	3,309

Fonte: Próprio autor.

No método do béquer, a retirada da água sobre o material sedimentado promove uma ligeira agitação da amostra, além de que a retirada das amostras para a determinação do teor de umidade pode coletar parte da água livre que não foi devidamente drenada. Já no método do prato, a superfície maior favorece a evaporação da água na amostra antes que o material esteja devidamente sedimentado. Com base nessas observações e, em concordância com Silva (2008) e Botelho (2001), o valor do  $e_{00}$  no ensaio será o obtido no método da coluna.

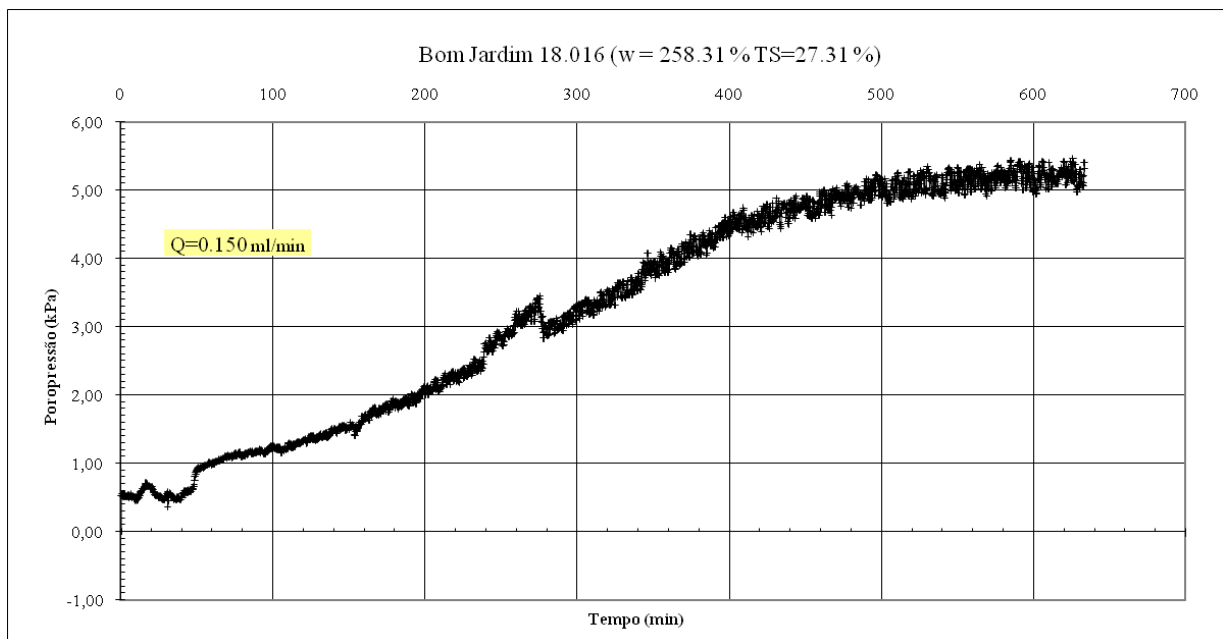
Os ensaios HCT iniciaram com o fluxo de 0,15 ml/min. O momento de parada da percolação foi a estabilização da leitura das poropressões e que estas estivessem preferencialmente dentro do intervalo de 3 a 5 kPa. Cada um dos ensaios de percolação é apresentado nas Figuras 29 a 31.

FIGURA 29: Gráfico de poropressão gerada x tempo do ensaio de adensamento hidráulico 18.005.



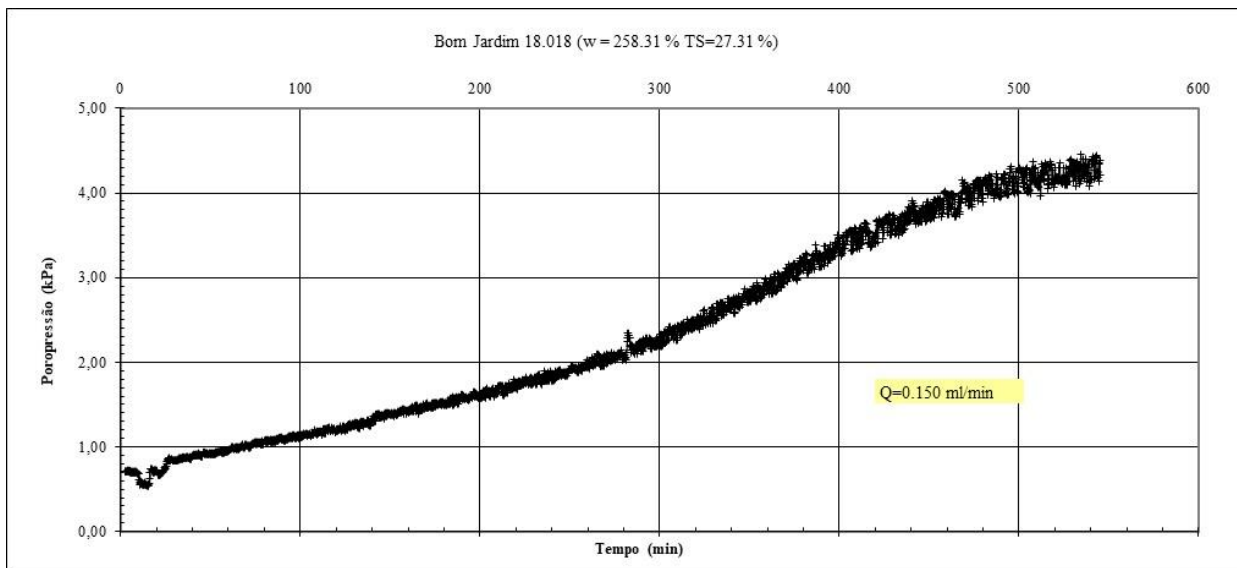
Fonte: Próprio autor.

FIGURA 30: Gráfico de poropressão gerada x tempo do ensaio adensamento hidráulico 18.016.



Fonte: Próprio autor.

FIGURA 31: Gráfico de poropressão gerada x tempo do ensaio de adensamento hidráulico 18.018.

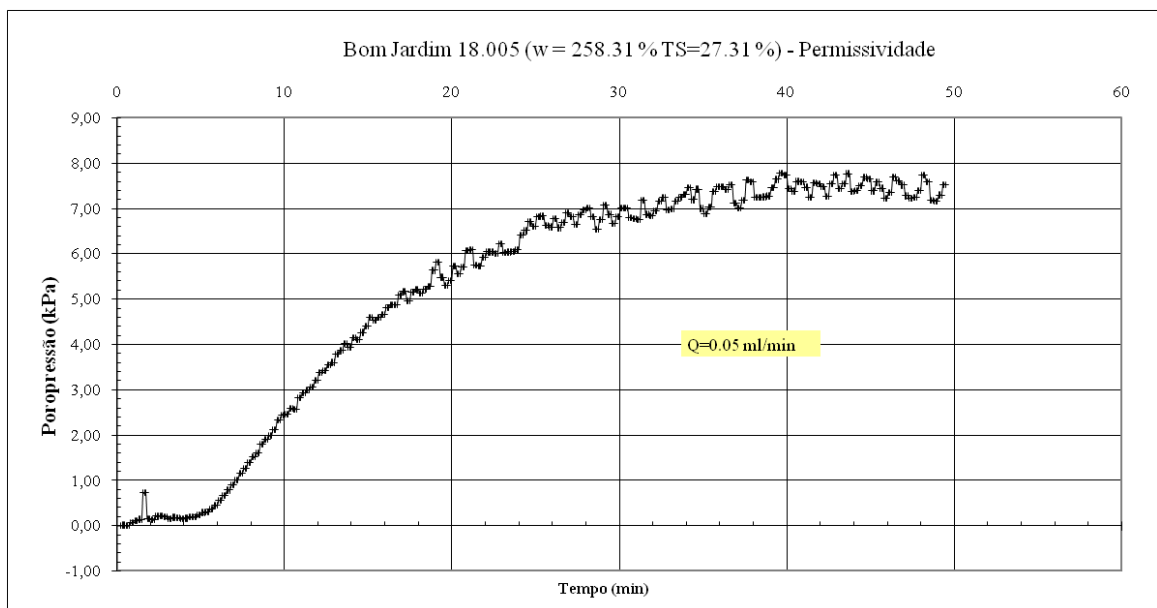


Fonte: Próprio autor.

Cada uma das amostras foi submetida à etapa de carregamento de 26 kg distribuídos em um prato de 0,6477 kg. Como a área do cilindro onde a amostra é depositada possui 51,07 cm<sup>2</sup>, a tensão aplicada na etapa de carregamento foi de 51,17 kPa.

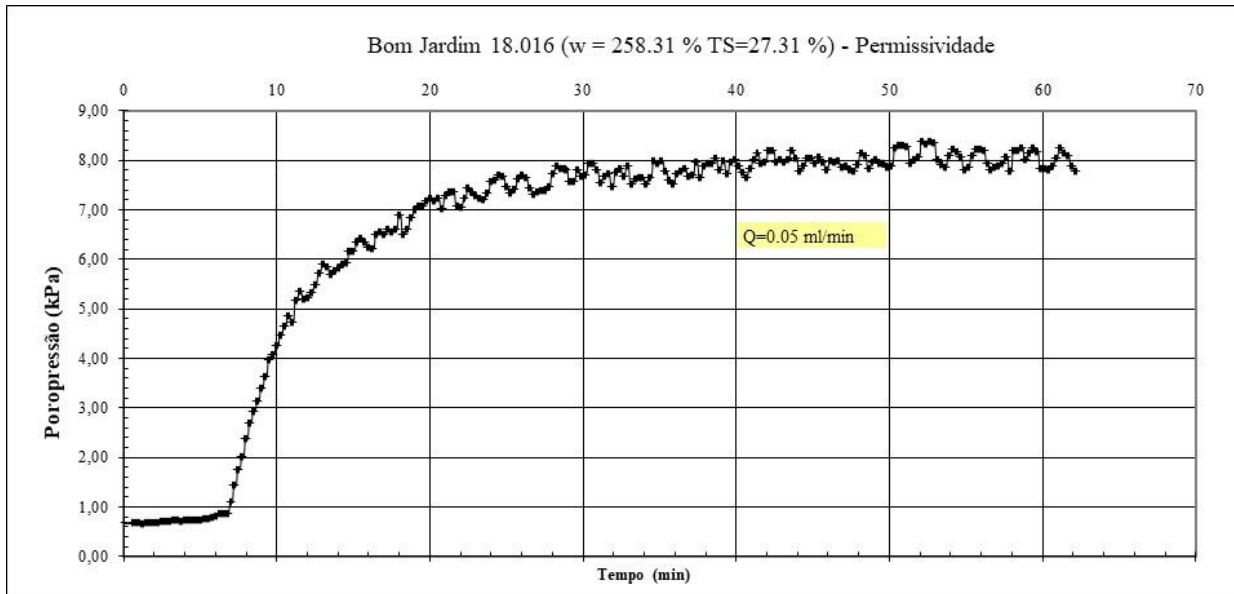
Após a estabilização do adensamento devido ao carregamento (12 a 24 horas), foi realizada a percolação das amostras com a vazão de fluxo de 0,05 ml/min para a determinação dos parâmetros relacionados à permissividade. Os gráficos da variação da poropressão em função do tempo são apresentados nas Figuras 32 a 34.

FIGURA 32: Gráfico de poropressão gerada x tempo do ensaio de permissividade 18.005.



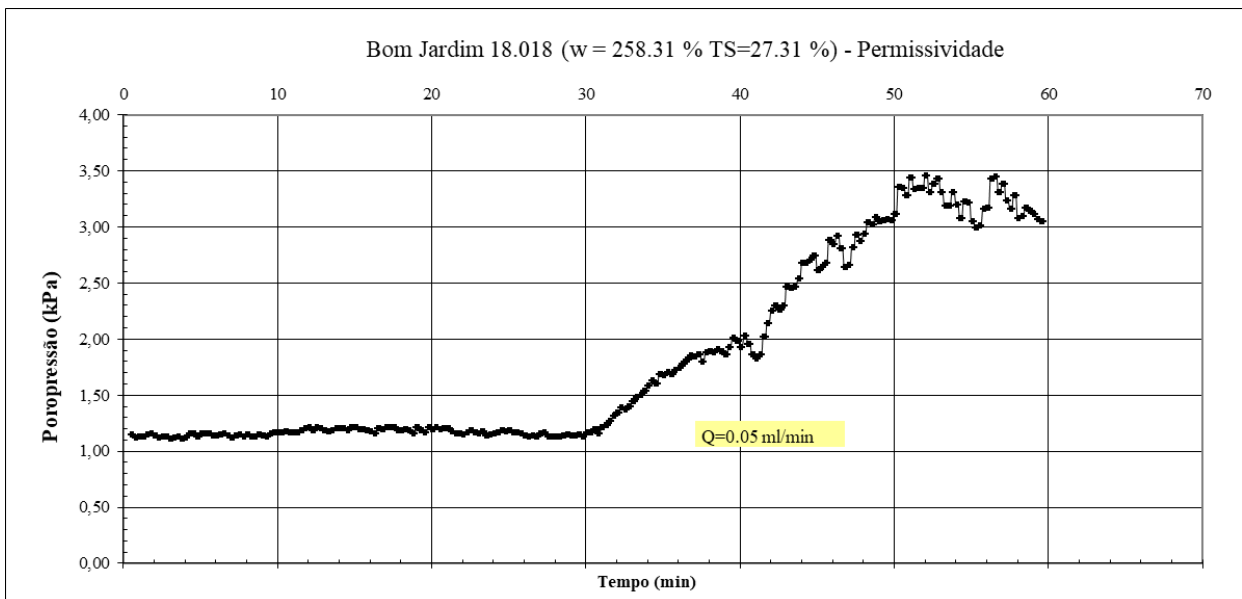
Fonte: Próprio autor.

FIGURA 33: Gráfico de poropressão gerada x tempo do ensaio de permissividade 18.016.



Fonte: Próprio autor.

FIGURA 34: Gráfico de poropressão gerada x tempo do ensaio de permissividade 18.018.



Fonte: Próprio autor.

Para a interpretação dos resultados do ensaio HCT, foi utilizado o SICTA software desenvolvido por Abu-Hejleh e Znidarcic (1995b).

Os dados de entrada para o SICTA foram obtidos nos ensaios HCT e estão apresentados na Tabela 5:

Tabela 5: Parâmetros de entrada no SICTA.

	18.005	18.016	18.018
Altura inicial ( $H_0$ - m)	0,043	0,036	0,034
Índice de vazios na tensão efetiva nula ( $e_0$ )	3,309	3,309	3,309
Tensão efetiva inicial ( $\sigma_v$ - kPa)	0,132	0,132	0,132
Velocidade de darcy ( $v$ - m/s)	0,000	0,000	0,000
Altura final a amostra ( $H_f$ - m)	0,032	0,028	0,028
Poropressão final na parte inferior da amostra ( $u_b$ - kPa)	5,252	4,957	3,987
Índice de vazios final ( $e$ )	1,295	1,302	1,272
Coefficiente de Permeabilidade ( $k$ - m/s)	5,28E-09	4,34E-09	1,41E-08

Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros de compressibilidade e de condutividade hidráulica resultantes do SICTA (A, B, Z, C e D) são apresentados na Tabela 6 para cada uma das análises realizadas.

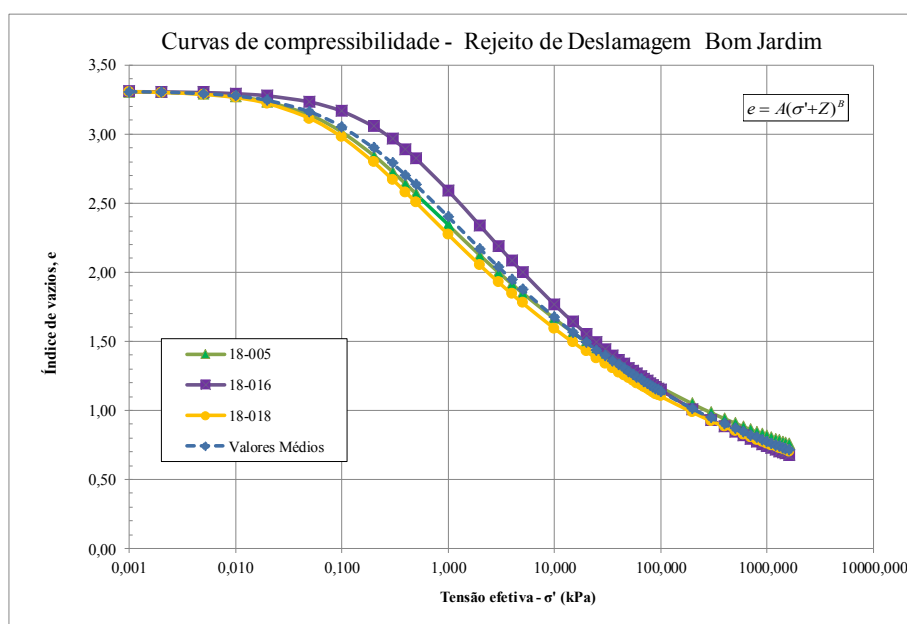
Tabela 6: Parâmetros de saída no SICTA

PARÂMETRO	18.005	18.016	18.018
A ( $\text{kPa}^{-1}$ )	2,38569	2,75855	2,31141
B	-0,15517	-0,19047	-0,16115
Z (kPa)	0,12143	0,38473	0,10792
C (m/s)	2,13E-09	1,88E-09	2,57E-09
D	3,51139	3,1806	3,38526

Fonte: Próprio autor.

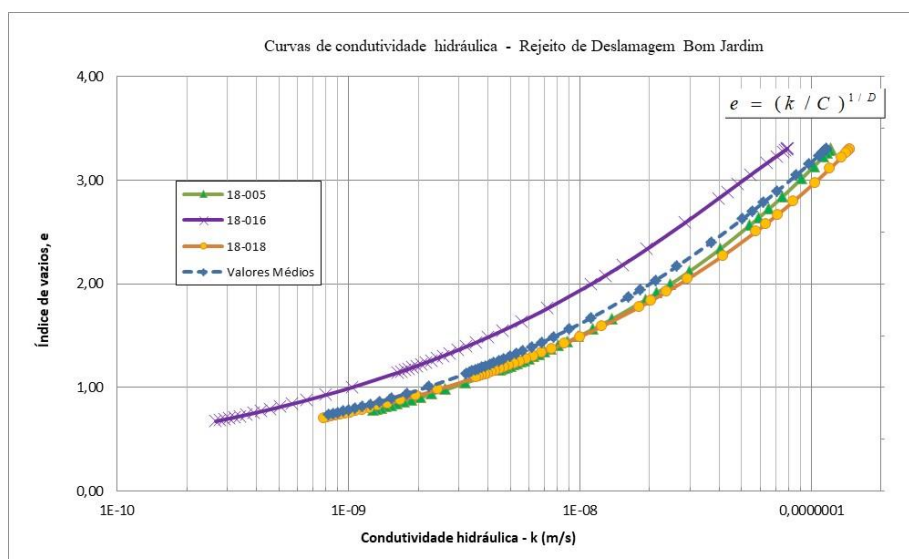
As curvas de compressibilidade e de condutividade hidráulica são apresentadas nas Figuras 35 e 36.

FIGURA 35: Curva de compressibilidade do ensaio HCT.



Fonte: Próprio autor.

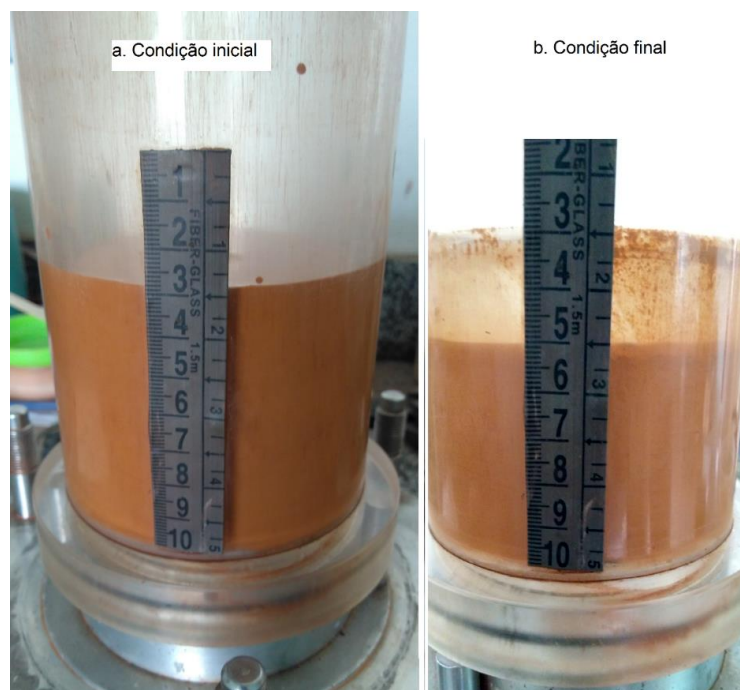
FIGURA 36: Curva de condutividade hidráulica do ensaio HCT.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados apresentados nas Figuras 31 e 32 são coerentes em relação aos valores médios. Isso ocorre devido à realização de todos os ensaios com um teor de umidade diluído visando garantir que teor de sólidos na realização do ensaio seja menor que aquele encontrado no quando o material está sob a tensão efetiva vertical nula. O teor de sólidos utilizado foi de 27,56 %, enquanto o teor de sólidos no  $e_{00}$  é de 43,22 %. Essa diluição é necessária para garantir a sedimentação da amostra disposta na célula de ensaio, como pode ser visto na Figura 37.

FIGURA 37: Sedimentação da amostra na célula de ensaio.



Fonte: Próprio autor.

A condição limite da variação da poropressão sobre a determinação do fluxo aplicado na amostra pode provocar uma duração elevada dos ensaios (nesse trabalho, de 8 a 10 h). A determinação da vazão empregada poderá exigir a repetição do ensaio com uma vazão maior, caso a poropressão atinja o limite superior. Nesse caso, recomenda-se portanto iniciar o fluxo com vazões mais baixas.

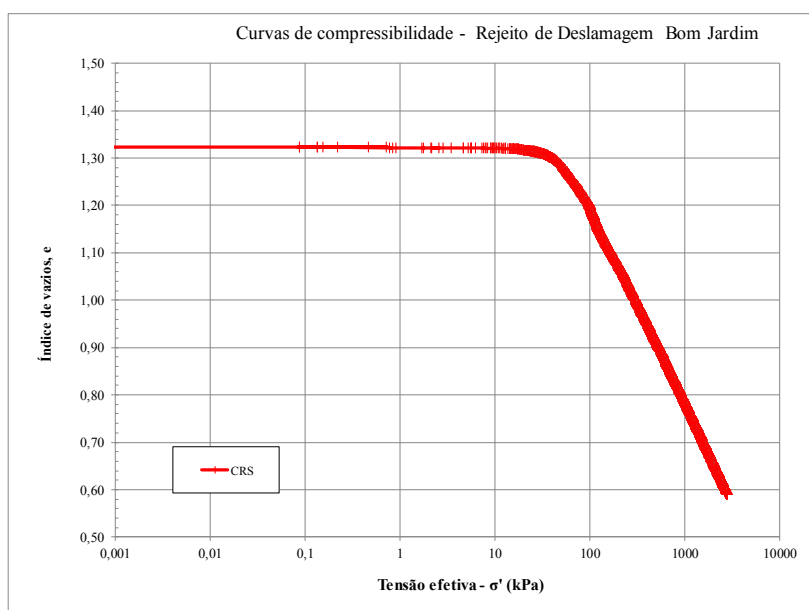
Para a saturação do sistema (pedras porosas), é mantida uma baixa contrapressão (10 kPa) de acordo com o proposto por Botelho (2001). Para a amostra em si, a contrapressão pode se manter em níveis inferiores devido à natureza do material amostrado que já se encontra em saturação quando no estado de lama.

### 4.3 Ensaio de Adensamento CRS

Para a realização do ensaio CRS foram utilizadas as recomendações da norma ASTM D4186 (1989) no que se refere à determinação da velocidade de aplicação das tensões verticais. Esta recomendação especifica que a velocidade deve ser definida em função do LL da amostra ensaiada, neste caso, como o  $LL < 40\%$  ( $LL=36\%$ ), a velocidade deve ser de  $0,04\%/min$ . Sendo a altura do anel utilizado de  $25,4\text{ mm}$  e o diâmetro de  $63,2\text{ mm}$ , a velocidade adotada no ensaio foi então determinada como sendo igual a  $0,01\text{ mm}/min$ .

Após a moldagem do corpo de prova na célula de ensaios CRS, o mesmo foi submetido a uma contrapressão de  $100\text{ kPa}$  por um período de 24 horas antes do início da fase de carregamento axial. A curva de compressibilidade é apresentada na Figura 38.

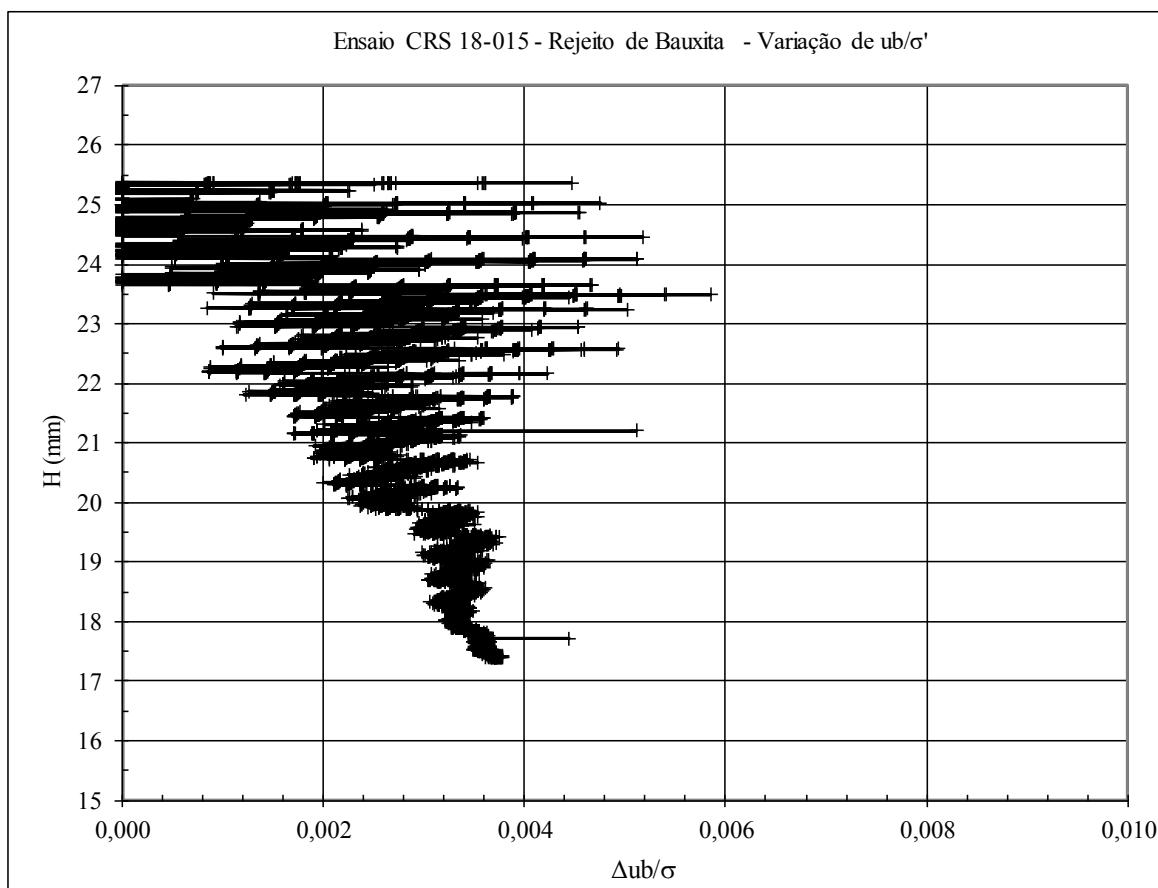
FIGURA 38: Curva  $e \times \sigma'$  - CRS.



Fonte: Próprio autor.

Os maiores valores da variação da poropressão na base ( $\Delta u_b$ ) foram da ordem de 11 kPa. Ao se analisar a variação da razão entre a poropressão na base ( $\Delta u_b$ ) e a tensão efetiva ( $\sigma'$ ) em função da altura da amostra (Figura 39) é possível constatar que os valores se encontraram abaixo da faixa de 2 a 5 % proposta por Wissa et al. (1971).

FIGURA 39: Variação de  $u_b/\sigma'$  - CRS.



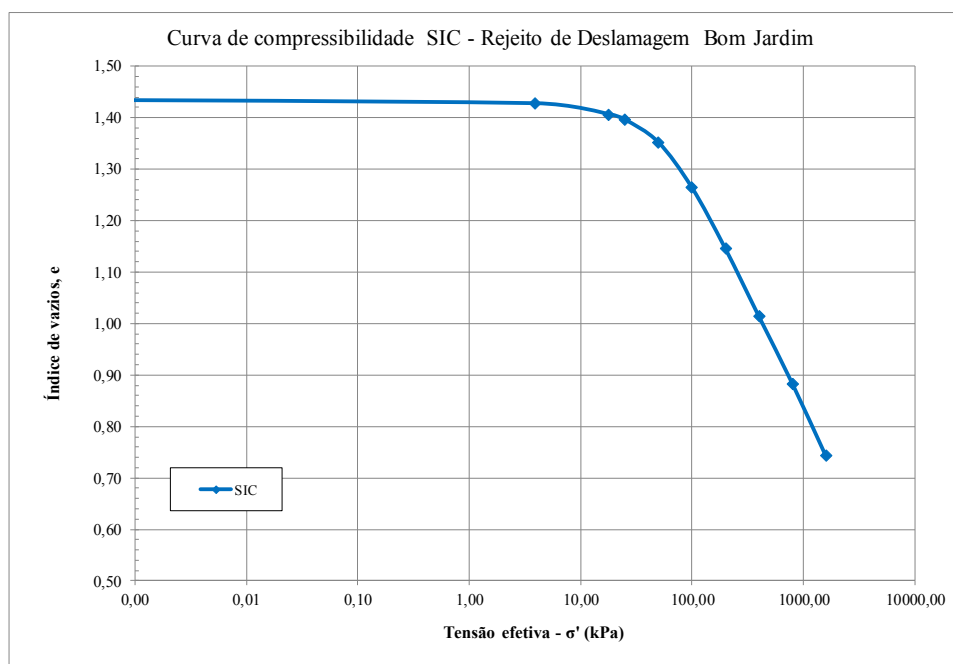
Fonte: Próprio autor.

A adoção da recomendação da ASTM D4186 (1989) sobre a velocidade de deformação no ensaio CRS para materiais finos, como os rejeitos do processamento da bauxita, podem levar a valores baixos para a velocidade e, por consequência, valores conservadores para a variação da poropressão pela tensão efetiva. Outro impacto é a duração do ensaio que pode chegar a 10 h, em função da baixa velocidade de deformação empregada.

#### 4.4 Ensaio de Adensamento Incremental (SIC)

A curva de índice de vazios versus tensão efetiva obtida no ensaio edométrico incremental, com 10 estágios de carregamento, é apresentada na Figura 40. É possível notar que a tensão de pré adensamento (ponto da curva de compressibilidade que representa a transição entre a fase inicial e a reta virgem) é da ordem de 50 kPa. O índice de vazios inicial foi de 1,43 próximo do valor utilizado para o ensaio CRS.

FIGURA 40: Curva  $e$  x  $\sigma'$  - SIC.

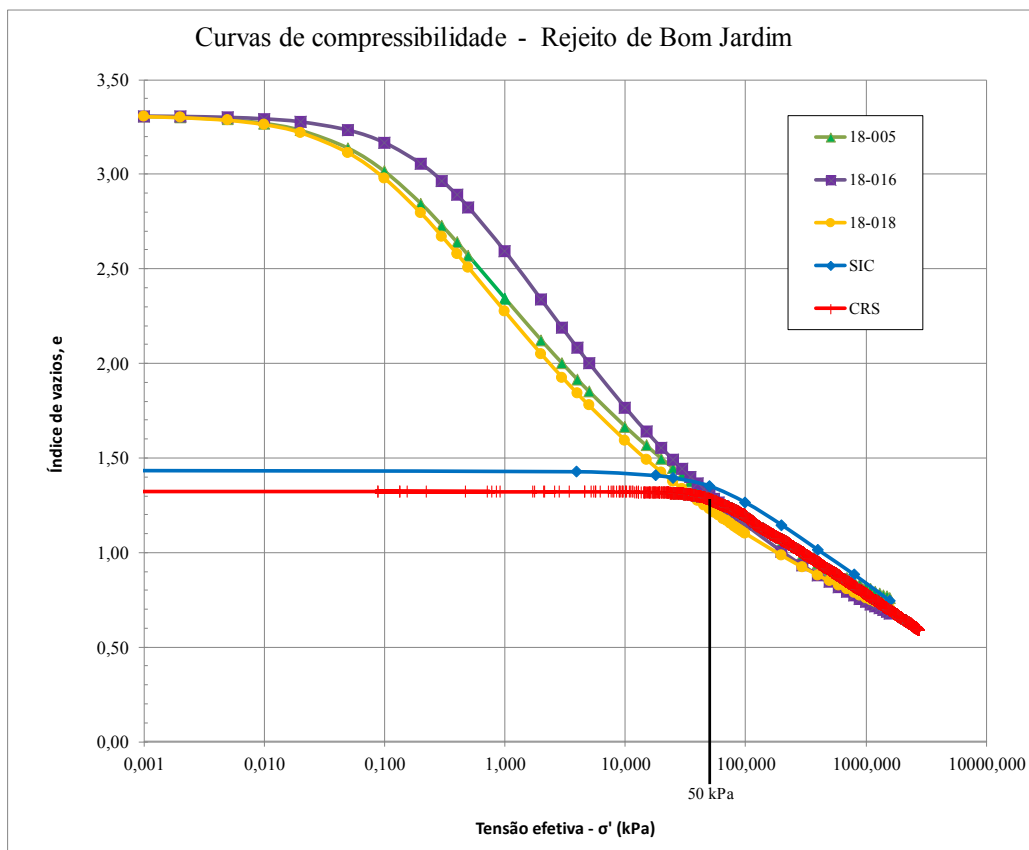


Fonte: Próprio autor.

#### 4.5 Comparação dos resultados

As curvas de todos os ensaios de adensamento realizados são apresentadas na Figura 41.

FIGURA 41: Curvas de compressibilidade.



Fonte: Próprio autor.

É possível observar que as curvas de compressibilidade oriundas do Ensaio HCT apresentam correlação entre si.

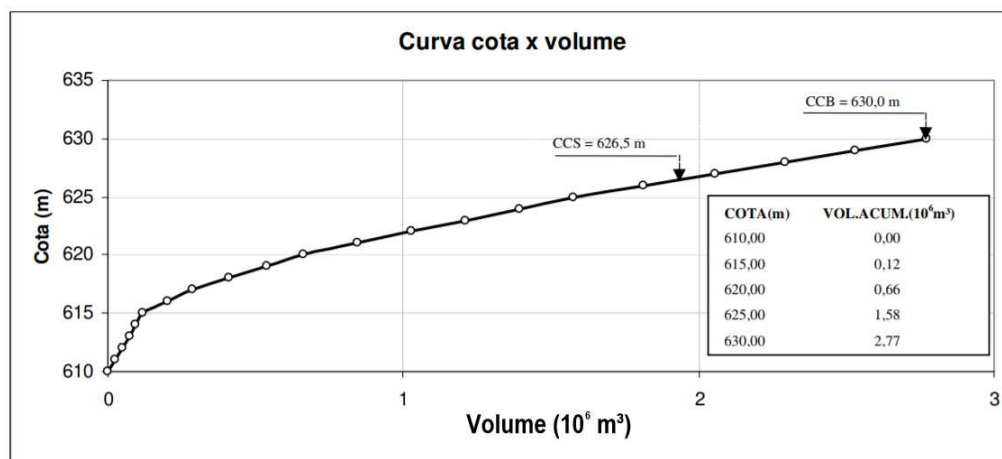
A concordância das curvas de compressibilidade do ensaio HCT com as dos ensaios CRS e SIC ocorre para valores de tensão efetiva vertical da ordem de 50 kPa, tensão que foi a utilizada na fase de carregamento estático do ensaio HCT. Este fato corrobora as observações de outros autores que estabelecem o valor de cerca de 55 kPa para convergência dos ensaios de compressibilidade, conforme relatado por Ding, Wang e McLeod (2010).

Apesar de apresentarem um bom comportamento do índice de vazios, o ensaio HCT apresenta vantagem por considerar as baixas tensões efetivas verticais no processo de adensamento desde o  $e_{00}$ , pois, em barragens, o rejeito é lançado geralmente na condição de lama, e a primeira parte do adensamento é a que possui a maior magnitude, e não é devidamente modelada quando se consideram os resultados de ensaios de adensamento oedométrico incremental (SIC) ou adensamento com velocidade de deformação constante (CRS).

#### 4.6 Simulação do enchimento da barragem

A curva de acumulação da Barragem de Bom Jardim é apresentada na Figura 42. Com base no gráfico apresentado, o volume total de rejeitos que pode ser depositado é aquele da cota de 626 m, o que equivale a  $1,818 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

FIGURA 42: Curva cota x volume do reservatório da Barragem Bom Jardim.



Fonte: Geolabor (2009).

##### 4.6.1 CONDES0

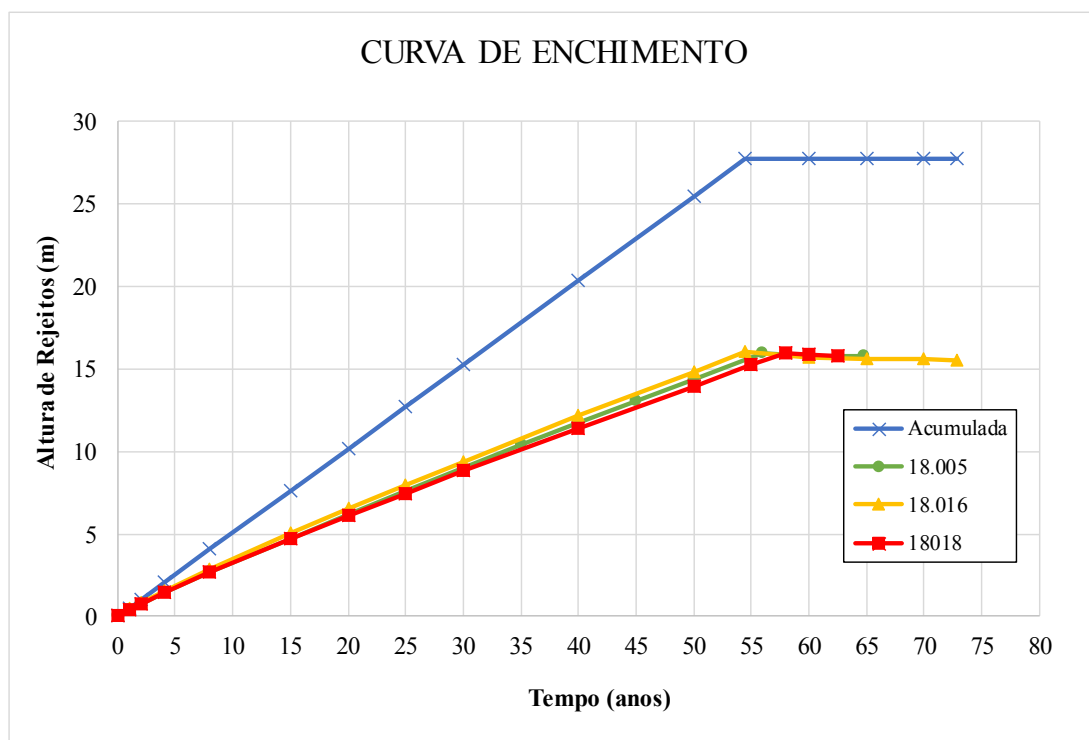
No software CONDES0, são introduzidos os parâmetros de adensamento das equações 7 e 8 (cabe ressaltar que o parâmetro C deve ser convertido para m/ano), o peso específico dos sólidos, o peso específico da água e a condição de enchimento.

Para definir a taxa de lançamento ao longo do tempo, considerou-se que, o barramento possui 16 m de altura disponível num volume de  $1,818 \times 10^6 \text{ m}^3$ , pode-se utilizar a taxa de lançamento de 0,51 m/ano, como valor médio de lançamento de rejeitos no reservatório.

Para a determinação do tempo de enchimento, é necessário rodar a rotina de cálculo do CONDES0 duas vezes: i) na primeira fase da análise, é mantida a taxa de lançamento de 0,51 m/ano em um período longo de tempo para avaliar qual será o tempo necessário para alcançar esse nível; ii) na segunda fase da análise, adotaram-se dois intervalos de tempo com taxas de lançamento diferentes: no primeiro intervalo, que vai de 0 até o tempo necessário para o enchimento (determinado na primeira fase da análise), e após esse tempo uma taxa de lançamento de nula. Com esse procedimento, é possível avaliar como será o comportamento de adensamento após o fim da produção e lançamentos de rejeitos.

A curva de enchimento para a barragem de Bom Jardim resultante do CONDES0 é apresentada na Figura 43 para cada um dos ensaios HCT. No gráfico, a curva acumulada representa os rejeitos depositados na barragem sem o seu adensamento, apenas obedecendo a taxa de lançamento, enquanto a curva corrigida apresenta os valores resultantes do CONDES0 considerando o adensamento.

FIGURA 43: Curvas cotas de enchimento CONDES0.

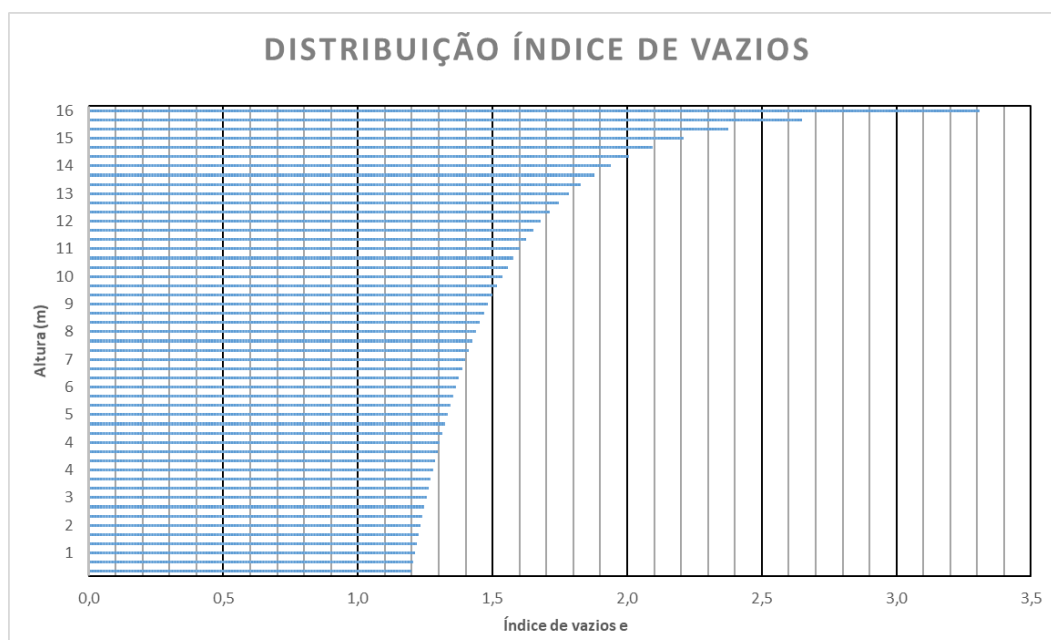


Fonte: Próprio autor.

Considerando os três ensaios realizados, seguindo os resultados do CONDES0 o tempo necessário para o enchimento da barragem de rejeitos é de 55 anos.

Em função do lançamento dos rejeitos por um período longo de tempo e, das maiores tensões existentes na parte inferior do barramento, o montante de rejeitos sofre adensamento de formas diferentes. Na Figura 44, é apresentada a distribuição dos índices de vazios em função da altura do barramento.

FIGURA 44: Índices de vazios ao longo da altura do barramento.



Fonte: Próprio autor.

O índice de vazios decresce com a profundidade do barramento iniciando no índice de vazios com tensão efetiva nula ( $e_{00}$ ) na superfície até o valor de 1,2 na parte inferior. Sobre a densidade na parte superior, o rejeito apresenta densidade de  $1,35 \text{ g/cm}^3$ , e, na parte inferior do barramento, a densidade de  $1,70 \text{ g/cm}^3$ .

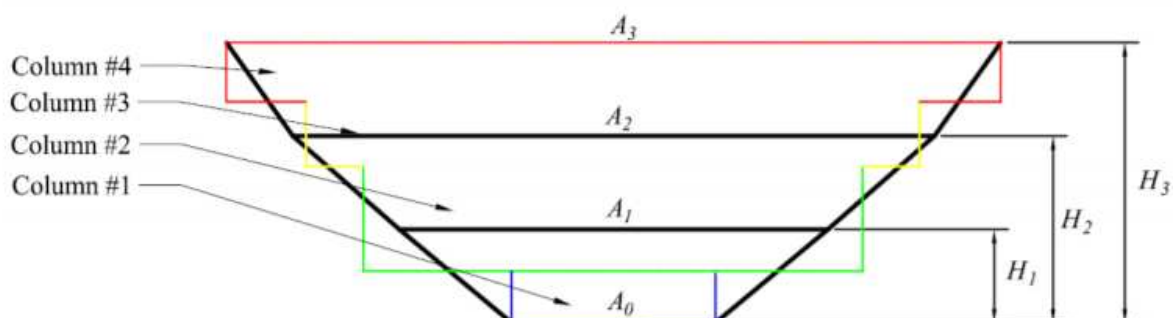
O gráfico também pode ser usado para aferir sobre a condição do material retirado com o tubo shelby, que, apesar de ser retirado a 1 m de profundidade, apresenta um índice de vazios de 1,44, o que demonstra que o rejeito está naquela cota a um tempo anterior devido à condição de enchimento na barragem não ocorrer da base para topo de forma distribuída, mas sim de montante para jusante.

#### 4.6.2 FSconsol

No software FSconsol, além do lançamento em função da altura do barramento, o usuário tem a opção de realizar o lançamento em função de massa em uma área (Pond Areas), i.e., é feita a adaptação do volume da barragem em colunas de áreas equivalentes para um número de segmentos de altura que forem desejados.

A partir dos valores de volume apresentados em função das cotas altimétricas (Figura 42) dividindo-se cada volume pela altura e calculou-se as áreas equivalentes. As quais no FSconsol são inseridas utilizando-se a unidade de  $\text{km}^2$ . A representação de cada um dos cilindros substituindo o perfil da barragem de rejeitos pode ser vista na Figura 45.

FIGURA 45: Colunas equivalentes ao nível da barragem.



Fonte: Miller (2012).

A relação das áreas ao longo das cotas do barramento utilizadas na análise do FSconsol da barragem Bom Jardim é apresentada na Tabela 7:

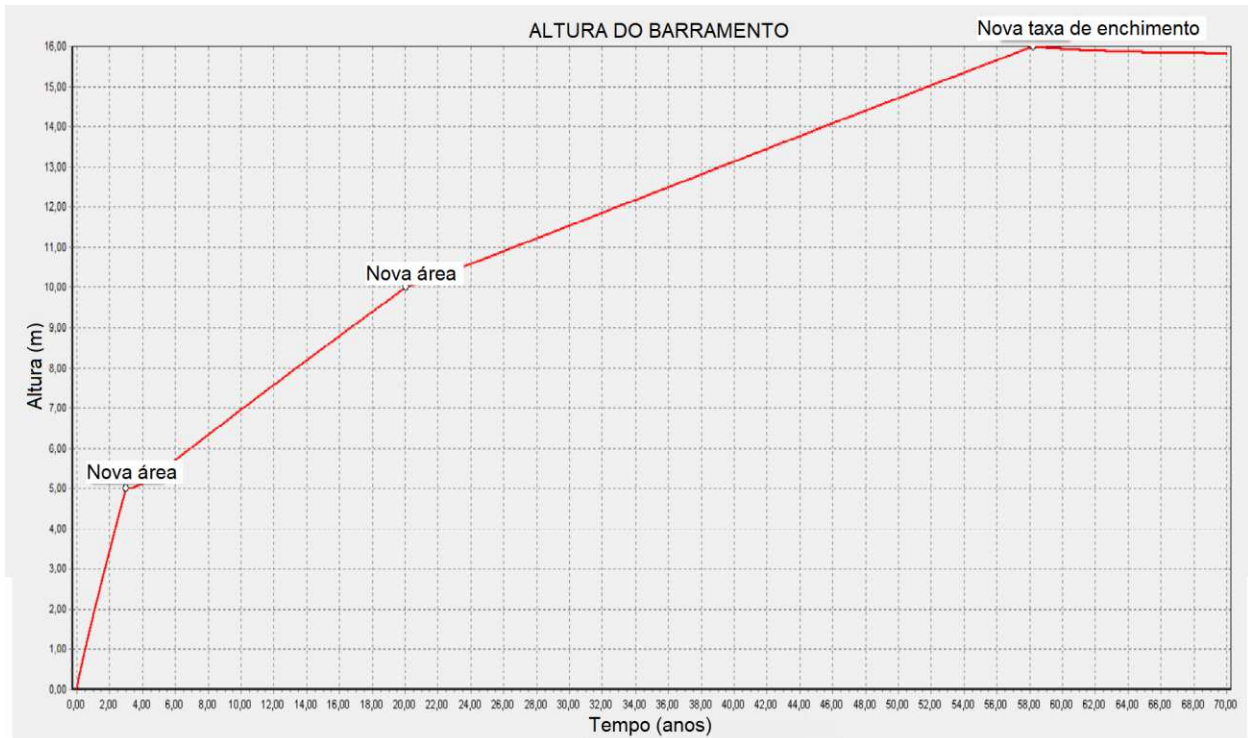
Tabela 7: Áreas equivalentes na etapa de enchimento.

Cota (m)	Volume ( $10^6 \text{ m}^3$ )	Área ( $\text{km}^2$ )
615	0,12	0,024
620	0,54	0,108
626	1,158	0,193

Fonte: Próprio autor.

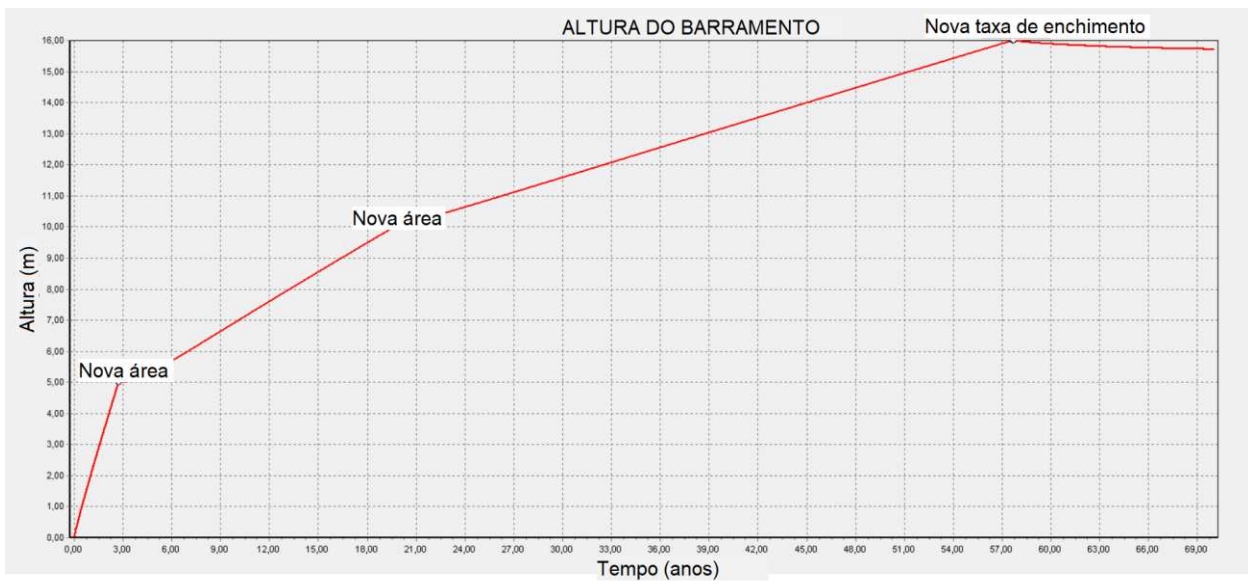
A representação do enchimento para o perfil da barragem de rejeitos, considerando as mudanças das áreas da barragem pode ser vista nas Figuras 46 a 48.

FIGURA 46: Curva cota de enchimento FSconsul – 18.005.



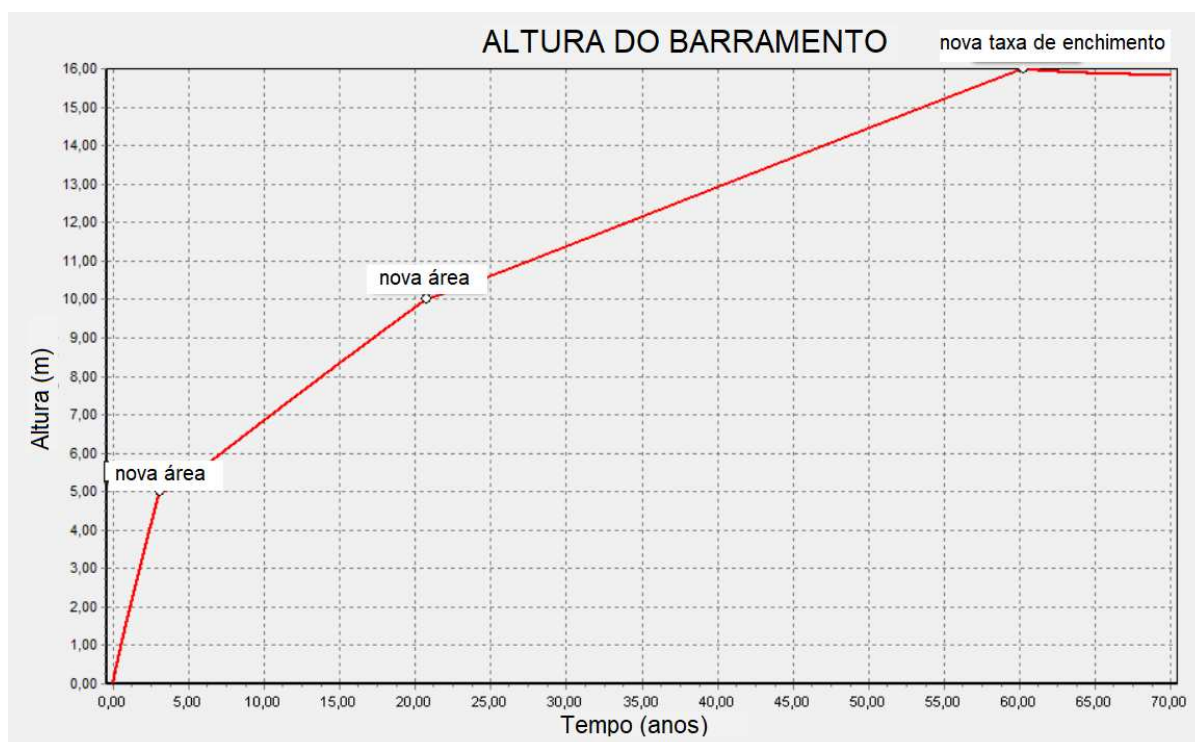
Fonte: Próprio autor.

FIGURA 47: Curva cota de enchimento FSconsul – 18.016.



Fonte: Próprio autor.

FIGURA 48: Curva cota de enchimento FSconsul – 18.018.



Fonte: Próprio autor.

O recurso “Pond Areas” do programa FSconsol possibilita a construção da curva com mudanças de declividade. Isso possibilita inferir sobre a velocidade do alteamento que ocorrerá em virtude da mudança da geometria da bacia que compõe a barragem. Nos primeiros anos, ocorrerá um alteamento de 2,5 m por ano, enquanto que após os 20 anos de enchimento, o alteamento se estabilizará na taxa de 0,16 m por ano.

É de interesse notar que as mudanças de áreas ocasionam mudanças das declividades das curvas de enchimento, o que significa que, nos primeiros trechos, alturas maiores são alcançadas ao comparar com os resultados do CONDES0. Como o adensamento é promovido pelo peso próprio do material, esse detalhe contribui para uma maior acurácia na determinação do tempo de enchimento de uma barragem.

O tempo em que o enchimento da barragem se completa, calculado pelo FSconsol, é de 58 anos foi próximo do apresentado pelo CONDES0 (55 anos).

O software FSconsol apresenta uma interface mais amigável ao usuário em comparação ao CONDES0 que utiliza arquivos de texto para o input dos dados. Os recursos como determinação da altura do limite do barramento e a possibilidade de utilização de materiais diferentes como sólidos lançados, também são vantagens em relação ao software CONDES0

Cabe ressaltar que, apesar do FSconsol apresentar uma interface mais amigável ao usuário, seus campos de entrada de dados apresentam algumas inconsistências, tais como altura de barramento e a área equivalente da barragem que utilizam ponto para separação das casas decimais, enquanto outros campos, como os parâmetros A, B, C e D, utilizam a vírgula como separador decimal.

Uma limitação em ambos os softwares usados para a análise do enchimento é que ambos consideram que o enchimento se inicia na cota inferior do barramento e o lançamento vai sendo realizado igualmente conforme o nível aumenta. Porém, na Barragem de Bom Jardim, existem duas limitações quanto à água que flui após a barragem, cuja vazão deve ser no mínimo de 70 % da menor média das vazões de 7 dias consecutivos num período de 10 anos ( $q_{7,10}$ ); e a turbidez não deve superior a 100 UNT, com limites de atenção e alerta de 60 e 80 UNT respectivamente. A melhor forma de alcançar esse valor de turbidez é realizando o lançamento dos rejeitos no fundo da barragem, à jusante, onde possuirá uma maior distância e tempo de fluxo para ocorrer a sedimentação. Esse processo ocasiona o preenchimento do fundo da barragem até cotas elevadas antes que a parte mais próxima do barramento receba rejeito, como pode ser visto na Figura 18.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo do trabalho foi avaliar e comparar os ensaios de adensamentos disponíveis no estudo geotécnico do enchimento de uma barragem de rejeitos de bauxita.

Os resíduos depositados na barragem de rejeitos oriundos são basicamente argilosos, o que, aliado ao alto fator de umidade, proporciona reduções consideráveis durante o seu adensamento.

Os ensaios de adensamento HCT, CRS e SIC apresentam boa concordância entre si a partir de um valor de tensão vertical efetiva (50 kPa). Para baixos valores de tensão efetiva ( $\sigma'$ ), quando os valores do índice de vazios são muito elevados, o ensaio HCT é o mais recomendado. Para valores de tensão efetiva ( $\sigma'$ ) acima de 50 kPa, todos os três ensaios apresentam a mesma curva de compressibilidade, como pode ser observado na Figura 37. Os ensaios de adensamento podem ser utilizados para a verificação do formato da curva de compressibilidade ( $e \times \sigma'$ ), desde que seja possível a utilização de amostras sedimentadas nos ensaios CRS e SIC.

A utilização de um sistema de sedimentação preliminar tem um forte impacto no prolongamento da vida útil de uma barragem de rejeitos. Propostas semelhantes podem ser empregadas em outras barragens de resíduos diversos, visando prolongar a utilização das mesmas e a redução da necessidade de construção de outras barragens. No caso em estudo, esse sistema é responsável por quase dobrar a vida útil da barragem. Em futuros trabalhos poderiam ser levantadas formas de implantação desse sistema e uma avaliação orçamental, considerando os custos para utilização do sistema e a redução dos investimentos a longo prazo para construção ou alteamentos de barragens.

Determinar corretamente o valor de  $e_{00}$  é fator de grande impacto em todas as análises realizadas, sendo que o método de sedimentação em coluna apresenta vantagens sobre o método do prato e do béquer. Nesse método o valor obtido foi de 3,30 comparado ao valor de 4,04 no método do béquer, e 5,48 no método do prato.

O trabalho apresentou a aplicação de dois softwares para a avaliação do adensamento com deformações finitas (1-D): o CONDES0 e o FSconsol. Os softwares apresentaram um comportamento de adensamento semelhante em disposição incremental de rejeitos, mesmo possuindo opções para a entradas das taxas de lançamento por métodos diferentes. Os tempos para o enchimento da barragem foram de 55 anos no CONDES0 e 58 anos no FSconsol.

O FSconsol é mais aplicável no caso dos lançamentos graduais, tendo em vista a praticidade da interface e a possibilidade de inserir lançamento com o ajuste da mudança da área da lagoa, além disso trabalhar com materiais diferentes (o que não foi o caso desse estudo).

Para trabalhos futuros sugere-se o estudo simulando como o enchimento da barragem ocorre na prática, refletindo as variações sazonais da produção de rejeitos. Nesses estudos seria interessante a calibração do processo de enchimento via modelagem numérica com dados reais de campo obtidos por levantamentos batimétricos. Este refinamento poderá ser utilizado como forma de determinar o enchimento real da barragem, com as devidas correções da curva de enchimento apresentada e incorporando mudanças produtivas que poderiam aumentar ou reduzir o volume de rejeitos total.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAL. História do Alumínio. **Alumínio**, 2017. Disponível em:  
<<http://abal.org.br/aluminio/historia-do-aluminio/>>. Acesso em: 08 jun. 2018.
- ABNT. **NBR 9820**: Coleta de amostras indeformadas de solos de baixa consistência em furos de sondagem - Procedimento. Rio de Janeiro: [s.n.], 1997. Versão corrigida 2.
- ABNT. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: [s.n.], 2016.
- ABNT. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: [s.n.], 2017. Versão corrigida 2.
- ABNT. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: [s.n.], 2017.
- ABNT. **NBR 7181**: Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: [s.n.], 2018. 3 p.
- ABU-HEJLEH, A. N. **Desiccation theory for soft soils. Boulder**. Colorado: Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 1993. 206 p. Ph.D. Thesis.
- ABU-HEJLEH, A. N.; ZNIDARČIĆ, D. Consolidation Characteristics of Phosphatic Clays. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 122, n. 4, p. 295-301, 1995a.
- ABU-HEJLEH, A. N.; ZNIDARČIĆ, D. **User manual for computer program SICTA**. Colorado: Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 1995b. 101 p.
- ALMEIDA, F. E.; OLIVEIRA FILHO, W. L. D.; NOGUEIRA, C. D. L. Análise numérica do processo de ressecamento de um rejeito fino da mineração de ferro. **Rem: R. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 4, n. 58, p. 355-365, dez. 2005.
- ANA. **Relatório de Segurança de Barragens 2017**. Agência Nacional do Águas. Brasília, p. 84. 2018.
- ARMOUR, D. W.; DRNEVICH, V. P. Improved Techniques for the Constant-Rate-of-Strain Consolidation Test. **Consolidation of Soils**, [S.l.], p. 170-183, 1986. ISSN ASTM International. <http://dx.doi.org/10.1520/stp34614s>.
- ASTM. **Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Controlled-Strain Loading**. West Conshohocken: [s.n.], 1989.
- BÁRDOSSY, G. B. Les Baux et l'histoire de la bauxita. **Académie des**, Paris, v. 324, p. 1031-1040, mar. 1997. ISSN [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(97\)83989-4](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(97)83989-4).
- BORGES, L. M.; CARVALHO, A. Gênese da bauxita Miraf. **Revista Brasileira de Geociências**, n. 419, p. 462-469, dez. 1990.
- BOTELHO, A. P. D. **Implementação de metodologias de ensaios para determinação de relações constitutivas de processos de fluxo em solos com a utilização da bomba de**

- fluxo**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2001. 242 p. Dissertação de Mestrado.
- BRITO, G. V.; VIEIRA, S. P. G. **Materiais de Construção Alumínio**. FAUP. Porto, p. 20. 2010.
- CASAGRANDE, A. **The determination of the pre-consolidation load and its practical significance**. Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Proc. of ICSMFE. Cambridge: [s.n.]. jun. 1936. p. 60-64.
- CHAMMAS, R. **“Barragens de Contenção de Rejeitos**. Ouro Preto: [s.n.], 1989.
- CHUQUIMUNI, R. A. A. **Análise Numérica do Alçamento de Barragens de Terra**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2005.
- CONSTANTINO, V. R. L. et al. Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático. **Química Nova**, v. 25, n. 3, p. 490-498, 2002.
- DING, ; WANG, B. W.; MCLEOD,. **CHARACTERIZING TAILINGS TO BETTER PREDICT CONSOLIDATION BEHAVIOUR DURING DEPOSITION**. CDA 2010 Annual Conference. Niagara Falls: [s.n.]. 2010. p. 13.
- DONOGHUE, A. M.; FRISCH, N.; OLNEY, D. Bauxite Mining and Alumina Refining. **Journal Of Occupational And Environmental Medicine**, 56, maio 2014. 12-17.
- FOX, P. J.; PU, H.-F.; CHRISTIAN, J. T. Evaluation of Data Analysis Methods for the CRS Consolidation Test. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [S.I.], v. 140, n. 6, p. 04014020, jun. 2014. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001103](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001103).
- GEOLABOR. **PLANO DE SEGURANÇA DO SISTEMA**. MINERAÇÃO RIO POMBA CATAGUASES. Miraf, p. 53. 2009.
- GIBSON, R. E.; ENGLAND, G. L.; HUSSEY, M. J. L. The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clays. **Géotechnique**, v. 17, n. 3, p. 261-273, set. 1967. ISSN <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1967.17.3.261>.
- GOBBI, M. et al. **Introdução a Mecânica dos Fluidos e Fenômenos de Transporte**. Curitiba: [s.n.], 2010.
- GOES, M. A. C.; POSSA, M. V.; LUZ, A. B. D. **Amostragem de Minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1991.
- GOOGLE EARTH-MAPS, 2019. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-21.2081777,-42.7175904,1501m/data=!3m1!1e3>>. Acesso em: 10 fev. 2019.
- GWP SOFTWARE INC. **FSCONSOL SLURRY CONSOLIDATION SOFTWARE Version 3 User Manual**. [S.I.], p. 103. 2007.

- HAMILTON, J. J.; CRAWFORD, C. B. **Improved Determination of Preconsolidation**. Symposium on Time Rates of Loading in Soil Testing. [S.l.]: [s.n.]. 1959. p. 254-271.
- IBRAM. **Economia Mineral**. Brasília, p. 29. 2017.
- IBRAM. **Comércio Externo da Mineração Brasileira**. INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Brasília, p. 13. 2019.
- IMAI, G. Experimental studies on sedimentation mechanism and sediment formation of clay materials. **Soils and Foundations**, v. 21, p. 7-20, 1981.
- LEMONS JÚNIOR, M. A. **Estudos para a Avaliação da Capacidade de Reservatório de Rejeitos de Nióbio**. Ouro Preto: [s.n.], 2012.
- LIMA, M. F.; LUZ, J. A. M. D. Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional. **Rem - Revista Escola de Minas**, [S.l.], v. 54, n. 2, p. 155-159, jun. 2001. ISSN FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0370-44672001000200014>.
- LIU, J. C.; ZNIDARČIĆ, D. Modeling one-dimensional compression characteristics of soils. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 28, n. 4, 1991. 162-169.
- LOZANO, F. A. E. **Seleção de locais de barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. 142 p. Dissertação (Mestrado).
- MÁRTIRES, R. A. C. Alumínio. In: DNPM **Balanço Mineral Brasileiro 2001**. Brasília: [s.n.], 2001. p. 692.
- MILLER,. **Evaluation of a Three-Dimensional Model for Slurry Storage Facilities**. Boulder: Civil Engineering Graduate Theses & Dissertations, 2012.
- MONTEMEZZO, R. F. **Estudo comparativo de ensaios de compressão confinada em argilas e areias saturadas utilizando o ensaio CRS**. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 146 p. Dissertação de Mestrado.
- NGUYEN, Q. D.; BOGER, D. V. Application of rheology to solving tailings disposal problems. **International journal of Mineral Processing**, [S.l.], 1998. 217-233.
- PACHECO SILVA, F. **Uma nova Construção Gráfica para Determinação da Tensão de Pré-Adensamento de uma amostra de Solo**. Anais Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Guanabara: [s.n.]. 1970. p. 219-223.
- PEREIRA, B. A. **ADENSAMENTO E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO DE UMA BARRAGEM PARA CONTENÇÃO DE REJEITOS DE OURO**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2006. 138 p. Dissertação (Mestrado).
- PINTO, C. D. S. **Curso Básico de Mecânica dos solos em 16 aulas**. São Paulo: Oficina das Letras, 2006.

- QUISPE, L. M. C. **Consolidação de um rejeito de mineração de areia e modelagem do enchimento de um reservatório para sua disposição.** São Paulo: Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade de São Paulo, 2011. Dissertação (Mestrado).
- REZENDE, A. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE BARRAGEM DE REJEITO ARENOSO ALTEADA POR MONTANTE.** Ouro Preto: [s.n.], 2013.
- SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C. D.; DUTRA, A. J. B. Bauxita. In: LUZ, A. B. D.; LINS, F. A. F. **Rochas & Minerais Industriais: Usos e especificações.** Rio de Janeiro: Cetem/mct, 2005. p. 311-337.
- SAMPLE, K. M.; SHACKELFORD, C. D. Apparatus for Constant Rate-of-Strain Consolidation of Slurry Mixed Soils. **Geotechnical Testing Journal**, Colorado, p. 409-420, maio 2012.
- SCHIFFMAN, R. L. Finite and infinitesimal strain consolidation. **Journal of geotechnical engineering division**, 106, 1980. 203-207.
- SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; DA MOTTA, M. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. **Revista Matéria**, v. 12, n. 2, p. 322-338, 2007. ISSN 1517-7076.
- SILVA, A. L. B.; ALEJANDRO, C. **Uso de produtos da fabricação de sulfato de alumínio na produção de artefatos cerâmicos.** 49º Congresso brasileiro de cerâmica. São Pedro: [s.n.]. 2005. p. 12.
- SILVA, D. R.; OLIVEIRA FILHO, W. L. D. Estudos experimentais do processo de ressecamento de um rejeito fino de mineração. **Rem: Revista Ecola de Minas**, Ouro Preto, v. 54, n. 4, p. 261-265, out. 2003.
- SILVA, W. R. D. **Nova metodologia para determinação de propriedades de sedimentação e adensamento de rejeitos de mineração.** Viçosa: Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2008. 157 p. Tese (Doutorado).
- SMITH, R. E.; WAHLS, H. E. Consolidation Under Constant Rates of Strain. **Journal of Soils Mechanics and Foundation Division**, v. 95, p. 519-539, 1969.
- SOARES, L. Capítulo 19 - Barragem de Rejeitos. In: LUZ, B. D.; SAMPAIO, J. ; FRANÇA, C. A. **Comunicação Técnica elaborada para o Livro Tratamento de Minérios.** 5. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2010. p. 831-896.
- SOFRÁ, F.; BOGER, D. V. Environmental rheology for waste minimization in the minerals industry. **Chemical Engineering Journal**, [S.I.], 2002. 319-330.
- SOMOGYI, F. **Large strain consolidation of fine grained slurries.** Annual Conf. of Canadian Society for Civil Engineering. Montréal: Canadian Society for Civil Engineering. 1980.
- TAYLOR, D. W. **Research on Consolidation Clays.** New York: Massachusetts Institute of Technology, Dept. Civil Sanitary Eng., 1942. 147 p.
- TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanics.** New York: John Wiley & Sons, 1943.

- TERZAGHI, K.; FRÖHLICH, O. K. **Theorie der setzung von tonschichten; eine einföhrung in die analytische tonmechanik.** Leipzig: Franz Deuticke, 1936. 166 p.
- VICK, S. G. **Planning, Design and Analysis of Tailings Dams.** [S.l.]: iTech Publishers Ltd., 1990.
- VILLAR, L. F. D. S. **Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita.** Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2002.
- WAHLS, H. E. Analysis of Primary and Secondary Consolidation. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 88, n. 6, p. 207-234, 1962.
- WISSA, A. E. Z. et al. Consolidation at Constant Rate of Strain. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, 1971. 1393-1413.
- YAO, T. C.; ZNIDARCIC, D. **User's manual for computer program CONDES0.** Colorado: Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 1997. 98 p.
- ZNIDARČIĆ, et al. **Consolidation Testing of Oil Sand Fine Tailings.** Proceedings Tailings and Mine Waste 2011. Vancouver: [s.n.]. 2011. p. 7.
- ZNIDARČIĆ, Z. et al. **Seepage induced consolidation test, equipment description and users manual.** Colorado: Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 1992. 63 p. Reported Prepared for Florida Institute of Phosphate Research.