

ANA CAROLINA CARVALHO DE MENEZES

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE
FERRO SUBMETIDOS AO ENSAIO HCT**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2017

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

T

M543a
2017 Menezes, Ana Carolina Carvalho de, 1992-
Análise do comportamento de rejeitos de mineração de
ferro submetidos ao ensaio HCT / Ana Carolina Carvalho de
Menezes. – Viçosa, MG, 2017.
xi,75f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Roberto Francisco de Azevedo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.61-64.

1. Resíduos de metal. 2. Mineração hidráulica.

I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

II. Título.

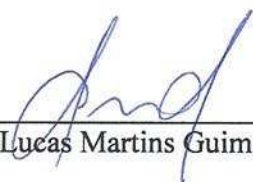
CDD 22 ed. 669

ANA CAROLINA CARVALHO DE MENEZES

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE FERRO SUBMETIDOS AO ENSAIO HCT

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

APROVADA: 17 de fevereiro de 2017



Lucas Martins Guimarães



Wander Rodrigues da Silva



Roberto Francisco de Azevedo
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

À Deus, sempre.

À minha família, simplesmente por ser. Meus pais e irmão, por todo seu apoio.

Ao Prof. Roberto Francisco de Azevedo, pela orientação deste trabalho, pelos conselhos e ensinamentos.

Ao Dudu, pela amizade, ensinamentos e hambúrgueres. Por todas as dúvidas tiradas e discussões, construtivas ou não. Finalmente, pela infinita paciência comigo.

Ao Paulo Capelão, pela ajuda, ensinamentos e conversas durante todo tempo de laboratório, e fora dele também.

Aos amigos do laboratório, em especial Carol Arêdes, Aline e Gustavo por deixarem as muitas horas de ensaio mais divertidas.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil da UFV, pelo apoio, e conhecimento passado à qualquer momento.

À Civ10, que de longe ou de perto, sempre estiveram presentes.

À Pós-Geotecnia 2015, pelo companheirismo e ajuda nesses dois anos, fazendo esse tempo mais leve.

Ao CNPq, pela bolsa de estudos fornecida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT.....	x
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Propriedades tecnológicas do rejeito	4
2.2 Disposição de rejeitos.....	5
2.3 Sedimentação.....	10
2.4 Teoria do Adensamento infinitesimal	13
2.5 Teoria do adensamento com deformações finitas	14
2.6 Modelos constitutivos.....	17
2.7 Ensaio de adensamento hidráulico - HCT	21
3 METODOLOGIA	23
3.1 Rejeitos.....	23
3.2 Caracterização	24
3.3 HCT	24
3.3.1 Equipamento.....	24
3.3.2 Método.....	29
3.4 Adensamento incremental	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39

4.1	Caracterização dos rejeitos	39
4.2	Ensaio de adensamento hidráulico – HCT	40
4.2.1	Ensaio de adensamento hidráulico – HCT – Rejeito Fino.....	42
4.2.1.1	Rejeito fino com TSi = 25%	42
4.2.1.2	Rejeito fino com TSi = 10%	43
4.2.1.3	Rejeito fino com TSi = 30%	45
4.2.1.4	Comparativo entre as amostras de Rejeito Fino	47
4.2.2	Ensaio de adensamento hidráulico – HCT – Rejeito Grosso.....	48
4.2.2.1	Rejeito grosso com TSi = 35%	48
4.2.3	Comparação com o ensaio de adensamento incremental	50
4.2.4	Influência da variação do fluxo aplicado.....	52
4.2.5	Metodologia e equipamento do ensaio	57
5	CONCLUSÕES	58
5.1	Em relação ao rejeito fino.....	58
5.2	Em relação ao rejeito grosso	59
5.3	Sugestões e recomendações.....	59
6	BIBLIOGRAFIA	61
	ANEXO 1.....	65
	ANEXO 2.....	68
	ANEXO 3.....	71
	ANEXO 4.....	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Esquema de alteamento de barragem por método de Montante (Adaptado de Lima, 2009).	6
Figura 3.2. Esquema de alteamento de barragem por método de jusante (Adaptado de Lima, 2009).	7
Figura 3.3. Esquema de alteamento de barragem por método de linha de centro (Adaptado de Lima, 2009).	7
Figura 3.4. Comportamento do rejeito após deposição no reservatório (Adaptado de Villar, 2002).	8
Figura 3.5. Espessador (Lacerda, 2004).	9
Figura 3.6. Relação entre os sistemas de coordenadas lagrangeanas, eulerianas e reduzidas: (a) configuração inicial, $t=0$ e (b) configuração no tempo t (Adaptado de Pereira, 2006).	16
Figura 4.1. Vista geral do sistema de deposição da SAMARCO (GoogleEarth, 2015).	23
Figura 4.2. Montagem do ensaio HCT (Silva, 2008).	24
Figura 4.3. Interface ar-água.	25
Figura 4.4. Bomba de fluxo adaptada na prensa triaxial.	26
Figura 4.5. Célula triaxial adaptada para o ensaio HCT.	27
Figura 4.6. Sistema de carregamento.	28
Figura 4.7. Sistema de aquisição e armazenamento de dados.	28
Figura 4.8. Ensaio de sedimentação em coluna.	30
Figura 4.9. Gráfico correspondente à etapa de sedimentação.	31
Figura 4.10. (a) Colocação da amostra no cilindro (b) Amostra depositada no equipamento.	32
Figura 4.11. Gráfico referente à etapa de fluxo.	33
Figura 4.12. Exemplo de planilha utilizada para gerar o gráfico da etapa de fluxo... ..	33
Figura 4.13. Gráfico correspondente à etapa de adensamento.	34
Figura 4.14. Célula de adensamento incremental montada com o rejeito.	38
Figura 5.1. Granulometria conjunta do rejeito fino.	39

Figura 5.2. Granulometria conjunta do rejeito arenoso.....	40
Figura 5.3. Curva de Compressibilidade do RF25%.	43
Figura 5.4. Curva de Permeabilidade do RF25%.....	43
Figura 5.5. Curva de compressibilidade do RF10%.	44
Figura 5.6. Curva de permeabilidade do RF10%.....	45
Figura 5.7. Curva de compressibilidade do RF30%.	46
Figura 5.8. Curva de Permeabilidade do RF30%.....	46
Figura 5.9. Curvas de compressibilidade.....	47
Figura 5.10. Curvas de permeabilidade.....	48
Figura 5.11. Curva de compressibilidade do RG35%.....	50
Figura 5.12. Curva de permeabilidade do RG35%.	50
Figura 5.13. Curva de adensamento do RG35%.	51
Figura 5.14. Comparação das curvas de compressibilidade de RG35%.....	51
Figura 5.15. Curvas de compressibilidade relativas às combinações do RF25%.	54
Figura 5.16. Curvas de permeabilidade relativas às combinações do RF25%.....	54
Figura 5.17. Curvas de compressibilidade relativas às combinações do RG35%.	56
Figura 5.18. Curvas de permeabilidade relativas às combinações do RG35%.....	56
Figura 5.19. Etapa de fluxo de rejeito grosso.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Velocidades da prensa e suas respectivas vazões correspondentes.....	26
Tabela 4.2. Resultados da etapa de sedimentação.....	30
Tabela 4.3. Planilha utilizada na etapa de adensamento.	34
Tabela 5.1. Resultados da caracterização.....	40
Tabela 5.2. Parâmetros de compressibilidade e permeabilidade dos rejeitos analisados (Pereira, 2006).	41
Tabela 5.3. Parâmetros obtidos pelo programa HCTplus (Silva, 2008).	41
Tabela 5.4. Parâmetros obtidos a partir das análises (Lima, 2009).....	41
Tabela 5.5. Parâmetros obtidos pela planilha.....	42
Tabela 5.6. Cálculo do erro (B, D) para rejeito RF25%.	43
Tabela 5.7. Parâmetros obtidos pela planilha.....	44
Tabela 5.8. Cálculo do erro (B, D) para o RF10%.....	44
Tabela 5.9. Parâmetros obtidos pela planilha.....	45
Tabela 5.10. Cálculo do erro (B, D) para o RF30%.....	46
Tabela 5.11. Comparativo entre os teores de sólidos iniciais do rejeito fino.....	47
Tabela 5.12. Teores de sólidos das respectivas misturas.	48
Tabela 5.13. Parâmetros obtidos pela planilha.....	49
Tabela 5.14. Cálculo do erro (B, D) para o RG35%.....	49
Tabela 5.15. Relação combinação-velocidades.	52
Tabela 5.16. Parâmetros obtidos para o RF25%.....	53
Tabela 5.17. Cálculos estatísticos das combinações do RF25%.....	53
Tabela 5.18. Relação combinação-velocidades.	55
Tabela 5.19. Parâmetros obtidos para o RG35%.	55
Tabela 5.20. Cálculos estatísticos das combinações do RG35%.	55

RESUMO

MENEZES, Ana Carolina Carvalho de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2017. **Análise do comportamento de rejeitos de mineração de ferro submetidos ao ensaio HCT.** Orientador: Roberto Francisco de Azevedo. Coorientadores: Eduardo Antônio Gomes Marques e Izabel Christina D’Almeida Duarte de Azevedo.

O crescente avanço tecnológico vem cobrando um preço alto em termos ambientais, ao exigir uma intensificação na exploração dos recursos minerais. A necessidade do uso de jazidas consideradas anteriormente inviáveis, pelo baixo teor de minerais, gera volumes maiores de resíduos divididos em estéril e rejeito. Os estéreis normalmente não são agressivos ao meio ambiente e podem ser estocados em pilhas. Os rejeitos, ao contrário, podem ser agressivos, de forma que sua estocagem deve atender tanto às disponibilidades econômicas das mineradoras, quanto à necessidade do menor impacto possível ao meio ambiente. Quando disposto em forma de polpa, ou lama, o sucesso depende diretamente de um bom dimensionamento dos reservatórios. Para que isso ocorra, é necessário avaliar corretamente tanto a compressibilidade quanto a condutividade hidráulica do material. Entretanto, as lamas provenientes destes processos são muito moles e a teoria do adensamento convencional de Terzaghi não se aplica. Sendo assim, esses materiais passaram então a ser estudado através de uma teoria de adensamento com deformações finitas e ensaios especiais de adensamento. Entre estes, nas últimas décadas o ensaio HCT (*Hydraulic Consolidation Test*) ganhou um espaço cada vez maior no estudo do comportamento de rejeitos de mineração. Este ensaio tem como princípio geral a aplicação de um fluxo descendente ao longo da amostra que, em associação aos efeitos de peso próprio, induz o adensamento por forças de percolação. Além disso, durante o ensaio são aplicadas velocidades distintas de percolação, gerando valores constantes de diferença de pressão entre o topo e a base da amostra. É relevante, então, verificar a influência da escolha da velocidade nos resultados finais. E para um estudo mais completo, é importante que sejam realizados ensaios com diferentes teores de sólidos, e assim verificar se essa variação interfere de alguma forma nos

resultados. Após a análise dos resultados, percebeu-se que no caso do rejeito de granulometria fina, a variação do teor de sólidos inicial, não interfere grandemente na proporção da mistura no momento do ensaio. Desse modo, as curvas de compressibilidade e permeabilidade não apresentam valores discrepantes entre si, e foram consistentes com resultados característicos de materiais finos. Em se tratando do rejeito grosso, o HCT se mostrou adequado à obtenção dos parâmetros necessários, através de um procedimento iterativo. Seus resultados foram compatíveis com os obtidos através do ensaio de adensamento incremental, comprovando sua validade. Também foi possível concluir, que para ambos os rejeitos, a escolha da velocidade de fluxo não interfere significativamente no resultado final.

ABSTRACT

MENEZES, Ana Carolina Carvalho de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2017. **Analysis of the iron mining wastes behavior submitted to the HCT test.** Adviser: Roberto Francisco de Azevedo. Co-advisers: Eduardo Antônio Gomes Marques and Izabel Christina D’Almeida Duarte de Azevedo

The technological growth of mining industries has been taking its toll on the environment, in order to explore mineral resources more intensively daily. The need to exploit previously unfeasible deposits, generates larger volumes of waste. These can be divided into two groups, sterile and tailing. The first, is usually not aggressive to the environment and can be stockpiled. On the other hand, tailing waste can be harmful in a way that its storage must fulfill both the company’s economic interest and the need for the least environmental impact possible. When disposed in slurry form, its success depends directly on the correct design of the reservoir. For this to happen, it is necessary to correctly evaluate the compressibility and permeability of the tailing. However, tailings are highly compressible and it is necessary to study the consolidation characteristics of this material by means of techniques that consider large deformations. In recent decades, the use of the Hydraulic Consolidation Test (HCT), has become a common occurrence in the studies of tailing behavior. This test induces consolidation by percolation forces due to a decreasing flow along the sample and effects of self-weight. This essay aims to compare these results with ones obtained by one-dimensional consolidation tests. Moreover, during the test different flow rates are applied to the specimen, generating constant pressure values between its top and bottom surfaces. It is important then to verify the effects of flow rate in the final results. Additionally, it is valuable that tests with different initial solid contents are performed and analyzed to understand if it influences the results. After these studies, it was noted that for the fine tailing, the initial solid content variation does not influence the compressibility and permeability values, and these were consistent with characteristic values. In dealing with thick tailing, the HCT was proven adequate for obtaining the needed parameters through an iterative process. Results were compatibles with the ones obtained by one-dimensional consolidation

tests, proving its validity. It was also possible to conclude that for both kinds of tailing, the flow rate choice does not significantly interfere in the final results.

1 INTRODUÇÃO

O crescente avanço tecnológico vem cobrando um preço alto em termos ambientais ao exigir que a exploração de recursos minerais seja cada vez mais intensa. A necessidade do uso de jazidas consideradas anteriormente inviáveis pelo baixo teor de minerais gera um maior volume de resíduos e subprodutos. Essas sobras decorrentes da transformação desta matéria prima são chamadas de rejeito.

Devido a esse aumento na produção de rejeito, torna-se necessário que a sua estocagem atenda tanto às ambições econômicas das mineradoras e indústrias, quanto à necessidade de se realizar esse processo causando o menor impacto possível ao ambiente. E isso tudo sem que fossem esquecidos os princípios básicos e éticos da Engenharia.

Nos anos anteriores à década de 70, a disposição de rejeitos era realizada sem nenhuma abordagem de engenharia adequada. Alguns projetos simplesmente lançavam os rejeitos nos cursos d'água existentes, ou armazenavam os rejeitos em reservatórios criados por aterros de estéril de lavra. Após a ocorrência de grandes rupturas com mortes e grandes impactos ambientais, passou-se a considerar e, em número crescente de casos, a aplicação da tecnologia disponível de engenharia de barragens ao problema. (CBDB, 2012)

Atualmente no Brasil, a técnica de disposição para resíduos de mineração mais utilizada é a disposição via úmida, na qual os rejeitos são diluídos em água de lavagem ou substâncias químicas utilizadas no processamento e, então, conduzidos por bombeamento à lagos formados por diques ou barragens. (Villar, 2002)

O sucesso desse tipo de atividade depende diretamente de um bom dimensionamento dos reservatórios. Para a formulação do modelo de deposição, torna-se fundamental conhecer a geometria do reservatório, o comportamento dos materiais associados ao estudo, os problemas geotécnicos relacionados ao processo de fluxo e as características do rejeito em termos de compressibilidade e permeabilidade (Pereira, 2006). Entretanto, as lamas provenientes destes processos são muito moles. Sendo assim, a teoria do adensamento convencional de Terzaghi

não se aplica, uma vez que as deformações não podem ser consideradas infinitesimais. O processo de adensamento destas lamas passou então a ser estudado através de uma teoria de adensamento com deformações finitas, ou de grandes deformações, originalmente apresentado por Mikasa (1963) e Gibson et al. (1967).

No campo, normalmente são utilizados amostradores especiais e sonda piezométricas para a determinação das relações de compressibilidade (σ' versus e) e permeabilidade (k versus e). No Laboratório existem vários equipamentos para a determinação dessas relações. Dentre esses, nas últimas décadas, o ensaio de adensamento por forças de percolação (HCT) tem se destacado por fornecer resultados mais consistentes. (Silva, 2008)

Um ponto a ser considerado é que os resultados fornecidos pelo HCT parecem ser influenciados pelo teor de sólidos inicial da amostra e também pelo modo de interpretação das etapas. Durante o ensaio, são aplicadas diferentes velocidades de fluxo, gerando vários estágios no gráfico resultante. Em teoria, os resultados independem do estágio escolhido para a análise, porém é relevante verificar a influência dessa escolha nos resultados finais. E para um estudo mais completo, é interessante que sejam realizados os ensaios para diferentes teores de sólidos, e assim verificar se essa variação interfere de alguma maneira no ensaio.

No entanto, a literatura diz que esse ensaio produz melhores resultados quando utilizado para a análise de rejeitos de granulometria fina. Se torna interessante, portanto, um estudo para a verificação dessa realidade. É proposto nesse trabalho, então, uma comparação dos resultados obtidos pelo HCT e os obtidos pelo ensaio de adensamento unidimensional por incrementos, para rejeitos granulares.

1.1 OBJETIVOS

a. Geral

Esse trabalho tem o objetivo de comparar resultados entre ensaios, além de analisar como a escolha do estágio de velocidade de fluxo interfere na interpretação de ensaios HCT em diferentes tipos de rejeito, com diferentes teores de sólidos.

b. Específicos

- Caracterizar e ensaiar através do HCT rejeitos de diferentes granulometrias lançados pela SAMARCO.

- Para o rejeito fino, variar o teor de sólidos inicial, e verificar como isso pode afetar o ensaio

- Para cada granulometria de rejeito, realizar diversas interpretações, quanto à reprodutibilidade dos resultados variando-se o fluxo induzido.

- Para o caso do rejeito grosso, verificar a validade do ensaio, e comparar resultados com ensaio de adensamento edométrico convencional.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DO REJEITO

Para um melhor entendimento dos termos utilizados no universo da engenharia de barragens, se torna necessário uma contextualização de acordo com as normas brasileiras. Segundo a ANBT NBR:13028/2006 de elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água, todo e qualquer material não aproveitável economicamente, gerado durante o processo de beneficiamento de minérios é chamado de rejeito. Conceito esse, diferente do estéril, que é o material não aproveitável economicamente, cuja remoção se torna necessária para a lavra do minério. (ABT NBR:13029/2006 – Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha.)

Todo e qualquer resíduo produzido pela indústria deve ser classificado quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. Os rejeitos, objeto de estudo desse trabalho, podem ser classificados através da NBR 10004/2004, que divide os resíduos em duas classes:

- a) Classe I – Perigosos: São inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos
- b) Classe II – Não Perigosos
 - b.1) Classe II A – Não inertes: Biodegradáveis, combustíveis e solúveis
 - b.2) Classe II B – Inertes: Insolúveis mas conferem cor, turbidez, dureza e sabor.

Como esse trabalho analisa o comportamento de rejeitos de minério de ferro, torna-se interessante ressaltar que esse tipo de rejeito é normalmente classificado como Classe II B: inerte, uma vez que os processos de beneficiamento não envolvem agentes químicos que de alguma forma enquadrem esse resultado final como não inerte.

O solo é um sistema particulado natural, multifásico, composto por um esqueleto mineral e vazios preenchidos com fluidos, em alguns casos, há milhões de

anos. Os rejeitos não podem ser definidos da mesma maneira. Eles se assemelham aos solos, mas são de formação bem recente, às vezes empilhados poucos minutos após a sua formação. Possuem características muito variáveis devido ao tipo de minério e ao processo de beneficiamento empregado, que podem ser mudados de acordo com a porcentagem de minério da jazida.

O uso do rejeito como material de construção de pilhas e barragens é uma prática muito comum usada pelas mineradoras nos tempos atuais. O uso do rejeito granular para tal fim exige a utilização de princípios geotécnicos no projeto e no controle de qualidade de construção. Isso acontece devido ao comportamento geotécnico do aterro hidráulico ser dependente de parâmetros de deformabilidade, resistência e permeabilidade. (Barbosa, 2016)

2.2 DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

O beneficiamento de minérios é o tratamento industrial que prepara, purifica ou enriquece minérios por métodos físicos ou químicos, sem alteração da constituição dos minerais. O beneficiamento divide o mineral bruto em concentrado e rejeito. O rejeito, parcela que não apresenta valor econômico é disposta em sistemas de armazenamento e é, comumente, contida por diques e barragens, quando descartados na forma de lama, ou polpa. (Lima, 2009)

Esses elementos usados para conter a polpa proveniente do processo de beneficiamento são, geralmente, construídos em etapas com alteamentos sucessivos. Existem três métodos mais utilizados para isso: método de montante, de jusante e da linha de centro.

Nesses processos, a operação e a construção ocorrem concomitantemente, e o seu lançamento normalmente é feito através de hidrociclones. Estes aparelhos são responsáveis por separar as diferentes granulometrias que constituem o rejeito: o *underflow* (rejeito grosso) e o *overflow* (rejeito fino ou lama).

As barragens podem ser alteadas usando-se do próprio material de rejeito. Apesar da grande disponibilidade, é muito importante levar em consideração que o rejeito não é o melhor material para essa finalidade. Desse modo, deve-se prestar atenção na sua susceptibilidade ao *piping*, liquefação, erosão e dificuldade na

compactação. Os métodos de alteamento serão descritos a seguir, baseados em Lima (2009):

No método de montante (Figura 2.1), o eixo da crista da barragem sofre um deslocamento para montante. Após a construção do dique de partida, geralmente com material de boa qualidade, como enrocamento ou material argiloso compactado, inicia-se o lançamento de rejeito à montante da crista. Devido às separações granulométricas que normalmente ocorrem durante o lançamento dos rejeitos, a fração grossa fica depositada próximo ao dique e servirá de suporte para o próximo alteamento. Apesar do método de montante ser o mais econômico, a susceptibilidade à liquefação, limitada altura de alteamento e linha freática elevada, são algumas desvantagens, que em alguns casos podem causar problemas de instabilidade do talude de jusante.

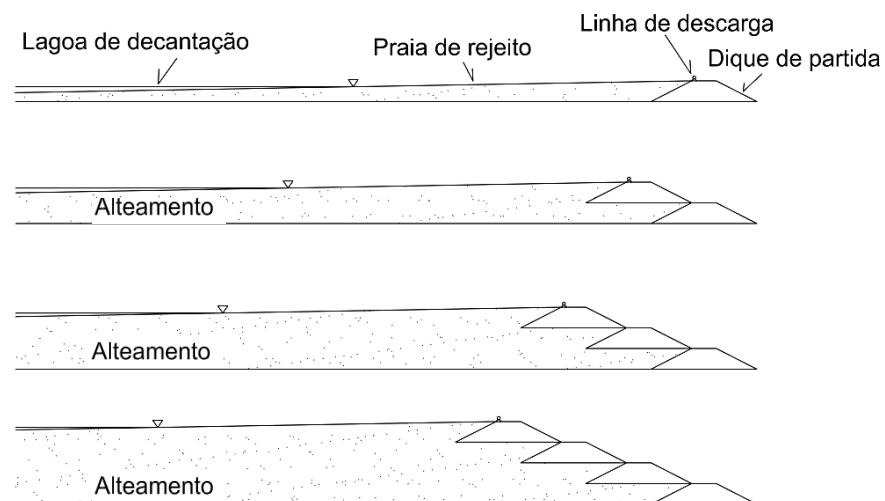


Figura 2.1. Esquema de alteamento de barragem por método de Montante (Adaptado de Lima, 2009).

Já quando a crista da barragem se move para fora do lago, tem-se o método de jusante, que consiste no alteamento da barragem para jusante do dique de partida, apresentado na Figura 2.2. Normalmente, na sua construção são empregados solos de empréstimo ou estéril provenientes da lavra. Este é o método mais seguro, visto ser possível controlar a qualidade do maciço e a posição da linha freática através de um sistema contínuo de drenagem interna. A grande desvantagem é o alto custo devido ao grande volume de solo compactado necessário para a construção do corpo da barragem.

No método da linha de centro o rejeito é lançado periféricamente à montante, formando uma praia, e, nos sucessivos alteamentos, lança-se o aterro no limite da praia e no talude de jusante do dique de partida. Os eixos da crista do dique de partida e da barragem após o alteamento são, praticamente coincidentes, como por ser visto na Figura 2.3.

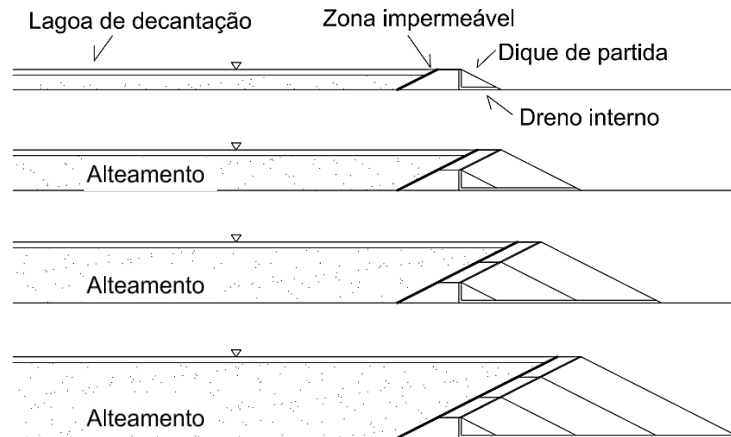


Figura 2.2. Esquema de alteamento de barragem por método de jusante (Adaptado de Lima, 2009).

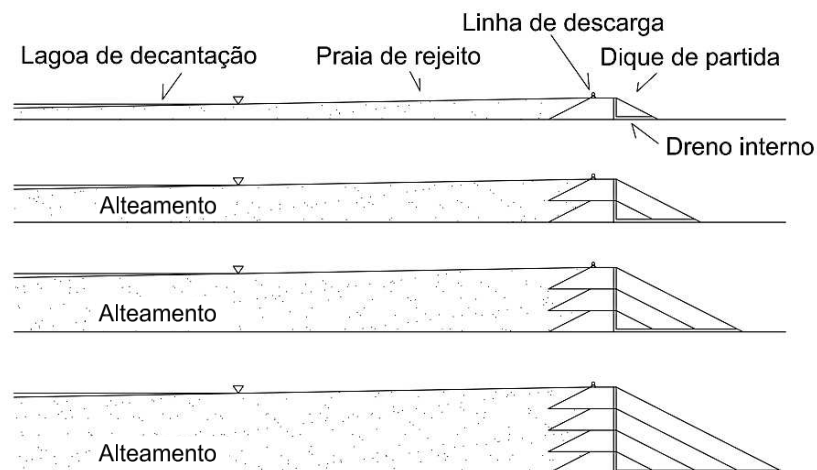


Figura 2.3. Esquema de alteamento de barragem por método de linha de centro (Adaptado de Lima, 2009).

Após lançados no reservatório, os rejeitos passam por um processo de sedimentação e adensamento.

Depois de uma primeira etapa, chamada floculação, onde as partículas se unem formando partículas maiores, acontece a sedimentação. Nessa etapa, as partículas se tornam grandes o suficiente para iniciarem um movimento descendente, devido ao peso próprio. A medida que a concentração vai aumentando em uma profundidade maior do reservatório, o processo de sedimentação acontece com a interferência de uma partícula sobre a outra, embora as tensões efetivas ainda sejam nulas. Numa região ainda mais profunda, aparece uma camada de espessura crescente com o tempo, que possui concentração suficientemente grande para que apareçam tensões efetivas. Nessa camada já ocorre o processo de adensamento devido ao peso próprio do material, que vai avançando com o acréscimo de novas cargas, a partir de novos carregamentos. A Figura 2.4 mostra como as etapas acontecem no tempo.

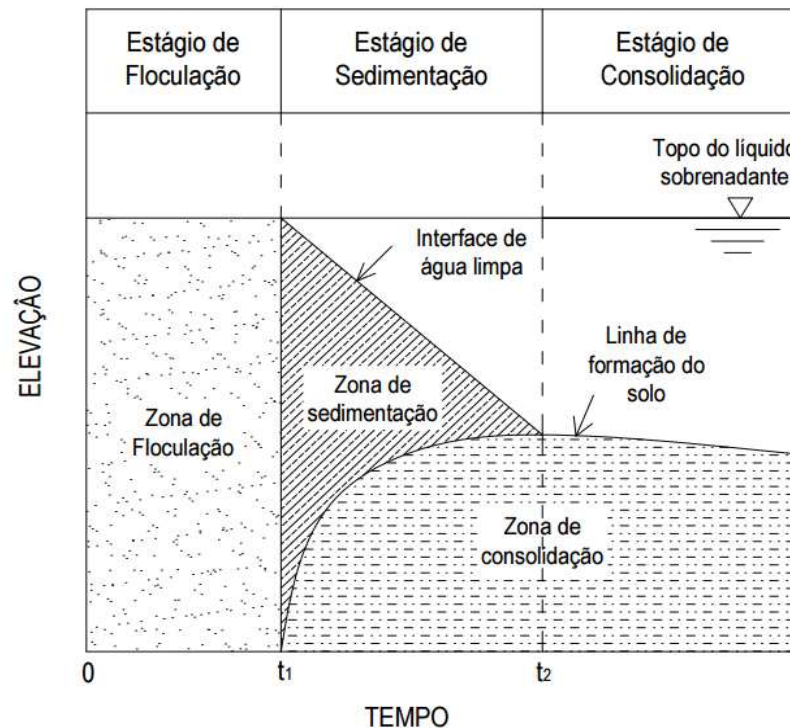


Figura 2.4. Comportamento do rejeito após deposição no reservatório (Adaptado de Villar, 2002).

Com a preocupação dos órgãos ambientais diante da segurança e possíveis danos associados às barragens que compõem o reservatório para a disposição destes rejeitos, novas tecnologias de disposição estão sendo utilizadas.

O conceito de disposição de rejeitos espessados foi introduzido no final da década de 60 e consiste no aumento da concentração de sólidos em peso, por meio do desaguamento da polpa e consequente aumento do teor de sólidos. É utilizado para a recuperação de água de polpas de rejeitos ou concentrados e aumento da densidade de polpas visando melhorar a eficiência de operações subsequentes tais como filtragem, moagem, flotação, transporte, estocagem e lixiviação. Os espessadores podem ser utilizados em suspensões com menos de 1% até 50%, obtendo como polpas espessadas com 10 a 80% de sólidos.

Ainda segundo Lacerda, 2004, a forma mais encontrada de um espessador é a de um tanque cilíndrico baixo, com o fundo cônico, provido de raspadores que tem a função de levar os sólidos sedimentados para o orifício de descarga da fase sólida, localizado no centro do fundo do espessador. O fluxo principal é radial sendo o *overflow* descarregado pela parte superior em uma calha desenhada para esse objetivo, a Figura 2.5 ilustra a estrutura.



Figura 2.5. Espessador (Lacerda, 2004).

Para esse procedimento Portes, 2013, apresenta como vantagem principalmente dois pontos. Primeiramente acontece a redução da água armazenada no depósito de disposição de rejeitos, reduzindo custos do sistema e causando menor impacto ambiental. Ainda em relação ao impacto ambiental, o menor volume total a

ser armazenado aliado à redução do lago formado acima do depósito, faz com que as barragens de contenção de rejeitos diminuam drasticamente sua altura e, conseqüentemente, seu volume e área afetada. Outro ponto importante a ser mencionado, é a possibilidade da recirculação de água da planta de processamento. Esse processo permite a formação de um depósito de água clarificada, que pode ser bombeada e tratada para reutilização em planta.

Como desvantagens, os espessadores ocupam mais área que os demais métodos de separação sólido-líquido, tais como filtração ou centrifugação. Além disso, sua construção envolve uma quantidade significativa de material, o que, muitas vezes, significa um elevado custo de capital para implantação.

2.3 SEDIMENTAÇÃO

O processo de sedimentação refere-se ao movimento gravitacional de uma partícula, ou o conjunto delas, através de um determinado meio aquoso, e que é dependente do tamanho e peso dos grãos e de como a hidrodinâmica influencia. À medida que o processo de sedimentação acontece, ocorre um aumento da concentração de sólidos no fundo do reservatório, com a formação de uma camada de sedimento depositada. Cada camada representa uma sobrecarga para a camada subjacente, impondo excessos de poropressão que tendem a se dissipar ao longo do tempo, com conseqüentes acréscimos das tensões efetivas, desenvolvendo-se, portanto, o processo de adensamento.

Ocorre uma interdependência direta entre o volume de sólidos e o tempo, visto que em termos práticos, a deposição é contínua em função dos novos lançamentos.

Do ponto de vista formal, a distinção entre sedimentação e adensamento é feita em termos da ocorrência ou não de tensão efetiva.

Na fase de sedimentação, as partículas tenderiam a se depositar isoladamente ou por floculação, mobilizando diferentes zonas ou horizontes ao longo do ambiente aquoso. De uma forma simplificada, mas pertinente no caso dos rejeitos mais granulares, a velocidade de deposição seria avaliada pela Lei de Stokes, para uma dada partícula isolada e supostamente esférica, tal que:

$$V = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\eta} d^2 \quad (3.1)$$

Sendo:

V – velocidade de queda da partícula; γ_s – peso específico dos sólidos; γ_w – peso específico da água; η – viscosidade do líquido; d – diâmetro da partícula.

Ainda é interessante notar que o índice de vazios em rejeitos granulares é influenciado pela intensidade e forma de deposição. Quanto mais turbulento é o lançamento, maior é sua grandeza.

Devido às interações físicas que ocorrem entre as partículas de rejeitos mais finos, o processo não é regido pela Lei de Stokes de sedimentação livre, para esses níveis de teores de sólidos.

Nestas condições, um modelo comumente adotado tem sido aquele proposto por Kynch (Kynch, 1952) que considera estas interferências e exprime a velocidade de queda como uma função exclusiva da concentração local de partículas. Vale ressaltar que essa teoria considera o material inerte, ou seja, não leva em consideração as características físico-químicas do material.

No modelo de Kynch, a velocidade de queda da partícula (v_s) em um ponto qualquer da zona de deposição depende apenas da concentração do meio em sua vizinhança (C). Desta forma, estabelece que a solução do problema pode ser determinada, atendendo-se apenas a equação diferencial de continuidade da fase sólida. A teoria prevê a existência de uma interface superior entre a suspensão e o líquido sobrenadante, cujo movimento, aliado ao conhecimento da distribuição inicial de partículas com a profundidade, é suficiente para determinar a variação da velocidade de queda com a concentração de partículas para uma dada suspensão. As hipóteses simplificadoras da teoria de Kynch são as seguintes (Alves, 1992):

- a concentração de partículas é uniforme através de qualquer seção transversal horizontal;
- a concentração de partículas aumenta com a profundidade da suspensão;
- a velocidade de queda das partículas sólidas (v_s) tende a um valor mínimo à medida que a concentração tende ao valor máximo C_{\max} ;

- a velocidade de queda depende exclusivamente da concentração local de partículas em sua vizinhança;
- o problema é considerado unidimensional, em termos de uma suspensão em sedimentação em uma coluna, desprezando-se o atrito de partículas com as paredes da coluna;
- as partículas têm a mesma forma e tamanho.

A concentração do meio é expressa em termos do peso ou da massa de partículas sólidas por unidade de volume e está relacionada com a massa específica das partículas sólidas (ρ_s) e com índice de vazios (e) ou porosidade (n) pela relação:

$$C = \frac{\rho_s}{(1 + e)} = \rho_s(1 - n) \quad (3.2)$$

O Fluxo de partículas (S) é definido como sendo a quantidade de partículas que atravessa uma dada seção horizontal do meio por unidade de área e de tempo, sendo expresso por:

$$S = C v_s = \frac{\rho_s}{(1 + e)} v_s \quad (3.3)$$

Sendo v_s a velocidade de queda das partículas sólidas.

À medida que a concentração (função da altura H medida a partir da base) aumenta, a velocidade diminui, até que o fluxo cessa e a velocidade se anula. Como o fluxo é proporcional à concentração, ele varia continuamente com a altura. A relação entre concentrações e tempos é chamada de equação de continuidade e é dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial H} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = V(C) \frac{\partial C}{\partial H} \quad (3.4)$$

A inclinação das curvas de mesma concentração, que são obtidas em gráficos, correlacionam valores de alturas e de tempos; O parâmetro $V(C)$ expressa a velocidade de avanço de uma dada frente horizontal de concentração C . A teoria de Kynch não considera, no entanto, os efeitos do processo de adensamento da camada devido ao seu peso próprio. (Cançado, 2010)

2.4 TEORIA DO ADENSAMENTO INFINITESIMAL

O adensamento é um processo lento e gradual de redução do índice de vazios de um solo por expulsão do fluido, através de cargas aplicadas ou do peso próprio. A teoria convencional do adensamento de Terzaghi tem como hipóteses fundamentais os seguintes pontos:

1. O solo é homogêneo e completamente saturado,
2. A água e os grãos são incompressíveis,
3. O escoamento obedece à lei de Darcy e se processa na direção vertical,
4. O coeficiente de permeabilidade se mantém constante durante o processo,
5. O índice de vazios varia linearmente com o aumento da tensão efetiva durante o processo de adensamento,
6. A compressão é unidirecional e vertical e deve-se à saída de água dos espaços vazios,
7. As propriedades do solo não variam durante o adensamento

Essa teoria foi, e ainda é, consagrada para resolução de problema ligados ao processo de consolidação. A questão é que essa teoria tem mostrado discrepâncias significativas com as observações práticas no que diz respeito à solos muito moles. Pode-se dizer que essas diferenças são em grande parte devido às hipóteses simplificadoras descritas anteriormente.

Na realidade, durante o processo de adensamento, com a diminuição do índice de vazios, a condutividade hidráulica cai e o coeficiente de compressibilidade volumétrica varia. Segundo Cañabi, 2011, isso acontece porque a relação de índice de vazios e a tensão efetiva não é linear. No caso de pequenos acréscimos de tensão, pode-se aceitar a validade da hipótese simplificadora, porém no caso de materiais altamente compressíveis essa não-linearidade é destacada.

A partir desses fatos, surgiram trabalhos que passaram a considerar o comportamento não linear dos materiais como um adendo da teoria clássica (Mikasa, 1963 e Gibson et al., 1967).

2.5 TEORIA DO ADENSAMENTO COM DEFORMAÇÕES FINITAS

O estudo das condições específicas da teoria de adensamento a grandes deformações, como também é chamada a teoria de adensamento com deformações finitas, tomou impulso através das formulações propostas nos trabalhos de Mikasa (1963) e de Gibson et al. (1967).

A teoria em questão descreve de forma adequada a magnitude e o progresso do recalque de materiais de granulometria fina altamente compressíveis. Essa teoria é a mais indicada para o estudo do adensamento destes materiais e é baseada nas seguintes suposições, de acordo com Schiffman et al. (1980):

- Meio saturado e constituído de três componentes: as partículas de solo, o esqueleto de solo formado por elas e os vazios preenchidos com água;
- Completa interação entre o esqueleto de solo e os vazios preenchidos por água, ou seja, o princípio da tensão efetiva é válido;
- O fluido é newtoniano;
- A Lei de Darcy-Gersevanov governa o escoamento do fluido através do esqueleto de solo e é expressa em termos da velocidade relativa entre a água intersticial e as partículas sólidas;
- Assume-se que as partículas de solo e a água que preenche os vazios são incompressíveis;
- As massas das porções sólidas e fluidas do sistema são conservadas separadamente, o que requer a não existência de interações químicas entre os constituintes.

Um aspecto importante na formulação da teoria do adensamento a grandes deformações de Gibson et al. (1967) são os sistemas de coordenadas que serão explicados a seguir.

Considere uma camada de argila de espessura inicial H sujeita a grandes deformações, na qual estão relacionados os sistemas de coordenadas lagrangeano e euleriano. A coordenada lagrangeana a e a euleriana ζ são orientadas no sentido da gravidade. A coordenada euleriana ζ tem sua origem no topo da camada, o qual é tomado como plano de referência.

A coordenada lagrangeana a e o tempo t são variáveis independentes, enquanto a coordenada euleriana ζ é uma variável dependente de a e t , ou seja, $\zeta = \zeta(a, t)$. A relação entre a e ζ é dada por:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial a} = \frac{1 + e}{1 + e_0} \quad (3.5)$$

Sendo:

$e = e(a, t)$ – índice de vazios da camada; $e_0 = e(a, 0)$ – o índice de vazios inicial da camada;

Desta forma, num tempo t , a superfície do topo (contorno superior) e da base (contorno inferior) da camada de argila podem ser referenciadas por meio das coordenadas lagrangeanas ($a = 0$ e $a = H$) ou eulerianas ($\zeta = S(0, t)$ e $\zeta = H$). Sendo S o recalque dado por $S(a, t) = \zeta - a$. Um outro sistema de coordenada, também muito usado, é o sistema de coordenada reduzida ou do material. Neste sistema, a coordenada z de uma partícula é definida como sendo o volume de partículas sólidas contidas entre um plano de referência, geralmente a base da camada, e o ponto de coordenada lagrangeana a ser analisado. (Silva, 1999)

O volume de partículas sólidas z é definido como:

$$z(a) = \int_0^a [1 - n(a, 0)] da \quad (3.6)$$

Onde $n(a, 0)$ representa a distribuição das porosidades.

Esse volume é considerado constante durante o processo de adensamento, pois as partículas sólidas são assumidas incompressíveis. (Silva, 1999)

A Figura 2.6 mostra a relação entre os sistemas de coordenadas, através de um elemento de solo formado pelo volume unitário de sólidos e pelo volume de vazios.

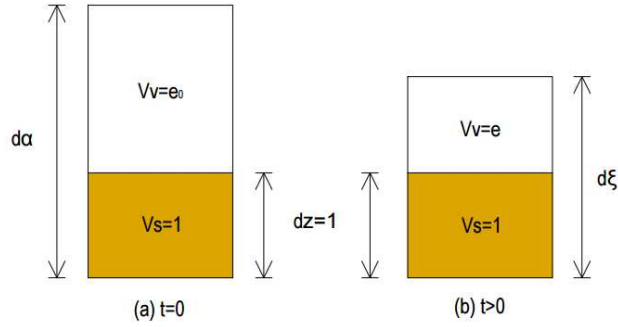


Figura 2.6. Relação entre os sistemas de coordenadas lagrangeanas, eulerianas e reduzidas: (a) configuração inicial, $t=0$ e (b) configuração no tempo t (Adaptado de Pereira, 2006).

Desta forma, a relação entre os sistemas de coordenadas reduzido e lagrangeano pode ser expressa por:

$$\frac{\partial z}{\partial \alpha} = \frac{1}{1 + e_0} \quad (3.7)$$

A relação entre o sistema de coordenada reduzido e euleriano pode ser estabelecido através das relações 3.1 e 3.3, tal que:

$$\frac{\partial z}{\partial \xi} = \frac{1}{1 + e} \quad (3.8)$$

A equação do adensamento com deformações finitas, Equação (3.5), é obtida a partir das equações de equilíbrio da mistura (sólidos e líquidos) e de continuidade das partículas, do fluido e do conjunto. Além disso, usam-se o princípio das tensões efetivas, a Lei de Darcy-Gersevanov e as relações constitutivas do material (Gibson et al., 1967).

A equação em questão pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[g(e) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} \right] - f(e) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (3.9)$$

em que $g(e)$ é igual a:

$$g(e) = \frac{k(e)}{(1 + e)\gamma_w} \cdot \frac{d\sigma'}{de} \quad (3.10)$$

e tem expressão semelhante à do coeficiente de adensamento. E $f(e)$ é o termo correspondente às forças devido ao peso próprio igual a:

$$f(e) = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \cdot \frac{\partial \left[\frac{k(e)}{1+e} \right]}{\partial e} \quad (3.11)$$

A equação (3.9), modificada para simular o enchimento de reservatórios de rejeito, foi resolvida pelo método das diferenças finitas, pioneiramente no Brasil, por Azevedo e Sado (1990).

2.6 MODELOS CONSTITUTIVOS

As características de compressibilidade e permeabilidade são expressas por relações entre ‘índice de vazios x tensões efetivas’, e ‘índice de vazios x permeabilidade’, respectivamente. Essas relações devem ser modeladas por meio de funções matemáticas que melhor se adequem ao resultados reais.

No que diz respeito à compressibilidade, o modelo linear-logarítmico apresenta a expressão mais simples, onde considera-se o coeficiente C_c , de compressibilidade, constante. Apesar da facilidade de aplicação da fórmula, esse modelo apresenta algumas limitações, como índice de vazios infinito para tensão efetiva nula.

A equação é descrita por:

$$e = e_0 - C_c \log \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right) \quad (3.12)$$

Sendo: e_0 – índice de vazios inicial; σ'_0 – tensão efetiva inicial; C_c – coeficiente de compressibilidade do solo.

Cronologicamente, serão apresentados alguns modelos já propostos na literatura para a compressibilidade.

(a) 1976 - Modelo de Monte e Krizek

É baseado na seguinte função potencial e é dado em função do limite de fluidez, que aqui é definido como o teor de umidade no instante em que as partículas sólidas começam a apresentar interação entre si.

$$\sigma' = D \left(\frac{e'_0 - e}{1 + e'_0} \right)^N \quad (3.13)$$

Sendo: D, N – constantes; e'_0 – índice de vazios no limite de fluidez.

O termo em parênteses representa a deformação relacionada à variação do índice de vazios.

(b) 1979 - Modelo de Butterfield

O solos podem ser modelados, com grande eficiência, através de duas linha retas em um gráfico do logaritmo do índice de vazios com o logaritmo da tensão efetiva. A relação funcional tem a forma:

$$e = (1 + e_0) \cdot \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right)^{-C_c} - 1 \quad (3.14)$$

Sendo: C_c – inclinação do trecho correspondente a região normalmente adensada da curva; esta deve ser substituída por C_s para a região sobreadensada da curva.

(c) 1979 - Modelo de Somogyi

A função potência proposta por Somogyi (1979) é expressa da seguinte forma:

$$e = A\sigma'^B \quad (3.15)$$

Sendo: A, B – Constantes do modelo

(d) 1982 - Modelo de Koppula e Morgenstern

Este modelo foi inicialmente proposto por Jambu (1963), na seguinte forma:

$$\frac{de}{d\sigma'} = \left(\frac{de}{d\sigma'} \right)_0 \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right)^p \quad (3.16)$$

Que pode ser integrado para se obter que:

$$e = \left(\frac{de}{d\sigma'} \right)_0 \frac{1}{(\sigma'_0)^p} \frac{(\sigma')^{p+1}}{(p+1)} + C \quad (3.17)$$

Sendo: p – constante do material; C – constante de integração que é igual ao índice de vazios correspondente à tensão efetiva nula.

(e) 1983 - Modelo de Carrier III et al.

A função potência proposta tem a forma:

$$e = \alpha \left(\frac{\sigma'}{P_{atm}} \right)^\beta + \varepsilon \quad (3.18)$$

Sendo: P_{atm} – pressão atmosférica; $\alpha, \beta, \varepsilon$ – são coeficientes empíricos

(f) 1984 - Modelo de Gibson et al. (1981) e Cargill

A função exponencial desenvolvida prar modelar o adensamento unidimensional de materiais de granulometria fina tem a forma:

$$e = (e_{00} - e_{\infty}) \exp(-\lambda\sigma') + e_{\infty} \quad (3.19)$$

Sendo: e_{00} – índice de vazios correspondente à tensão efetiva nula; e_{∞} – índice de vazios correspondente à tensão efetiva infinita; λ – constante do material.

Segundo Liu (1990), a habilidade da expressão de modelar o comportamento de solos moles é limitada a uma faixa de tensão relativamente pequena. Além disso, para argilas reais, λ não pode ser uma constante do material. Em vez disso, ele é altamente variável.

(g) 1989 - Modelo de Hardin

Este modelo é proposto para solos coesivos, normalmente adensados, submetidos à um estado de deformação unidimensional e apresenta a seguinte expressão:

$$\frac{1}{e} = \frac{1}{e_i} + \frac{1}{S_{1-D}} \left(\frac{\sigma'}{P_{atm}} \right)^p \quad (3.20)$$

Sendo: $1/e_0$ – intercepto para σ' igual a zero; p – parâmetro do material e S_{1-D} – coeficiente de rigidez adimensional para a deformação unidimensional

(h) 1990 - Modelo de Liu

Esse modelo foi obtido através do desenvolvimento da expressão de Somogyi (1979) adicionando uma constante Z de forma a se evitar o problema da obtenção de um índice de vazios infinito para a tensão efetiva nula. Esse modelo tem se mostrado bastante eficiente em modelar a relação ‘índice de vazios (e) x tensão efetiva (σ'_v)’, por resolver as deficiências relacionadas nos modelos prévios, além de ter representatividade em solos normalmente e sobreadensados. O modelo é apresentado a seguir:

$$e = A(\sigma'_v + Z)^B \quad (3.21)$$

Onde A , B e Z são parâmetros obtidos no ensaio HCT.

Através desse modelo, o índice de vazios fica bem definido para a tensão efetiva nula, independente da tensão.

No que diz respeito à permeabilidade, o modelo linear logarítmico apresenta a seguinte forma:

$$e = e_0 - C_k \log \left(\frac{k}{k_0} \right) \quad (3.22)$$

Sendo: C_k – constante para um dado solo; k_0 – coeficiente de permeabilidade inicial.

Destacaram-se também os seguintes modelos:

(a) 1956 - Modelo de Kozeny-Carman

Este modelo apresenta a seguinte forma:

$$k = C \frac{e^3}{(1 + e)} \quad (3.23)$$

Onde C é função do peso específico, da viscosidade do fluido, do fator de forma dos poros, da superfície específica por unidade de volume das partículas sólidas e da tortuosidade do caminho de fluxo.

(b) 1976 - Modelo de Monte e Krisek

Como finalidade os materiais de granulometria fina, os autores propuseram uma relação quadrática da permeabilidade com o índice de vazios. Uma forma linear da função relacionando k dividido por (1+e) foi usada de acordo com:

$$\frac{k}{(1 + e)} = \alpha + \beta e \quad (3.24)$$

Sendo: α , β – constante do material.

(c) 1979 - Modelo de Somogyi

Somogy formulou uma relação de permeabilidade (k). Relação essa, muito apropriada para a modelagem da relação com o índice de vazios (e) em comparação aos modelos linear-logarítmicos.

Este modelo é adotado na análise de resultados da consolidação com grandes deformações e é expresso pela expressão abaixo:

$$k = Ce^D \quad (3.25)$$

Onde C e D são parâmetros obtidos no ensaio HCT.

2.7 ENSAIO DE ADENSAMENTO HIDRÁULICO - HCT

A determinação experimental das características de compressibilidade e de adensamento de rejeitos, expressos pelas relações ‘índices de vazios x permeabilidades’ e ‘índices de vazios x tensões efetivas’, é complexa no caso de rejeitos mais finos e os ensaios convencionais não são convenientes para a sua interpretação, principalmente para baixos níveis de tensão. O ensaio em questão

constitui ferramenta bastante valiosa para a estimativa dos parâmetros de compressibilidade de sistemas de disposição de materiais com finos oriundos de mineração e dragagem, à luz das premissas das teorias de adensamento a grandes deformações (Silva, 1999).

O princípio geral dos ensaios de adensamento HCT (Hydraulic consolidation test ou ensaio de adensamento por percolação induzida) consiste na aplicação de um fluxo descendente ao longo de uma dada amostra de solo que, em associação aos efeitos de peso próprio, induz o adensamento da mesma por gradientes de percolação. Assim, torna-se viável a determinação dos parâmetros de compressibilidade dos solos finos sob baixas tensões, algo impraticável pelos ensaios convencionais de adensamento.

A técnica da bomba de fluxo desenvolvida por Olsen (1966) para medida de permeabilidade de solos com granulometria fina consiste em impor uma vazão de fluxo constante à amostra, por meio da bomba, e medir a correspondente diferença de pressão gerada pela qual o gradiente hidráulico é avaliado. Este é exatamente o conceito oposto do ensaio convencional de permeabilidade a carga constante, no qual um gradiente hidráulico constante é imposto através da amostra e a correspondente quantidade de fluxo é medida.

O uso da bomba de fluxo é igualmente apropriado para solos de baixa e alta permeabilidade, mas as vantagens são mais aparentes em ensaios com solos de permeabilidade baixa. O cálculo do coeficiente de permeabilidade é feito com o emprego da Lei de Darcy e a resolução na medida da vazão de fluxo é pelo menos três ordens de magnitude melhor do que os métodos convencionais.

O procedimento passo-a-passo será descrito na metodologia.

3 METODOLOGIA

3.1 REJEITOS

Serão estudados os rejeitos produzidos pela empresa SAMARCO, Unidade de Germano, em Mariana-MG. (Figura 3.1)



Figura 3.1. Vista geral do sistema de deposição da SAMARCO (GoogleEarth, 2015).

A partir do processo de beneficiamento do minério de ferro, extraído pela SAMARCO, são gerados dois tipos de rejeitos com características bastante distintas: um rejeito mais fino, denominado lama, e um rejeito com granulometria grossa, denominado rejeito arenoso. Para um melhor armazenamento, esse rejeito é dividido de acordo com essas características, com a finalidade de ser lançada em locais distintos no Reservatório de Germano.

Neste trabalho foram estudadas os dois tipos de rejeitos.

3.2 CARACTERIZAÇÃO

Como um dos objetivos deste trabalho foi diferenciar o comportamento do ensaio na análise de diferentes tipos de rejeitos, foi necessária a caracterização geotécnica do material. Para tal será realizado um ensaio de granulometria de acordo com a norma ABNT NBR:7181/1984. Os limites de Atterberg, chamados limites de liquidez e plasticidade, serão feitos à luz das normas ABNT NBR:6459/1984 e ABNT NBR:7180/1984. O peso específico dos sólidos foi realizado utilizando um picnômetro de acordo com a norma ABNT NBR:6508/1982.

3.3 HCT

A metodologia do ensaio HCT, ainda não normatizada, está descrita com detalhes a seguir, bem como o equipamento desenvolvido na UFV por Silva (1999) e, posteriormente, modificados por Silva (2008).

Uma visão esquemática do HCT está mostrada na Figura 3.2.

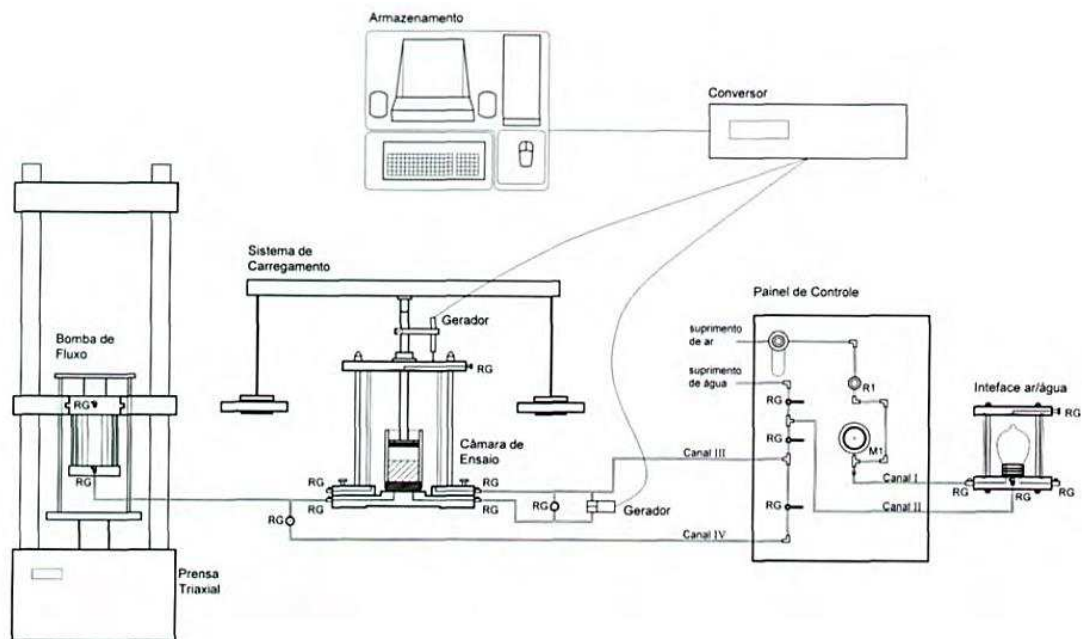


Figura 3.2. Montagem do ensaio HCT (Silva, 2008).

3.3.1 Equipamento

O ensaio edométrico do tipo HCT permite a obtenção das características de adensamento, compressibilidade e permeabilidade de uma amostra de solo pouco consistente, como rejeitos de mineração, por meio da imposição de forças de

percolação na amostra. Essas forças surgem como consequência de um fluxo imposto na base da amostra por meio de uma bomba de fluxo. Seus componentes serão descritos a seguir.

Interface Ar-Água

Esse equipamento tem a função de transferir as pressões do ar para a água. A interface consiste numa membrana impermeável e fixada na base de um cilindro por anéis do tipo “o’ring”. Assim que a câmara é completamente preenchida por água, essa membrana é pressurizada e conseqüentemente inflada. Desse modo toda a pressão é transferida para a água. Assim que o restante do equipamento saturado é conectado à câmara, todo o sistema estará à mesma pressão. (Figura 3.3)

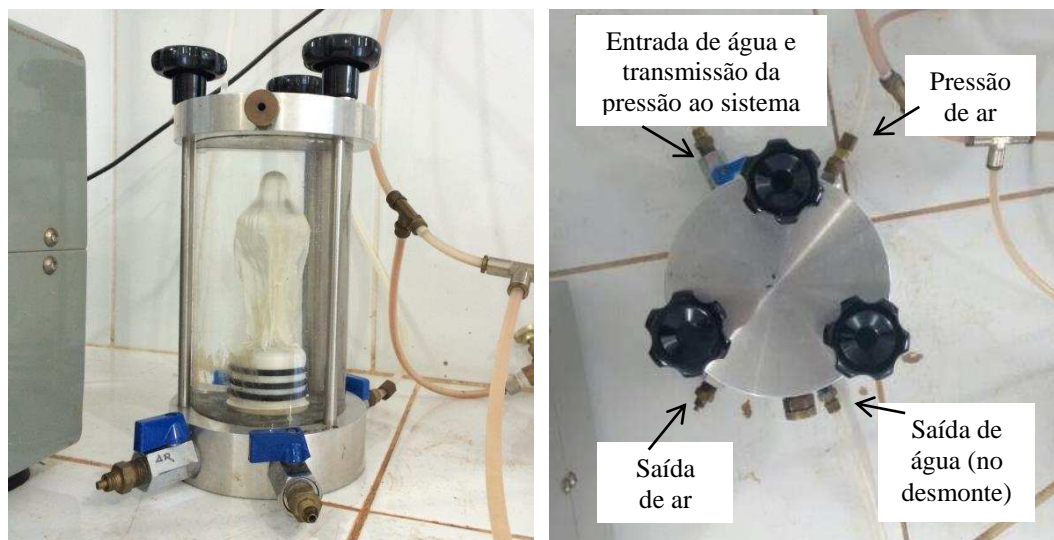


Figura 3.3. Interface ar-água.

Bomba de Fluxo

A bomba de fluxo a ser utilizada nesse trabalho utiliza uma seringa torneada em alumínio e uma prensa de velocidade constante que pode ser ajustável de acordo com o tipo de lama a ser analisada. Tem a função de produzir um fluxo constante de água no sentido descendente, ou seja, do topo para a base da amostra. (Figura 3.4)



Figura 3.4. Bomba de fluxo adaptada na prensa triaxial.

A prensa utilizada pode ter a velocidade regulada entre 0,00001 e 5,99999 mm/min. O fluxo pode ser calculado a partir desses valores e do diâmetro do pistão que, nesta dissertação, foi de 49,2mm. Na Tabela 4.1 são apresentados para alguns valores de velocidade da prensa, os valores de fluxo (vazão) obtidos com este pistão.

Tabela 3.1. Velocidades da prensa e suas respectivas vazões correspondentes.

Velocid. mm/min	Velocid. mm/seg	Vazão mm³/seg	Vazão cm³/seg
0,001	8,33E-06	0,016	1,58E-05
0,001	1,67E-05	0,032	3,17E-05
0,005	8,33E-05	0,158	1,58E-04
0,010	1,67E-04	0,317	3,17E-04
0,050	8,33E-04	1,584	1,58E-03
0,100	1,67E-03	3,169	3,17E-03
0,500	8,33E-03	15,843	1,58E-02
0,800	1,33E-02	25,349	2,53E-02
1,000	1,67E-02	31,686	3,17E-02
1,200	2,00E-02	38,023	3,80E-02
1,500	2,50E-02	47,529	4,75E-02
2,000	3,33E-02	63,372	6,34E-02
2,500	4,17E-02	79,215	7,92E-02

Câmara de Ensaio

A câmara foi adaptada de uma célula triaxial. Nesta nova montagem, há uma pedra porosa na base da célula em toda a sua área. Em sua lateral é fixado um tubo de acrílico com uma régua colada na sua superfície, que permite a leitura da altura da amostra. Acima da amostra é colocado um *top cap*, com o mesmo diâmetro do corpo de prova, que possui em sua face inferior uma pedra porosa que permite a dissipação dos excessos de poropressão provocados pelo carregamento axial, na segunda etapa do ensaio. (Figura 3.5)

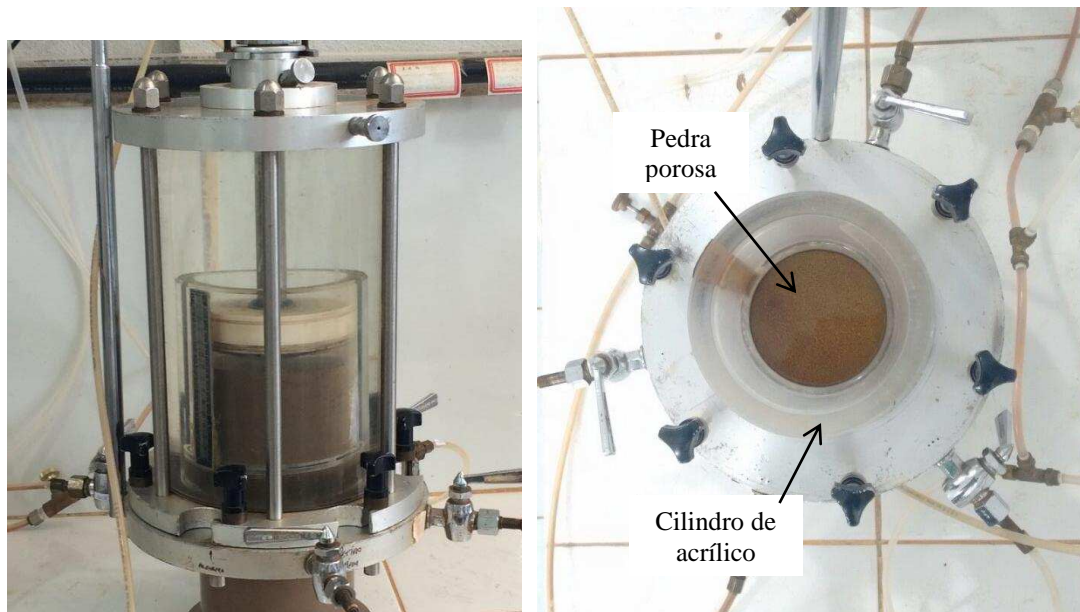


Figura 3.5. Célula triaxial adaptada para o ensaio HCT.

Um transdutor de pressão é acoplado ao equipamento. Este transdutor é formado por duas câmaras, cada uma possuindo uma saída de água e uma válvula de sangria. Uma das saídas de pressão é conectada à base da amostra para medir a poropressão gerada durante o ensaio, enquanto a outra é conectada à água da interface para fornecer a pressão de referência. O transdutor mede a diferença entre estas duas pressões. As válvulas de sangria facilitam o processo de deaeração do sistema. O transdutor é conectado ao sistema de aquisição de dados.

Sistema de carregamento

Na segunda etapa do ensaios, a tensão vertical aplicada à amostra é obtida estaticamente através de um pendural com um apoio central, no qual são colocados

pesos de valores conhecidos. O apoio central é transmitido ao *top cap*, que por sua vez, transmite à amostra. (Figura 3.6)



Figura 3.6. Sistema de carregamento.

Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados (Figura 3.7) recebe, converte, transmite e armazena os resultados obtidos durante a realização do ensaio. O sistema de armazenamento consiste de um computador e um programa escrito na linguagem CVI, desenvolvido na UFV (Azevedo et al., 2003), que armazena e trata os dados transmitidos pelo módulo de conversão.



Figura 3.7. Sistema de aquisição e armazenamento de dados.

3.3.2 Método

A análise do teste supõe a curva de compressibilidade (*e versus σ'_v*) expressa pela equação (3.21) de Liu, 1990, e a relação de permeabilidade, equação (3.25), desenvolvida por Somogy (1979). Em que A, B, C, D e Z são parâmetros dos modelos constitutivos.

Segundo Silva (1999), o ensaio começa com a preparação da amostra. Para isso, faz-se a homogeneização do rejeito. É importante o cuidado de acrescentar água caso a amostra natural esteja com o teor de umidade muito baixo, para que as condições em laboratórios possam ser as mais parecidas com o que acontece em campo. Amostras dessa mistura devem ser separadas para a determinação do teor de umidade inicial, com o qual se calcula o índice de vazios inicial da lama, e_0 .

Neste trabalho, para verificar a influência do teor de sólidos inicial (TSi) nos resultados, foram, inicialmente, realizados ensaios com 3 diferentes valores de TSi, para cada granulometria de rejeito. Primeiramente o rejeito fino foi ensaiado com 25% de sólidos, e a partir dos resultados obtidos, foram analisados os próximos teores de sólidos adequados ao estudo e a realidade. O rejeito grosso foi ensaiado com 35% de sólidos.

Após a preparação da amostra é realizado o cálculo do índice de vazios de formação do solo ou índice de vazios correspondente à tensão efetiva nula (e_{00}).

Na metodologia proposta por Abu-Hejleh e Znidarcic (1992), esse índice é determinado ao colocar o rejeito para sedimentar em um béquer. Após um período de 24 horas, a água acumulada no topo da amostra é cuidadosamente removida, sem que cause qualquer perturbação na mistura. Em seguida, algumas amostras são retiradas da superfície do rejeito sedimentado no béquer, onde a tensão efetiva é praticamente nula, para a determinação do teor de umidade *e*, conseqüentemente, do índice de vazios e_{00} .

Como esse procedimento é pouco preciso, Silva (2008) desenvolveu um método onde a determinação de e_{00} é feita com um acompanhamento de um ensaio de sedimentação em coluna (Figura 3.8)

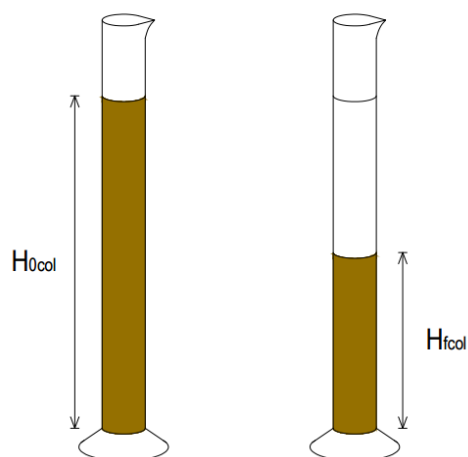


Figura 3.8. Ensaio de sedimentação em coluna.

Um modelo de planilha de sedimentação é apresentado na Tabela 3.2, e em seguida, a Figura 3.9 apresenta o gráfico correspondente.

Tabela 3.2. Resultados da etapa de sedimentação.

DATA	HORA	TEMPO (min)	\sqrt{T}	LEITURA (ml)
10/03/2016	10:40	0	0,0	1000
10/03/2016	10:44	4	2,0	980
10/03/2016	10:48	8	2,8	960
10/03/2016	10:56	16	4,1	946
10/03/2016	10:58	18	4,3	940
10/03/2016	11:02	22	4,7	920
10/03/2016	11:05	25	5,0	910
10/03/2016	11:09	29	5,4	898
10/03/2016	11:15	35	5,9	878
10/03/2016	11:20	40	6,3	860
10/03/2016	11:26	46	6,8	840
10/03/2016	13:28	168	13,0	423
11/03/2016	10:19	1419	37,7	303
11/03/2016	12:42	1562	39,5	302
11/03/2016	14:00	1640	40,5	302
12/03/2016	8:15	2735	52,3	302
14/03/2016	8:45	5645	75,1	301

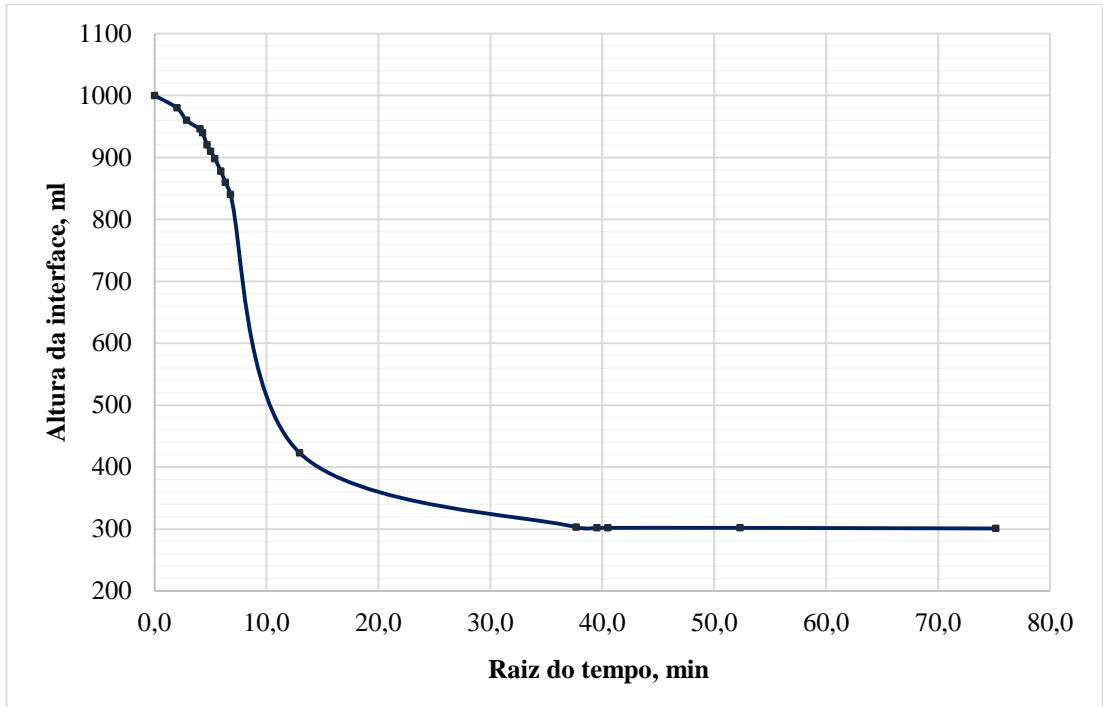


Figura 3.9. Gráfico correspondente à etapa de sedimentação.

Nesse ensaio, inicialmente, determinam-se o índice de vazios inicial (e_{0col}) e a altura inicial (H_{0col}) da mistura colocada na coluna. Desta forma, calcula-se a altura de sólidos na coluna (H_{Scol}).

$$H_{Scol} = \frac{H_{0col}}{1 + e_{0col}} \quad (4.1)$$

Espera-se o tempo necessário à conclusão da sedimentação, e a partir daí determina-se a altura final na coluna (H_{Fcol}). O índice de vazios e_{00} é, então, calculado pela expressão:

$$e_{00} = \frac{H_{Fcol}}{H_{Scol}} - 1 \quad (4.2)$$

Determinado o valor de e_{00} e considerando $\sigma'_v = 0$ na Equação (4.2) é possível reescrevê-la da seguinte forma:

$$A = \frac{e_{00}}{Z^B} \quad (4.3)$$

Com o valor do índice de vazios à tensão efetiva nula obtido, é possível, calcular um novo teor de sólidos, dessa vez representativo da mistura. A amostra é preparada com esse novo teor de sólidos, e deixada em repouso por 24hrs.

Depois da homogeneização, a amostra é cuidadosamente colocada na câmara de ensaio, evitando ao máximo grandes movimentações, para que não ocorra entrada de ar no sistema (Figura 3.10). Passa-se então ao fechamento da célula e, em seguida, à aplicação de uma contrapressão no sistema com valor normalmente igual a 200kPa, por novo período de aproximadamente 24 horas, para garantir a completa saturação da amostra



(a)

(b)

Figura 3.10. (a) Colocação da amostra no cilindro (b) Amostra depositada no equipamento.

Terminada a fase de aplicação da contrapressão, tem-se início o ensaio de adensamento por forças de percolação, submetendo-se a amostra a um fluxo descendente e constante imposto pela sua base. Esse fluxo gera diferença de pressão entre a base e o topo da amostra, e diminuição de sua altura com o tempo. Considera-se concluído o adensamento por forças de percolação quando as variações de pressão e altura ficam constantes. Nesse momento registram-se o valor de diferença de pressão (ΔP_a) e a altura final da amostra (H_a). É possível então calcular a tensão efetiva na base da amostra (σ'_{bA}) pela equação abaixo:

$$\sigma'_{bA} = H_s(\gamma_s - \gamma_w) + \Delta P_a \quad (4.4)$$

A estabilização das variações de pressão é mostrado nas Figuras 4.11 e 4.12.

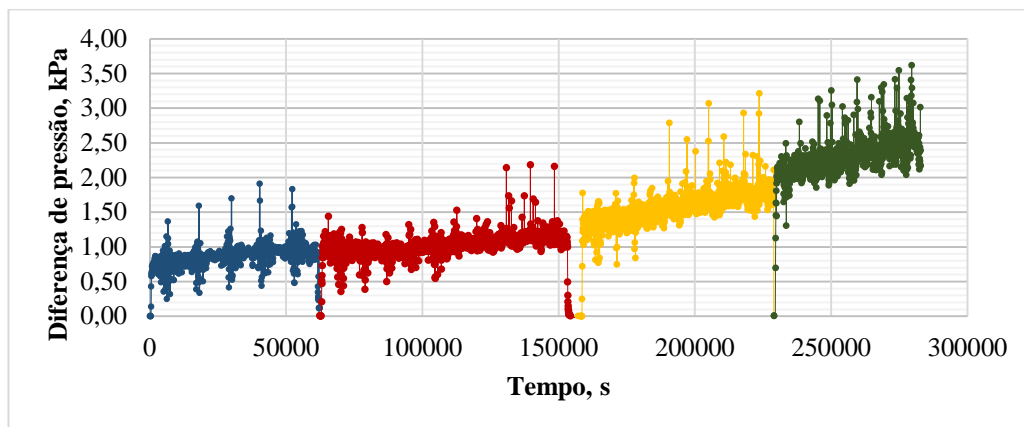


Figura 3.11. Gráfico referente à etapa de fluxo.

DADOS FLUXO				
Velocidade da Prensa (mm/min)	H inicial (mm)	H final (mm)	ΔP (kPa)	Seleção
0,025	67	66	0,884	<input type="checkbox"/>
0,035	66	66	0,984	<input type="checkbox"/>
0,045	66	64	1,571	<input type="checkbox"/>
0,055	64	63	2,314	<input checked="" type="checkbox"/>

DADOS PARA ANÁLISE		
Velocidade de Darcy	m/s	9,16667E-07
ΔP	kPa	2,314

Figura 3.12. Exemplo de planilha utilizada para gerar o gráfico da etapa de fluxo.

A segunda etapa, realizada após o ensaio de adensamento por percolação, consiste em submeter a amostra a um novo processo de carregamento, desta vez causado por um carregamento estático constante e conhecido (σ'_c). Durante o adensamento mede-se a variação da altura da amostra com o tempo, até se alcançar a estabilização do deslocamento, considerado o fim do adensamento. Um exemplo de

planilha utilizada na etapa de carregamento está mostrada na Tabela 3.3. A Figura 3.13 apresenta o gráfico correspondente.

Tabela 3.3. Planilha utilizada na etapa de adensamento.

DATA	HORA	TEMPO (seg)	\sqrt{T}	LEITURA (mm)	DESLOCAMENTO (mm)
08/04/2016	9:03	0	0,0	18,31	0
08/04/2016		7	2,6	20,26	1,95
08/04/2016		15	3,9	20,73	2,42
08/04/2016		30	5,5	21,31	3
08/04/2016		60	7,7	22,24	3,93
08/04/2016		120	11,0	23,58	5,27
08/04/2016		240	15,5	25,45	7,14
08/04/2016		480	21,9	28,03	9,72
08/04/2016		900	30,0	30,78	12,47
08/04/2016		1800	42,4	33,99	15,68
08/04/2016	10:03	3600	60,0	34,28	15,97
08/04/2016	11:03	7200	84,9	34,29	15,98
08/04/2016	12:53	13800	117,5	34,29	15,98
08/04/2016	13:38	16500	128,5	34,29	15,98

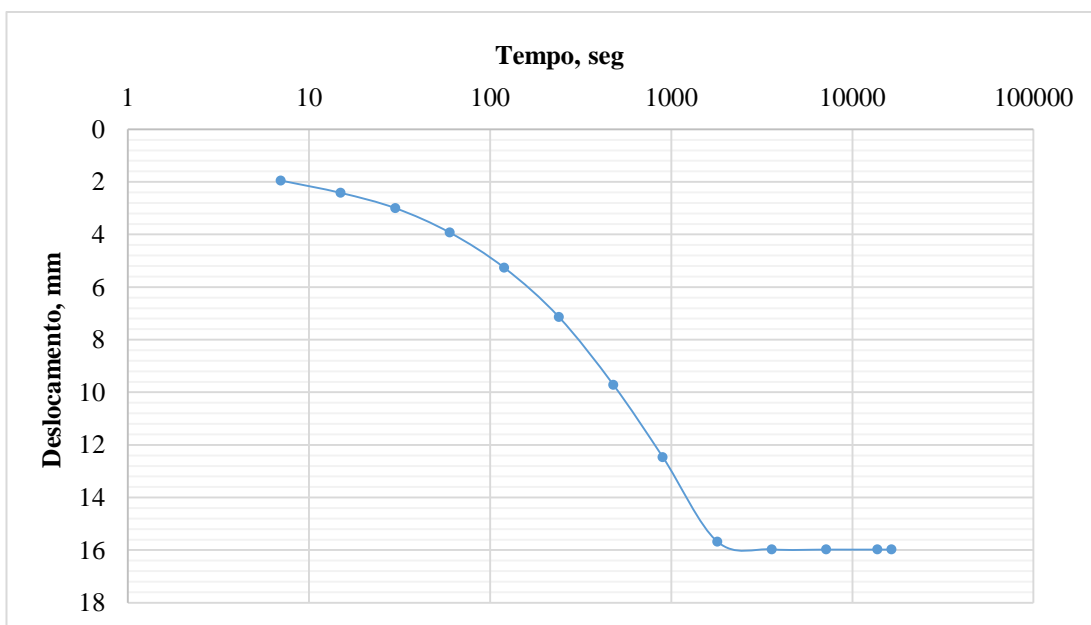


Figura 3.13. Gráfico correspondente à etapa de adensamento.

Medindo-se a altura da amostra antes do carregamento (H_a) e a altura da amostra após o adensamento (H_c), pode-se determinar o índice de vazios da amostra, correspondente à tensão vertical aplicada (σ'_c):

$$e_c = \left(\frac{H_a}{H_c} \right) - 1 \quad (4.5)$$

Na terceira etapa, ainda com o carregamento da etapa anterior aplicado, a amostra é novamente submetida à um fluxo descendente conhecido (V_k), gerando gráficos e tabelas do mesmo formato que os da etapa de fluxo (Figura 3.11 e Figura 3.12). Entretanto, como após o carregamento a amostra já está bem mais consolidada que no início do ensaio, as forças de percolação geram deslocamentos imperceptíveis. Por isso é razoável considerar que o índice de vazios da etapa anterior permanece constante. Sendo assim, medindo-se a diferença de pressão gerada entre o topo e a base da amostra (ΔP_k), pode-se calcular o coeficiente de permeabilidade por meio da lei de Darcy-Gersevanov como sendo:

$$k_p = \frac{(v_k H_c \gamma_w)}{\Delta P_k} \quad (4.6)$$

Com essa nova etapa determina-se um ponto da curva de permeabilidade do rejeito (e_c, k_p).

No presente trabalho, para cumprimento dos objetivos, foram realizados, em ambos os tipos de rejeito, os cálculos para mais de uma velocidade de fluxo. Isso foi feito para verificar se os parâmetros que representam comportamento da lama são semelhantes, independente de qual fluxo esteja sendo aplicado.

A partir da equação (4.1) pode-se escrever:

$$e_{00} = A(Z)^B \quad (4.7)$$

Da etapa de carregamento constante, determinou-se um ponto da curva de compressibilidade (e_c, σ'_{vc}), logo.

$$e_c = A(\sigma'_{vc} + Z)^B \quad (4.8)$$

Substituindo a Equação (4.6) na última equação:

$$Z = \frac{\sigma'_{vc}}{(e_c/e_{00})^{1/B} - 1} \quad (4.9)$$

Da etapa de percolação com fluxo constante, pode-se escrever, a partir da equação (4.2):

$$C = \frac{K_p}{(e_c)^D} \quad (4.10)$$

Para resolver esse problema sem o auxílio de programação, foi elaborada uma planilha onde a partir dos dados obtidos em laboratório, é possível obter os parâmetros. O procedimento para tal é explicado à seguir.

A equação que governa o adensamento com deformações finitas, foi apresentada pelas equações (3.9), (3.10) e (3.11). Uma vez que essa equação é escrita no sistema de coordenadas reduzido, com z no sentido da gravidade, pode-se dizer que o índice de vazios não varia com o tempo ($\partial e / \partial t = 0$). Desse modo temos uma igualdade que descreve o fluxo permanente de água através de uma camada de solo mole e, sendo $G_s = \gamma_s / \gamma_w$, podemos escrevê-la da seguinte forma:

$$(G_s - 1) \left[\frac{d}{de} \left(\frac{k}{1+e} \right) \frac{de}{dz} \right] - \frac{d}{dz} \left[\frac{k}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma'_v}{de} \frac{de}{dz} \right] = 0 \quad (4.11)$$

Sua solução dá a distribuição do índice de vazios, a partir da qual pode-se determinar a tensão efetiva e a altura da amostra. A integração da equação acima resulta em:

$$v = \frac{k}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma'_v(z)}{dz} - \frac{k}{1+e} (G_s - 1) \quad (4.12)$$

Integrando de $z = 0$ até $z = H_s$ a equação (4.12), com z orientado de acordo com a gravidade, tem-se:

$$\sigma'_{b\ teor} = \gamma_w(G_s - 1)H_s + \int_0^{H_s} \frac{v\gamma_w}{k} (1+e) \cdot dz \quad (4.13)$$

A partir da equação (4.13) fica claro que ambas as relações constitutivas, de compressibilidade e permeabilidade, influenciam a distribuição de índice de vazios no estado permanente.

Além disso, a altura final da amostra decorrente da ação do peso próprio é calculado por:

$$H_{teor} = \int_0^{H_s} (1 + e) dz \quad (4.14)$$

Feito isso, para encontrar o valor da tensão efetiva na base da amostra pela equação (4.13), precisa-se do índice de vazios (e), além do coeficiente de permeabilidade (k). Estes valores são obtidos através das equações (4.1) e (4.2), respectivamente.

Desta forma, só os parâmetros B e D são independentes e são obtidos através de um processo de otimização que minimiza as diferenças entre os resultados de σ'_{bA} e H_a obtidos em laboratório e σ'_{bTeor} e H_{Teor} obtidos analiticamente (Liu,1990; Liu e Znidarcic, 1991).

Inicialmente, após dividir a altura da amostra em seguimentos, arbitram-se valores para B e D , e em seguida, assume-se uma distribuição uniforme de índice de vazios, com o valor igual ao índice de vazios e_{00} . A partir daí resolve-se a equação (4.13) para obter a distribuição de tensão efetiva, além da altura H_{Teor} , pela equação (4.14). Com este valor, recalcula-se a distribuição de índice de vazios, e repete-se esse processo até que os valores de σ'_{bTeor} e H_{Teor} sejam os mesmos da iteração anterior.

Com os valores obtidos experimentalmente, σ'_{bA} e H_a , verifica-se o erro através da equação abaixo:

$$Erro (B, D) = \left| 1 - \frac{\sigma'_{bA}}{\sigma'_{Teor}} \right| + \left| 1 - \frac{H_a}{H_{Teor}} \right| \quad (4.15)$$

Com ajuda do comando SOLVER do EXCEL, é possível minimizar esse erro, para se obter valores dos parâmetros B e D e, após esse processo de otimização, com as equações (4.6), (4.7), (4.9) e (4.10), obtém-se os demais parâmetros (A , Z , e C).

3.4 ADENSAMENTO INCREMENTAL

Esse projeto tem como um dos objetivos específicos verificar os resultados de compressibilidade obtidos com o rejeito grosso no ensaio HCT, uma vez que a literatura associa esse ensaio aos materiais de granulometria fina. Para validação dos resultados obtidos nesse ensaio, foi realizada uma comparação com os resultados do

ensaio de adensamento incremental para o mesmo material. Nesse caso, foi utilizada a norma NBR 12007:90, como base para a realização do ensaio de adensamento uniaxial.

Como o ensaio não foi desenvolvido para lamas, foram necessárias algumas modificações no procedimento da norma.

Primeiramente foi feita a mistura de solo para o volume correspondente ao anel usado para molde do corpo de prova tradicional. Para tal mistura, foi utilizado o teor de sólidos calculado no ensaio de coluna após a sedimentação, para que o índice de vazios seja igual ao obtido no HCT, tornando mais realista a comparação.

Após montada toda a célula, inclusive com o anel como parte do conjunto, a mistura foi depositada em seu interior como mostra a Figura 3.14, e então o ensaio foi realizado como de costume.



Figura 3.14. Célula de adensamento incremental montada com o rejeito.

O teor de umidade inicial pode ser obtido através das massas de solo seco e água utilizadas na mistura. O desmonte pode ser feito normalmente, e o teor de umidade final dessa etapa é obtido através da estufa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS REJEITOS

Os ensaios de caracterização geotécnica foram realizados de acordo com as especificações normativas da ABNT. Para esse estudo foram feitos ensaios de granulometria conjunta, peso específico dos sólidos, além dos limites de liquidez e plasticidade.

Primeiramente são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios de granulometria conjunta para os dois rejeitos estudados, fino (Figura 4.1) e grosso (Figura 4.2), segundo a classificação pela norma ABNT NBR:6502/1995.

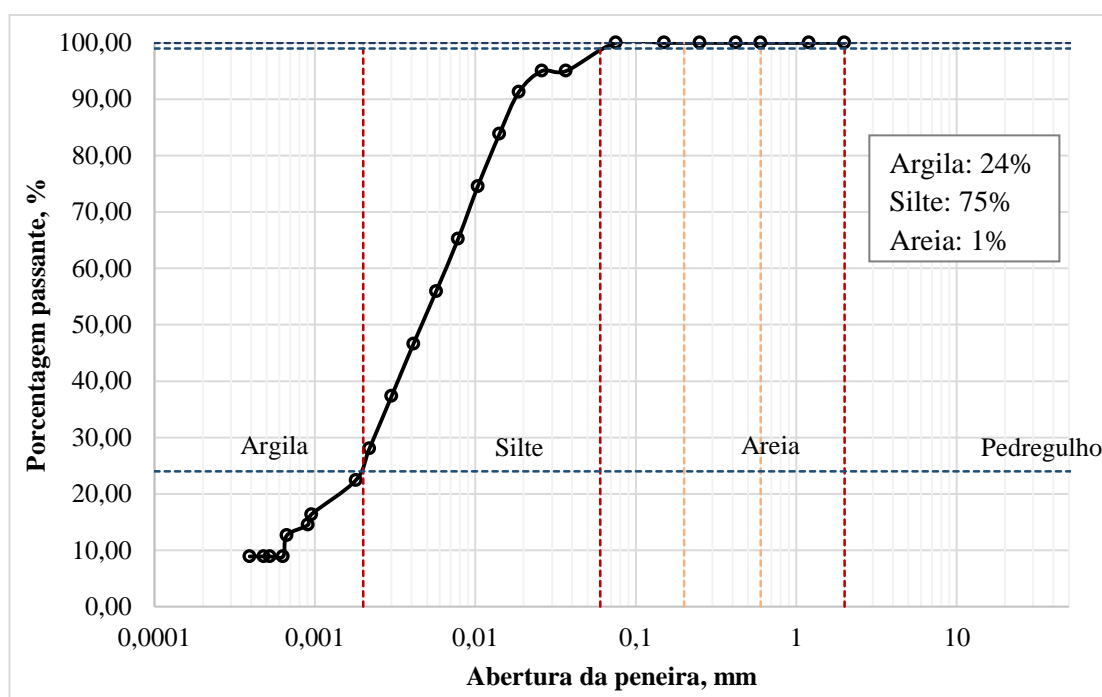


Figura 4.1. Granulometria conjunta do rejeito fino.

de rejeito de mineração de ouro. Apresentam-se também parâmetros obtidos por Silva, 2008, para rejeitos de mineração de ferro, que mais se assemelham ao caso estudado, e valores obtidos por Lima, 2009, para mineração de areia. Sendo que Pereira (2006) e Lima (2009) obtiveram seus valores através do Programa SICTA, com os mesmos limites do programa HCTplus, e Silva (2008) através do próprio HCTplus. Esses dados serão úteis para fins comparativos com os resultados obtidos neste trabalho, apresentados nos próximos subitens.

Tabela 4.2. Parâmetros de compressibilidade e permeabilidade dos rejeitos analisados (Pereira, 2006).

Parâmetros	Pasta	backfill	Flotação inicial	Flotação
A	1,216	1,098	1,005	1,995
B	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05
Z (kN/m²)	0,014	3,124	0,188	0,00036
C (m/s)	1,26E-07	1,82E-06	1,06E-06	2,00E-07
D	2,901	3,553	3,977	1,996

Tabela 4.3. Parâmetros obtidos pelo programa HCTplus (Silva, 2008).

Parâmetros	Itabirito	Hematita	Ferro I	Ferro II
A	2,23	2,65	2,08	4,25
B	-0,168	-0,205	-0,108	-0,167
Z (kN/m²)	0,0351	0,0117	0,0147	0,0460
C (m/s)	8,89E-11	7,91E-12	5,63E-9	1,51E-9
D	3,201	3,755	4,996	4,284

Tabela 4.4. Parâmetros obtidos a partir das análises (Lima, 2009).

Parâmetros	Vertedouro	Espigotamento
A	7,713	7,359
B	-0,226	-0,298
Z (kN/m²)	0,068	0,233
C (m/s)	2,56E-10	7,95E-10
D	2,974	2,77

Para uma análise mais criteriosa desses dados é importante ressaltar a caracterização de cada uma dessas amostras. Segundo Lima, 2009, seus materiais podem ser classificados com argilas siltosas, com apenas 2% de fração areia. Silva, 2008, mostrou que suas amostras de rejeitos de ferro, são siltes argilosos e argilas siltosas, com frações especialmente próximas nos casos do Ferro/Itabirito (36% silte e 36% argila) e Ferro/Hematita (47% silte e 48% argila). Já Pereira, 2006, obteve amostras mais grossas, sendo a Pasta, um silte argiloso, o *Backfill* e a Flotação inicial, são siltes arenosos, e a Flotação são areias siltosas.

4.2.1 Ensaio de adensamento hidráulico – HCT – Rejeito Fino

4.2.1.1 Rejeito fino com TSi = 25%

O rejeito fino foi inicialmente preparado com um teor de sólidos inicial de 25%. Após o ensaio de sedimentação em coluna, foi obtido um teor de sólidos da mistura de 57,69%. Os dados gerados foram trabalhados em planilhas de Excel, cujo procedimento está explicado na metodologia, com a finalidade de se obter os parâmetros A, B e Z da Equação (3.21) e, os parâmetros C e D da Equação (3.25). Os resultados são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Parâmetros obtidos pela planilha.

RF25%	
A	2,749
B	-0,122
Z (kN/m²)	0,460
C (m/s)	7,59E-09
D	3,692

Como dito anteriormente, a planilha realiza o processo iterativo até que os valores calculados sejam aproximadamente iguais aos valores obtidos empiricamente. Nesse caso foram necessárias 07 iterações para encontrar a convergência. A Tabela 5.6 mostra esses valores e o erro calculado para o processo.

Sendo o erro tão pequeno, é possível considera-lo aceitável e com estes parâmetros foram gerados os gráficos apresentados nas Figuras 5.3 e 5.4.

Tabela 4.6. Cálculo do erro (B, D) para rejeito RF25%.

RF25%	
$\sigma'_{b\text{teor}}$ (kPa)	2,854577
H_{teor} (m)	0,06317
σ'_{bA} (kPa)	2,854577
H_a (m)	0,06317
erro(B, D) (%)	0,001443

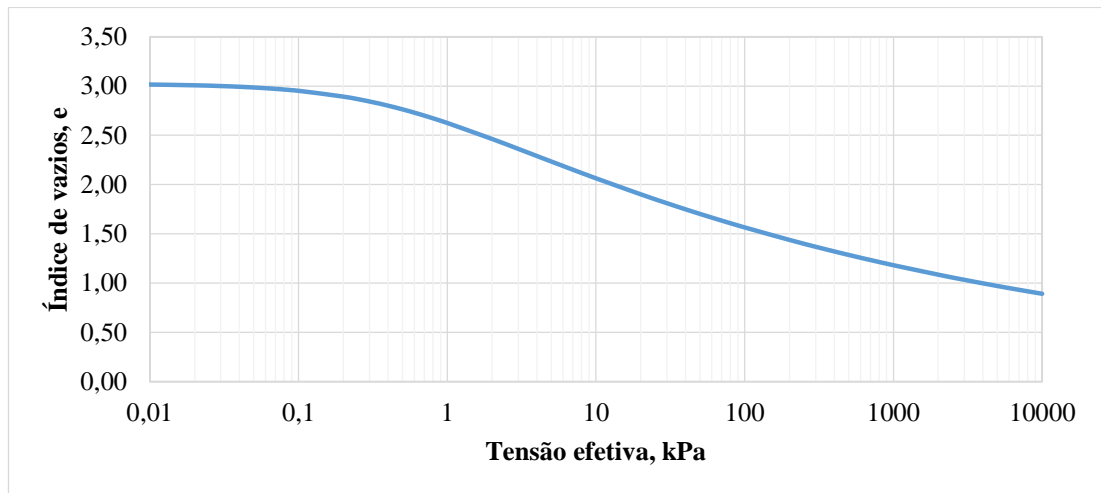


Figura 4.3. Curva de Compressibilidade do RF25%.

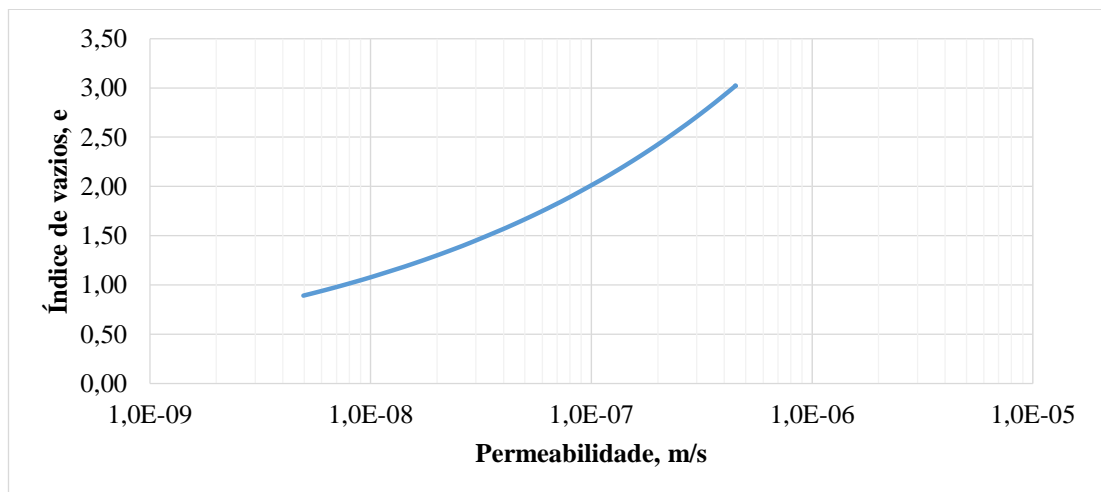


Figura 4.4. Curva de Permeabilidade do RF25%.

4.2.1.2 Rejeito fino com TSi = 10%

Após a realização do ensaio HCT para o rejeito fino de 25% de teor de sólidos inicial, decidiu-se fazer, com intuito de comparação, um teor de sólidos muito menor, dentro da faixa usual das empresas mineradoras. Optou-se então por 10%.

Nesse caso, o valor do teor de sólidos da mistura após o ensaio de sedimentação foi de 52,79%. Os parâmetros encontrados pela mesma metodologia do RF25%, estão apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Parâmetros obtidos pela planilha.

RF10%	
A	7,535
B	-0,345
Z (kN/m²)	7,940
C (m/s)	2,12e-10
D	2,042

Para o rejeito com 10% de teor de sólidos inicial, foram necessárias 07 iterações, e a Tabela 4.8 mostra os valores necessários para fazer essa verificação.

Tabela 4.8. Cálculo do erro (B, D) para o RF10%.

RF10%	
σ'_{bteor} (kPa)	5,3769
H_{teor} (m)	0,0730
σ'_{bA} (kPa)	5,3769
H_a (m)	0,0730
erro(B, D) (%)	0,0036

Os gráficos obtidos com estes parâmetros se encontram nas Figuras 5.5 e 5.6.

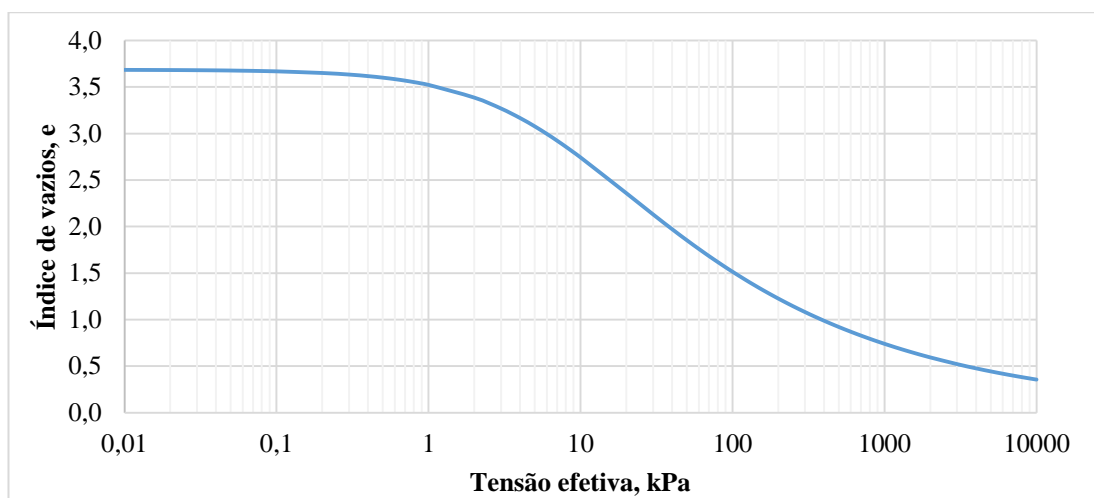


Figura 4.5. Curva de compressibilidade do RF10%.

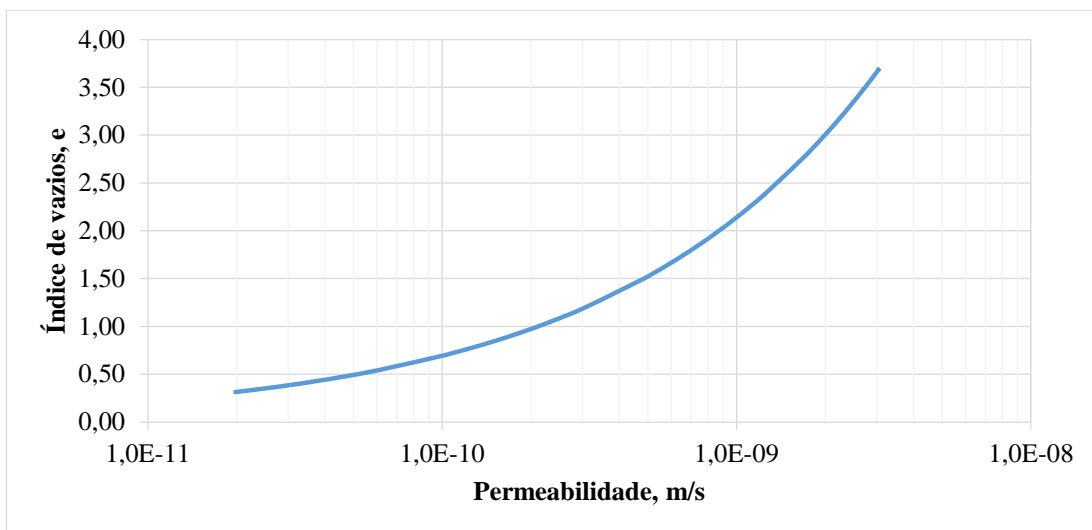


Figura 4.6. Curva de permeabilidade do RF10%.

4.2.1.3 Rejeito fino com TSi = 30%

Tendo em vista que já se ensaiou o valor usual de teor de sólidos, de 25%, e um valor abaixo do usual na prática, 10%, decidiu-se então realizar a análise de um valor acima do médio, porém dentro dos valores empregados na prática. A proporção escolhida foi 30%, por ser uma quantia muito alta, levando em consideração os processos de beneficiamento utilizados nos dias de hoje. O teor de sólidos da mistura após a sedimentação foi de 60,09%.

A Tabela 4.9 mostra os parâmetros obtidos pela planilha, depois de 7 iterações.

Tabela 4.9. Parâmetros obtidos pela planilha.

RF30%	
A	39,051
B	-0,671
Z (kN/m²)	52,618
C (m/s)	4,23E-11
D	3,540

Após utilizar o comando Solver do Excel, para minimizar o erro, o menor valor encontrado para erro (B, D) foi de 6,37%, um pouco maior que o valor desejável. Porém, ao analisar os valores da Tabela 4.10, percebe-se que a parcela

dominante do erro corresponde à altura final (H_a). Esse valor, durante o ensaio é obtido visualmente na régua presa ao cilindro da amostra, portanto sujeito à erros. Devido à isso, esse valor de erro foi considerado aceitável. Os gráficos gerados a partir dos parâmetros se encontram nas Figuras 5.7 e 5.8.

Tabela 4.10. Cálculo do erro (B, D) para o RF30%.

RF30%	
$\sigma'_{b\text{teor}}$ (kPa)	9,2517
H_{teor} (m)	0,0808
σ'_{bA} (kPa)	9,2505
H_a (m)	0,0859
erro(B, D) (%)	6,371

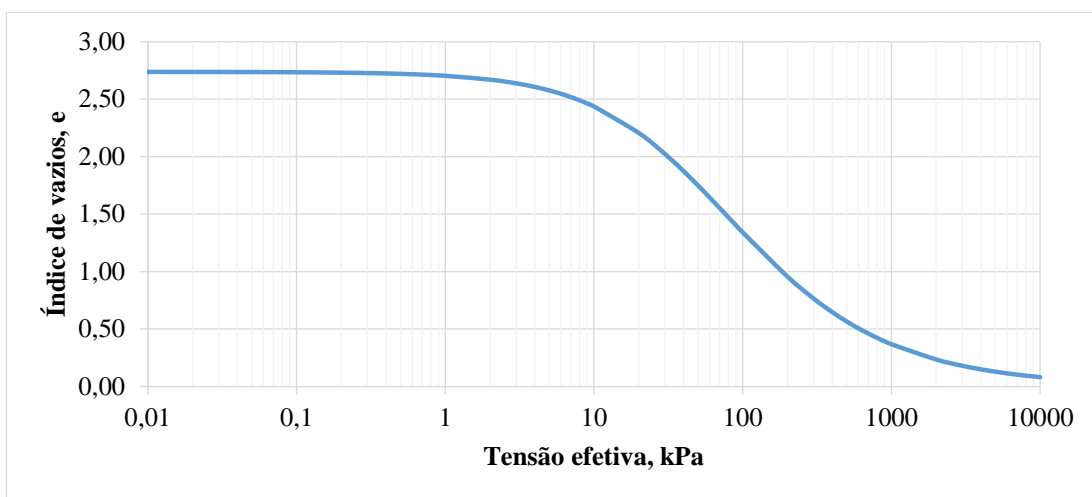


Figura 4.7. Curva de compressibilidade do RF30%.

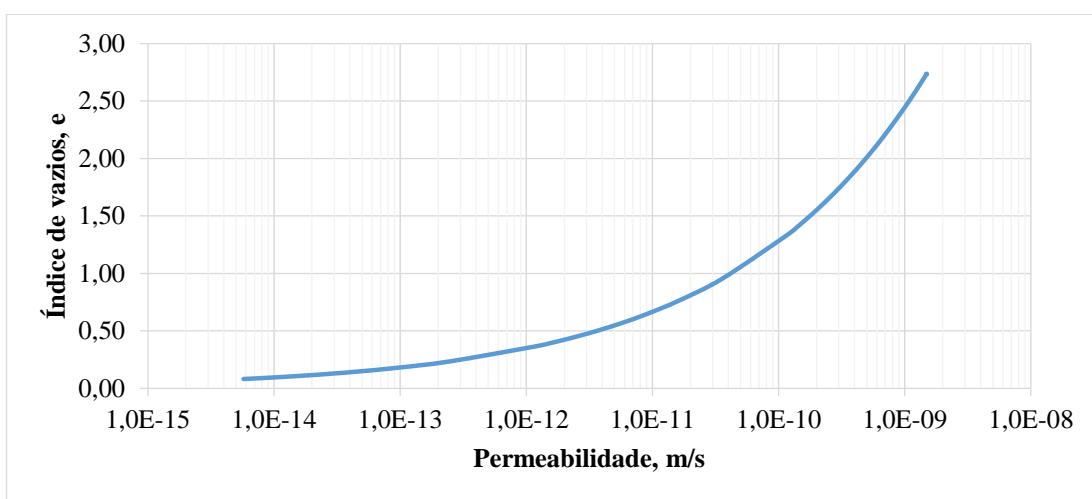


Figura 4.8. Curva de Permeabilidade do RF30%.

4.2.1.4 Comparativo entre as amostras de Rejeito Fino

Com os resultados encontrados para cada um dos diferentes teores de sólidos, é possível montar um gráfico em que se pode comparar as diferentes curvas obtidas.

As curvas de compressibilidade estão apresentadas na Figura 4.9, e nesse gráfico é possível observar a diferença no comportamento de cada uma delas.

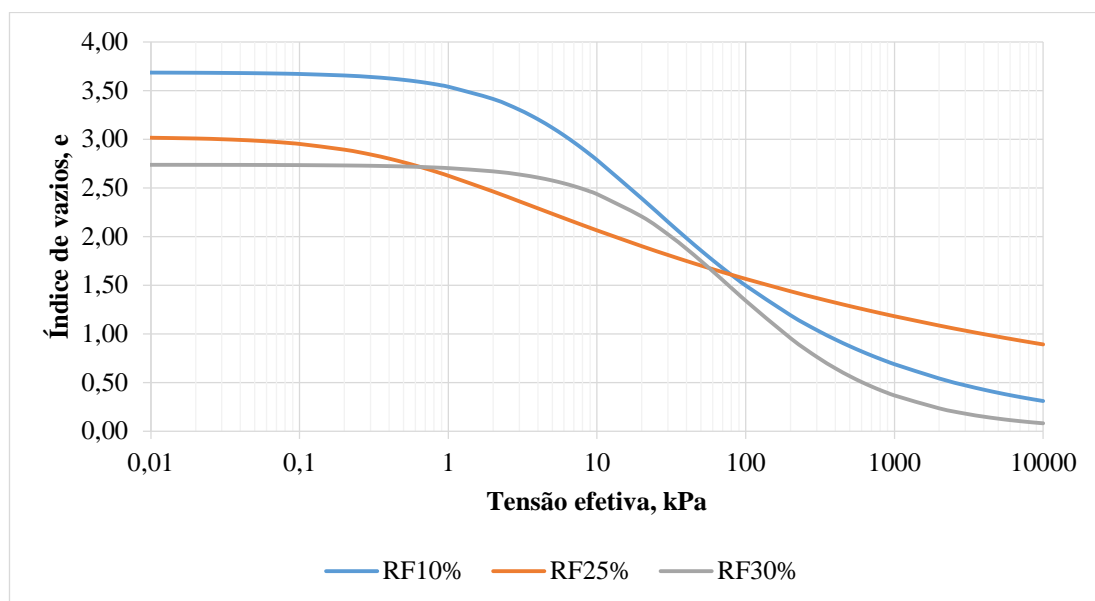


Figura 4.9. Curvas de compressibilidade.

A Tabela 4.11, apresenta alguns dados obtidos das curvas de compressibilidade. Observa-se que o rejeito fino é muito compressível. Além disso, o comportamento parecido entre as amostras pode ser explicado pelo fato de que no momento em que se inicia o ensaio HCT, o teor de sólidos em que a amostra se encontra é o teor de sólidos da mistura (T_Sm), esses valores estão apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.11. Comparativo entre os teores de sólidos iniciais do rejeito fino.

	RF10%	RF25%	RF30%
e inicial	3,686	3,023	2,730
e final	0,310	0,891	0,081
Variação	91,50%	70,50%	97%

Tabela 4.12. Teores de sólidos das respectivas misturas.

Amostra	TSm
RF10%	52,80%
RF25%	57,69%
RF30%	60,09%

Quando se analisam as curvas de permeabilidade, Figura 4.10, todas apresentam valores característicos de solos finos, ou seja, permeabilidades muito baixas, mas sem uma correlação direta com o teor de sólidos.

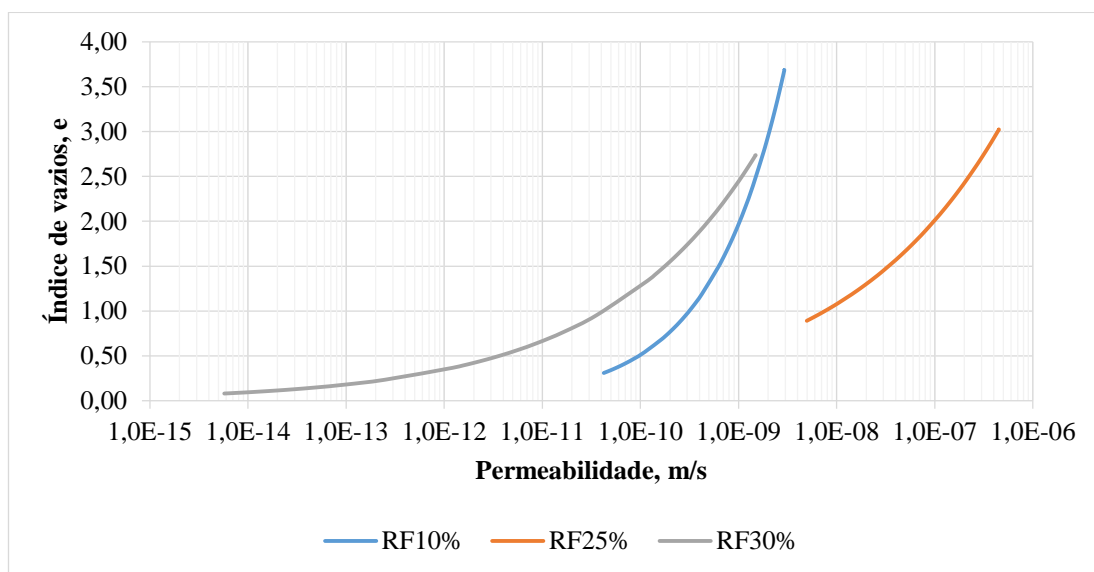


Figura 4.10. Curvas de permeabilidade.

4.2.2 Ensaio de adensamento hidráulico – HCT – Rejeito Grosso

4.2.2.1 Rejeito grosso com TSi = 35%

A proposta do rejeito grosso também foi começar a série de ensaios com um teor de sólidos igual a 35%, usual na atividade mineradora. O procedimento foi o mesmo realizado para o rejeito fino, e o teor de sólidos da mistura encontrado após o ensaio de sedimentação foi de 73,70%.

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.13, e em anexo podem ser encontrados os dados obtidos na planilha Excel, desenvolvida nesta dissertação.

Tabela 4.13. Parâmetros obtidos pela planilha.

RG35%	
A	1,104
B	-0,019
Z (kN/m²)	4,787
C (m/s)	8,56E-6
D	31,616

Para o rejeito grosso com 35% de teor de sólidos inicial, foram necessárias 5 iterações, e a Tabela 4.14 mostra os valores necessários para cálculo do erro (B, D).

Tabela 4.14. Cálculo do erro (B, D) para o RG35%.

RG35%	
$\sigma'_{b\text{teor}}$ (kPa)	1,0972
H_{teor} (m)	0,0850
σ'_{bA} (kPa)	1,0972
H_a (m)	0,0850
erro(B, D) (%)	0,00002

Nota-se que os valores de alguns parâmetros se mostraram bem diferentes dos encontrados na literatura. No início desse capítulo foram mostrados alguns resultados de autores que utilizaram *softwares* com a finalidade de se encontrar B e D. No entanto, as amostras de Pereira, 2006, semelhantes à deste estudo, granulometria mais grossa, apresentaram os parâmetros B igual à -0,05 em todos os casos. Isso pode ser decorrente de não ter havido convergência no procedimento de otimização para se obter os parâmetros B e D uma vez que este valor, -0,05, é o limite superior imposto no programa para o parâmetro B.

A planilha elaborada no Excel não apresenta limitações quanto à valores máximos e mínimos para os parâmetros, apenas mostra a convergência ou não dos valores necessários à resolução do problema. O valor do parâmetro B encontrado neste trabalho (-0,019) é superior ao valor limite encontrado por Pereira, 2006. Como os resultados obtidos geraram um erro de 0,00002%, o resultado é certamente válido e os gráficos resultantes estão apresentados nas Figuras 5.11 e 5.12.

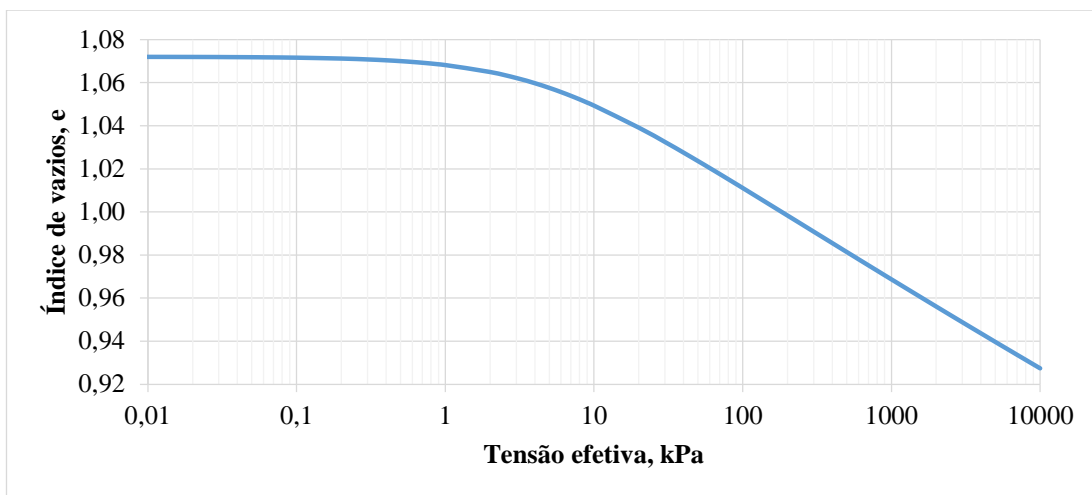


Figura 4.11. Curva de compressibilidade do RG35%.

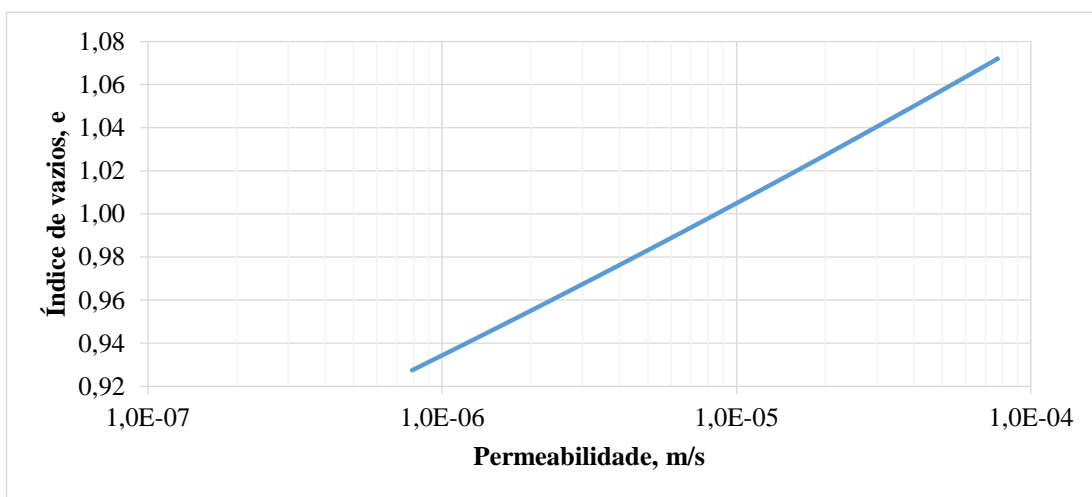


Figura 4.12. Curva de permeabilidade do RG35%.

4.2.3 Comparação com o ensaio de adensamento incremental

Como descrito no item 3.4, foi realizada uma adaptação do ensaio tradicional, e realizado um ensaio com o rejeito grosso nas mesmas condições do ensaio HCT. As curvas de carregamento e descarregamento obtidas são mostradas na Figura 4.13.

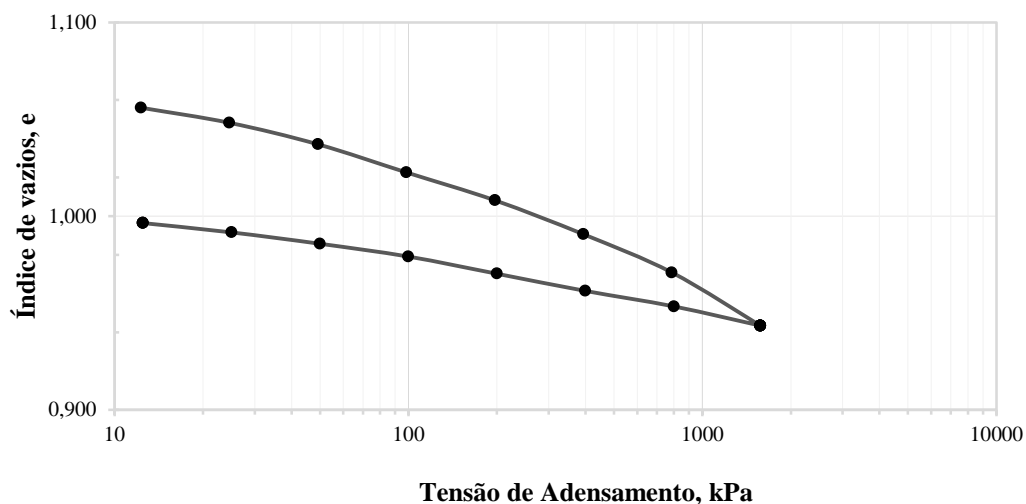


Figura 4.13. Curva de adensamento do RG35%.

Na Figura 4.14 comparam-se a curva de compressão do ensaio de adensamento convencional com a curva de compressibilidade obtida no ensaio HCT.

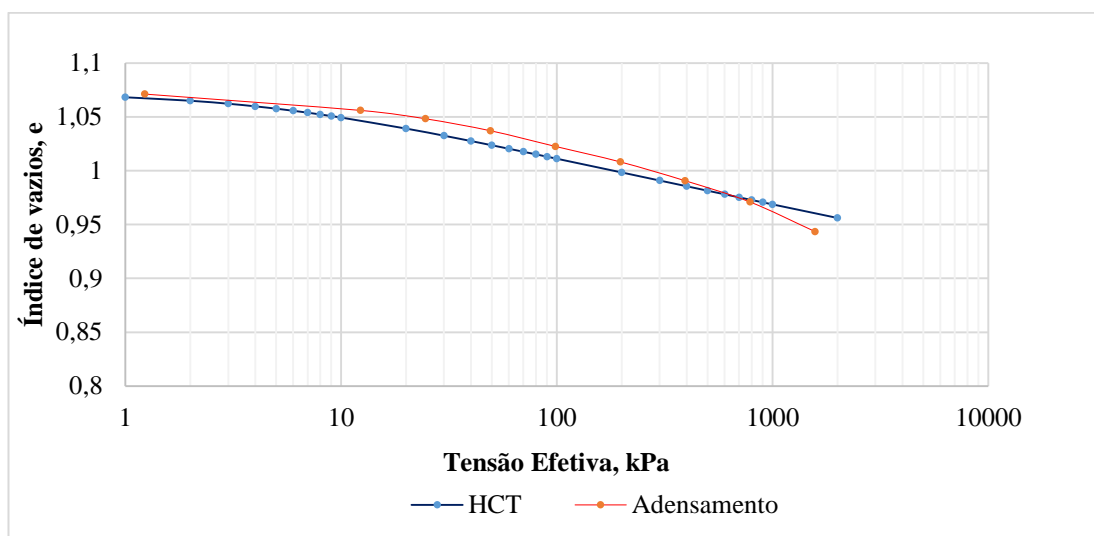


Figura 4.14. Comparação das curvas de compressibilidade de RG35%.

A partir deste gráfico, é possível perceber que as curvas praticamente se sobrepõem. Em um dos pontos de maior discrepância entre índice de vazios, essa diferença é de apenas 1%, como pode ser notado na linha de 20 kPa de tensão efetiva, onde $e_{\text{HCT}} = 1,039$ e $e_{\text{adens}} = 1,05$. Confirma-se assim que o ensaio de adensamento hidráulico é válido para rejeitos mais grossos, desde que não haja

limitação de máximos e mínimos para os parâmetros B e D durante o processo de otimização, conforme foi feito na planilha Excel desenvolvida nesta dissertação.

4.2.4 Influência da variação do fluxo aplicado

Outro objetivo desse trabalho foi verificar como a variação da velocidade aplicada na bomba de fluxo influencia o resultado das curvas de compressibilidade e de permeabilidade do material. Segundo a literatura, qualquer par de pontos de diferença de pressão e fluxo aplicado, seria capaz de resultar em valores relativamente iguais dos parâmetros. Logo, foi realizada uma análise, onde foram feitas várias combinações de velocidades da prensa nas etapas de fluxo e de permeabilidade, para as amostras iniciais dos dois rejeitos estudados, sendo o rejeito fino com 25% de teor de sólidos inicial e o rejeito grosso com 35%.

As velocidades da prensa utilizadas em cada uma das 16 combinações estão explicitadas na Tabela 4.15.

Tabela 4.15. Relação combinação-velocidades.

Etapa de Fluxo (mm/min)	Etapa de Permeabilidade (mm/min)			
	0,005	0,008	0,012	0,02
0,025	C1	C2	C3	C4
0,035	C5	C6	C7	C8
0,045	C9	C10	C11	C12
0,055	C13	C14	C15	C16

Na Tabela 4.16 estão mostrados os parâmetros obtidos variando-se as velocidades de fluxo, e na Tabela 4.17 estão apresentadas as médias dos parâmetros do ensaio HCT obtidos, além do respectivo desvio-padrão de cada. Através destes dados pode-se notar que existe uma variação realmente muito pequena entre os valores encontrados, o que torna possível confirmar que a escolha das velocidades de fluxo usadas no ensaio, não influencia de forma significativa no resultado dos parâmetros.

Tabela 4.16. Parâmetros obtidos para o RF25%.

Comb.	A	B	Z (kN/m²)	C (m/s)	D
C1	2,4586	-0,0962	0,1166	5,27E-09	4,2838
C2	2,4587	-0,0962	0,1167	5,31E-09	4,2748
C3	2,4584	-0,0961	0,1165	5,17E-09	4,3035
C4	2,4603	-0,0963	0,1179	6,41E-09	4,0721
C5	2,4687	-0,0972	0,1244	3,98E-09	4,8357
C6	2,4688	-0,0972	0,1245	4,01E-09	4,8266
C7	2,4685	-0,0972	0,1243	3,90E-09	4,8555
C8	2,4706	-0,0974	0,1259	4,84E-09	4,6225
C9	2,5557	-0,1057	0,2042	5,16E-09	4,3246
C10	2,5558	-0,1057	0,2043	5,20E-09	4,3155
C11	2,5554	-0,1057	0,2039	5,07E-09	4,3445
C12	2,5587	-0,1060	0,2073	6,28E-09	4,1115
C13	2,6609	-0,1156	0,3316	6,47E-09	3,8815
C14	2,6611	-0,1156	0,3319	6,52E-09	3,8725
C15	2,6605	-0,1155	0,3311	6,35E-09	3,9014
C16	2,6800	-0,1160	0,3537	7,69E-09	3,6823

Tabela 4.17. Cálculos estatísticos das combinações do RF25%.

Estatística	A	B	Z (kN/m²)	C (m/s)	D
Média	2,537	-0,104	0,195	5,49E-09	4,281
Desvio padrão	0,084	0,008	0,090	1,09E-09	0,363

Nas Figuras 5.15 e 5.16 foram plotadas as curvas de compressibilidade e permeabilidade para cada combinação. Como mostrado nas Tabelas 5.16 e 5.17, observa-se uma boa concordância entre os resultados, principalmente para as curvas de compressibilidade. Para as curvas de permeabilidade, a variação também é pequena, visto que para o mesmo índice de vazios, a ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade não varia consideravelmente.

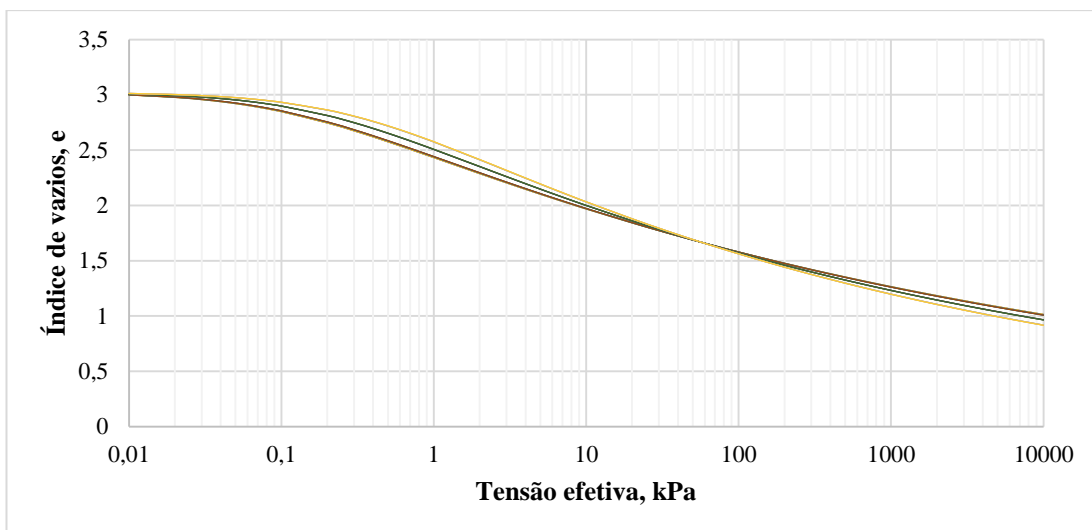


Figura 4.15. Curvas de compressibilidade relativas às combinações do RF25%.

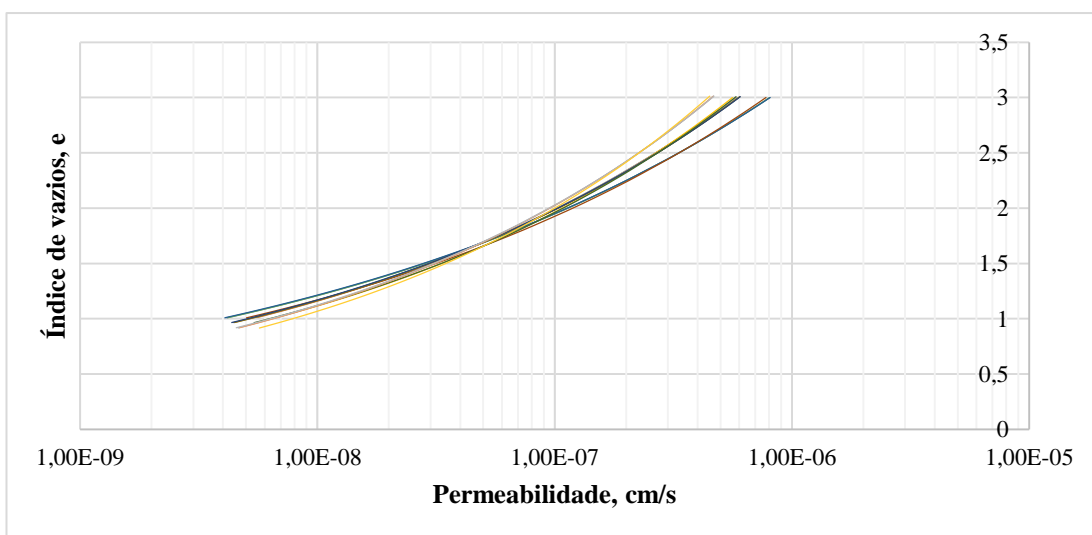


Figura 4.16. Curvas de permeabilidade relativas às combinações do RF25%.

O mesmo processo foi realizado para o rejeito grosso com 35% de teor de sólidos inicial. A Tabela 4.18 mostra as velocidades da prensa utilizadas em cada combinação, já a Tabela 4.19 mostra os parâmetros obtidos, A, B, C, D e Z.

Na Tabela 4.20 é apresentado o desvio padrão obtido para os valores fornecidos pela planilha. Novamente, fica claro que a escolha da velocidade da prensa não interfere de forma significativa no resultado final do ensaio HCT. No entanto, é válido reafirmar que a convergência no processo de otimização é fundamental para que os valores dos parâmetros sejam considerados aceitáveis.

Tabela 4.18. Relação combinação-velocidades.

Etapa de Fluxo (mm/min)	Etapa de Permeabilidade (mm/min)			
	0,4	1,0	1,5	2,0
1,0	C1	C2	C3	C4
1,5	C5	C6	C7	C8
2,0	C9	C10	C11	C12
2,5	C13	C14	C15	C16

Tabela 4.19. Parâmetros obtidos para o RG35%.

Comb.	A	B	Z (kN/m ²)	C (m/s)	D
C1	1,107	-0,020	5,244	9,00E-06	29,213
C2	1,107	-0,019	5,144	5,32E-06	37,006
C3	1,101	-0,018	4,273	5,21E-06	37,446
C4	1,101	-0,018	4,281	4,38E-06	40,017
C5	1,104	-0,019	4,787	8,56E-06	31,616
C6	1,105	-0,019	4,833	5,06E-06	39,423
C7	1,104	-0,019	4,776	4,97E-06	39,698
C8	1,105	-0,019	4,827	4,18E-06	42,258
C9	1,107	-0,020	5,180	9,31E-06	27,602
C10	1,112	-0,020	5,883	5,51E-06	35,329
C11	1,107	-0,020	5,210	5,40E-06	35,712
C12	1,113	-0,021	6,111	4,56E-06	38,127
C13	1,113	-0,021	6,049	9,14E-06	28,461
C14	1,117	-0,022	6,688	5,41E-06	36,231
C15	1,118	-0,022	6,913	5,32E-06	36,461
C16	1,114	-0,021	6,330	4,46E-06	39,140

Tabela 4.20. Cálculos estatísticos das combinações do RG35%.

Estatística	A	B	Z (kN/m ²)	C (m/s)	D
Média	1,108	-0,020	5,408	5,99E-06	35,859
Desvio padrão	0,005	0,001	0,793	1,78E-06	4,266

As curvas de compressibilidade e permeabilidade obtidas através da análise são apresentadas nas Figuras 5.17 e 5.18. O índice de vazios não varia consideravelmente para mesmos valores de tensão, no caso da curva de compressibilidade. Quanto à permeabilidade, é possível notar que há pequena

variação entre as curvas de cada combinação. Os valores mais discrepantes correspondem às combinações C1, C5, C9 e C13. Essas combinações utilizaram o valor de velocidade da prensa de 0,4 mm/min, o que gerou uma diferença de pressão muito pequena, de 0,32 kPa. A partir dessa observação, pode-se dizer que estas curvas que mais se diferem não são representativas no que diz respeito ao comportamento da amostra.

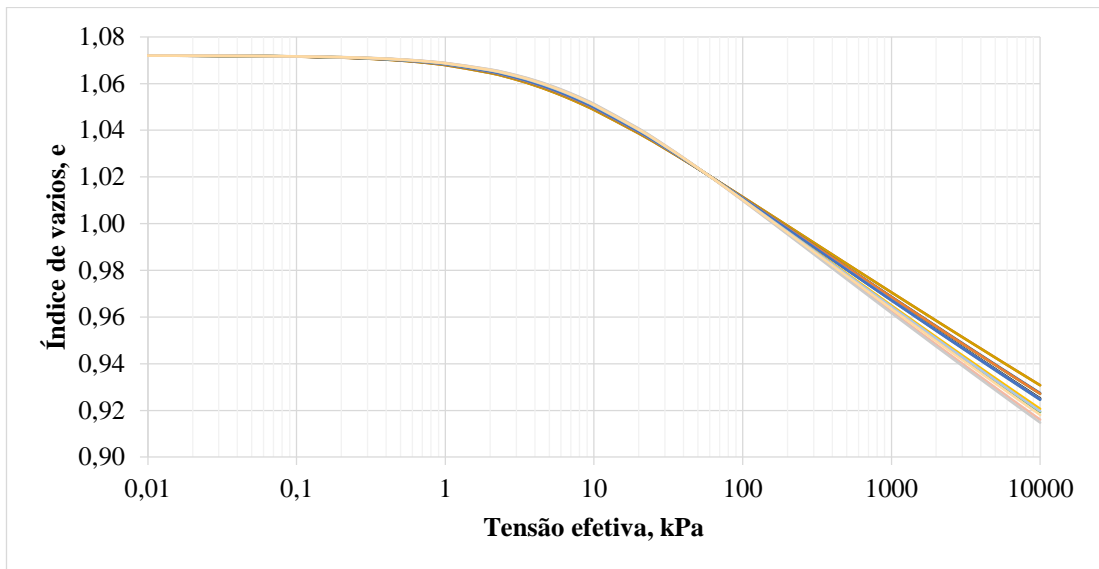


Figura 4.17. Curvas de compressibilidade relativas às combinações do RG35%.

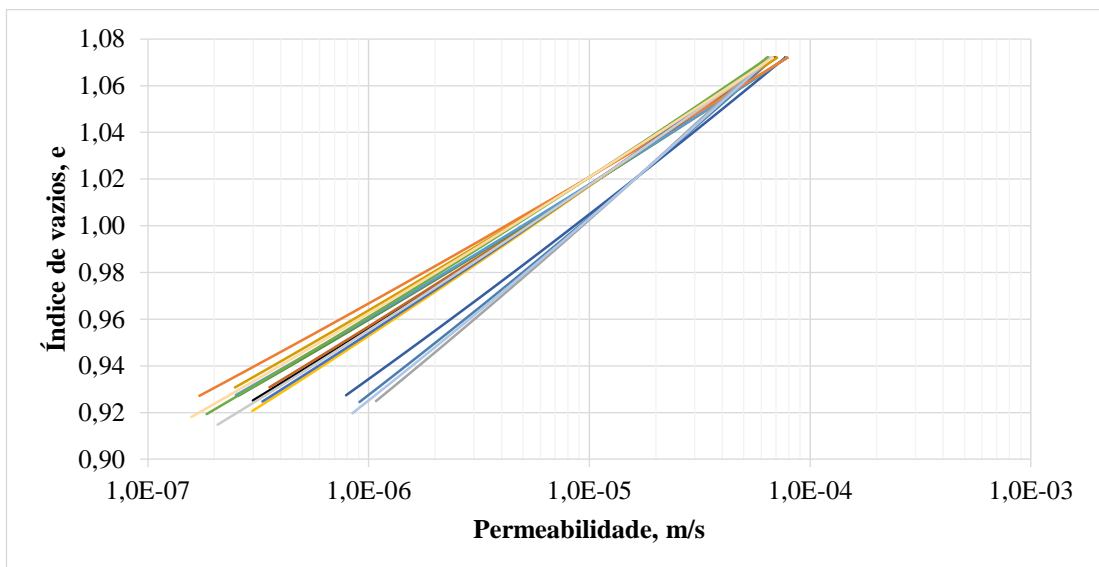


Figura 4.18. Curvas de permeabilidade relativas às combinações do RG35%.

4.2.5 Metodologia e equipamento do ensaio

É possível perceber no momento da realização dos ensaios, que o rejeito grosso necessita de velocidades de fluxo maiores para se obter valores significativos de diferença de pressão. Porém, o equipamento tem como limitação o tamanho da seringa da bomba de fluxo. Quanto maior a velocidade da prensa, maior é o número de vezes que é necessário voltar o pistão para continuação do ensaio. Comparando então as etapas de fluxo ou permeabilidade dos dois rejeitos estudados, nota-se a falta de continuidade no ensaio do rejeito grosso, Figura 5.19. Neste caso, todas as vezes que o gráfico atinge zero, significa que o ensaio foi interrompido para se voltar o pistão e dar prosseguimento ao ensaio.

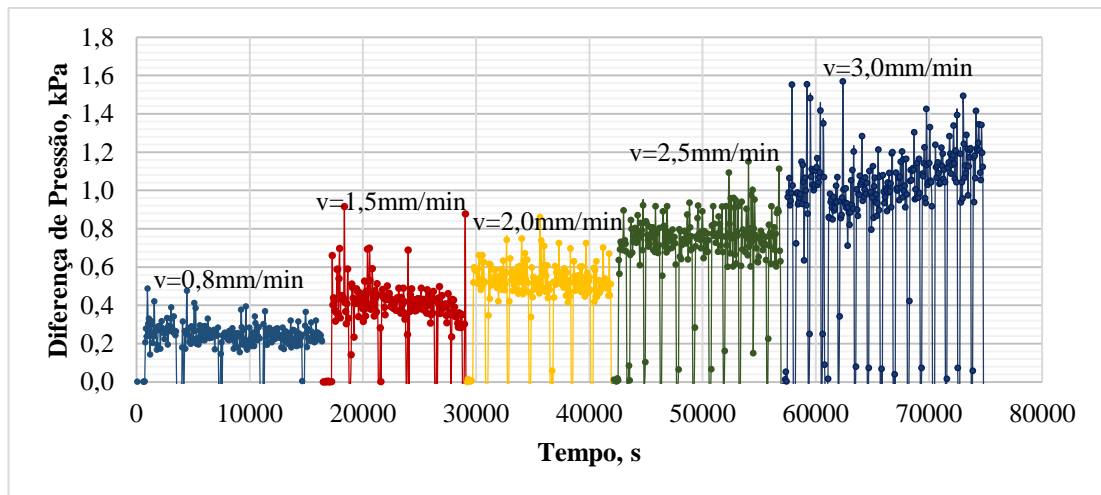


Figura 4.19. Etapa de fluxo de rejeito grosso.

Essa necessidade voltar o pistão não é prejudicial ao resultado final, porém, para praticidade do ensaio, seria interessante desenvolver um pistão com um comprimento maior e/ou um diâmetro maior. Com um diâmetro maior é possível gerar o mesmo fluxo com uma velocidade da prensa muito menor, o que acarretaria em um número menor de procedimentos de se voltar o pistão.

5 CONCLUSÕES

5.1 EM RELAÇÃO AO REJEITO FINO

Quanto às análises realizadas, foi possível notar que para o rejeito fino, a teoria do adensamento por deformações finitas proposta por Gibson et al. (1967), se aplica adequadamente.

A variação do teor de sólidos inicial não influencia a compressibilidade, como foi mostrado para os rejeitos finos com 10%, 25% e 30% de teor de sólidos. As amostras apresentaram diminuições de 91,5%, 70,5% e 97% no índice de vazios, respectivamente, e esse fato pode ser explicado pelos teores de sólidos da mistura, que se mostraram muito próximos. Isso indica que para o mesmo tipo de rejeito, no que diz respeito à características como granulometria e peso específico dos sólidos, com condições adequadas de drenagem, o reservatório não apresenta uma mudança significativa em sua vida útil.

A permeabilidade não apresentou um padrão de comportamento com a à variação do teor de sólidos, mas mostrou resultados condizentes com os normalmente encontrados para rejeitos de granulometria fina. O RF30% que apresentou a maior variação, mostrou uma redução de 5 ordens de grandeza, sendo o maior valor igual à $1,49E-9$ m/s. Na prática esse valor é característico de materiais considerados impermeáveis, logo, não há diferença significativa em seu comportamento.

A influência da escolha da velocidade da bomba de fluxo se mostrou mínima. Após a análise das combinações das etapas de fluxo e permeabilidade para o rejeito fino, foi notado que os parâmetros obtidos não variam significativamente em relação à média obtida. Gráficamente foi possível notar que as curvas praticamente se sobrepõem mostrando a convergência dos resultados gerados, independentemente da velocidade de fluxo escolhida.

5.2 EM RELAÇÃO AO REJEITO GROSSO

O ensaio HCT se mostrou adequado também ao rejeito grosso ensaiado. No entanto, algumas observações são necessárias. O material apresentou uma redução de apenas 13% no índice de vazios, se mostrando pouco compressível, como a pequena variação de altura da amostra é lida visualmente na etapa de fluxo, algum erro pode ocorrer. Tomando os cuidados necessários, e registrando esta altura sempre que possível nas etapas seguintes, feitas com a leitura do extensômetro, esse erro é minimizado.

Os parâmetros das curvas de compressibilidade e permeabilidade, não se mostraram concordantes com os valores usuais obtidos por outros autores, por dois motivos. Os rejeitos grossos ensaiados foram analisados através de *softwares* que impõem limites na busca dos parâmetros por otimização. Essa limitação pode levar à não convergência do processo. No caso da planilha utilizada neste trabalho, não foram colocados limites na busca dos parâmetros ótimos e, desse modo, a convergência do processo foi alcançada.

Ao se comparar os resultados do ensaio HCT com o de carregamento em etapas foi notada uma semelhança muito grande entre os gráficos obtidos. Com uma diferença entre os pontos mais discrepantes de apenas 1%, foi comprovada a validade dos resultados obtidos com o ensaio e o procedimento de otimização desenvolvido.

Assim como na análise feita para o rejeito fino, ao se estudar a influência da escolha das velocidades nas etapas de fluxo e permeabilidade para o RG35%, foi notada uma diferença mínima entre os parâmetros e suas médias. Em se tratando do gráfico das permeabilidades, houve uma pequena defasagem em relação a algumas curvas, que não foi considerada significativa.

5.3 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

Como foi mostrado no capítulo anterior, o equipamento do HCT possui a limitação mecânica de ser necessário voltar o pistão da bomba de fluxo, durante a realização do ensaio para velocidades altas de prensa.

É sugerido então, para uma menor perturbação da amostra, se criar um pistão de com um diâmetro maior de modo que, com a mesma velocidade aplicada na prensa, seja proporcionada uma vazão maior no corpo de prova.

6 BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984

_____ **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

_____ **NBR 6508**: Grãos de Solo que Passam na Peneira de 4,8 mm - Determinação da Massa Específica - Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

_____ **NBR 7181**: Solo - Análise Granulométrica - Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

_____ **NBR 7180**: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

_____ **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____ **NBR 12007**: Solo - Ensaio de Adensamento Unidimensional. Rio de Janeiro, 1990.

_____ **NBR 13028**: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água. Rio de Janeiro, 2006.

_____ **NBR 13029**: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha. Rio de Janeiro, 2006.

ABU-HEJLEH, A. N.; ZNIDARCIC, D. **User manual for computer program SICTA**. Boulder, CO: University of Colorado, 1992. 101 p.

ALVES, M. C. M. **Comportamento de sedimentação de adensamento de uma lama vermelha**. 213 p. Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica. Rio de Janeiro, 1992.

AZEVEDO, R. F., SADO, J. S. Análise Uni-Dimensional do Enchimento de Reservatórios de Barragens de Rejeito através de uma Teoria de Adensamento com Grandes Deformações. In: **IX Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e engenharia de fundações**, Salvador. v. 1. p. 71-78. 1990.

AZEVEDO, R. F., LAQUINI, J. P., SILVA, W. R., AZEVEDO, I. C. D. Análise numérica de ensaios de adensamento induzidos por forças de percolação. In: **XXVI Iberian Latin - American Congress on Computational Methods in Engineering - XXVI CILAMCE**. Ouro Preto. v. CD-ROM. p. 289. 2003.

BARBOSA, T. J. E. **Avaliação de Segurança de Barragens de Rejeitos** – Apostila IETEC. Belo Horizonte, 2016.

BUTTERFIELD, R. A natural compression law for soils (na advance on e-logp'). **Geotechnique**, v. 29, n. 4, p.469-480, 1979.

CAÑABI QUISPE, L. M. **Consolidação de um rejeito de mineração de areia e modelação do enchimento de um reservatório para sua disposição**. 80 f. Dissertação (Mestrado – Área de concentração em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

CANÇADO, N. L. **Desenvolvimento de equipamento para realização de ensaios HCT com o uso da bomba de fluxo**. 96 f. Dissertação (Mestrado – Área de concentração em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.

CARGILL, K. W. Prediction of consolidation of very soft soil. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 110, GT6, p. 775- 795, 1984.

CARRIER III, W. D.; BROMWELL, L. G.; SOMOGYI, F. Design capacity of slurried mineral waste ponds. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 109, n. 5, p. 699-716, 1983.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS – CBDB. **Barragens de Rejeitos no Brasil**. 308 p. Rio de Janeiro, 2012

GIBSON, R. E.; SCHIFFMAN, R. L.; CARGILL, K. W. The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays, II. Finite nonlinear consolidation of a thick homogeneous layers. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 18, n. 2, p. 280-293, 1981.

GIBSON, R. E.; ENGLAND, G. L. & HUSSEY, M. J. – Theory of One Dimensional Consolidation of Saturated Clays, I: Finite Non Linear Consolidation of Thin Homogeneous Layers – **Geotechnique**, 17, p. 261-273, 1967.

HARDIN, B. O. 1-D strain in normally consolidated cohesive soils. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 115, n. 5, p. 689-710, 1989.

JANBU, N. Consolidation of clay layers based on nonlinear stress-strain. In: **European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Wiesbaden. v. 1, p. 19-25. 1963

KOPPULA, S. D.; MORGENSTERN, N. R. On the consolidation of sedimenting clays. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 19, n. 2, p.260-268, 1982.

KYNCH, G. A theory of sedimentation. **Transaction of the Faraday Society**, v. 48, p. 168-176, 1952,

LACERDA, C. M. M.; LUZ, J. A. M.; OLIVEIRA, M. L. M. **Espessamento e filtragem**. 122f. Departamento de Engenharia de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

LIMA, V. A. **Uso das técnicas HCT e TDR no monitoramento de processo de consolidação em reservatórios de barragens de rejeitos**. 145 f. Dissertação (Mestrado – Área de concentração em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009.

LIU, J. C. **Determination of soft soil characteristics**. 297 f. Thesis (Ph.D. – Environmental and Architectural Engineering) – University of Colorado, Boulder, 1990.

LIU, J. C.; ZNIDARCIC, D. Modeling one-dimensional compression characteristics of soils. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, v.117, n.1, p. 162-169, 1991.

MIKASA, M. The consolidation of soft clay. A new theory and its application, **Japanese Society of Civil Engineering**, p.21-26, 1963

MONTE, J. L.; KRISEK, R. J. One-dimensional mathematical model for lager-strain consolidation. **Géotechnique**, v. 26, n. 3, p. 121-140. 1976.

OLSEN, H. W. Darcy's Law Saturated kaolinite. **Water Resources Research**, v. 2, no 2, p. 287-295. 1966.

PEREIRA, B. A. **Adensamento e simulação do processo de enchimento do reservatório de uma barragem para contenção de rejeitos de ouro**. 115 p.

Dissertação (Mestrado – Área de concentração Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2006

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta.** 180 f. Dissertação (Mestrado – Área de concentração Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SCHIFFMAN, R. L. Finite and Infinitesimal Strain Consolidation. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, v.106, no GT2, p. 203-207. 1980

SILVA, J. P. S. **Avaliação da influência do regime de fluxo no comportamento geotécnico de uma barragem de rejeito alteada pelo método de montante.** 162 f. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SILVA, W. S. – **Desenvolvimento de um Edômetro para Ensaio de Adensamento Induzido por Forças de Percolação,** 112 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

SILVA, W. R. **Nova metodologia para determinação de propriedades de sedimentação e adensamento de Rejeitos de Mineração.** 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

SOMOGYI, F. **Analysis and prediction of phosphatic clay consolidation: implementation package.** Technical Report, Florida Phosphatic Clay Research Project. Lakeland, Florida, USA, 1979.

VILLAR, L. F. S. **Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita.** 511 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2002.

ANEXO 1

Planilha de cálculo – RF25%

HCT - Cálculo dos parâmetros																						
Cliente	Carol		Amostra	RF25%																		
Projeto	Dissertação		Célula	-																		
Operador	-		Data	-																		
Dados Iniciais																						
Peso específico da água (kN/m³)	9,8065																					
Peso específico dos sólidos (kN/m³)	40,42																					
Altura de sólidos (m)	0,017648																					
Índice de vazios inicial (e00)	3,023135																					
2ª Etapa - Carregamento			1ª Etapa - Fluxo																			
Altura final (m)	0,04719		Tensão efetiva inicial (kPa)	0																		
Tensão aplicada (kPa)	57,29688		Velocidade (m/s)	9,17E-07																		
			Altura final Ha (m)	0,06317																		
			Diferença de pressão (kPa)	2,31431																		
			3ª Etapa - Permeabilidade																			
			Velocidade (m/s)	3,3E-07																		
			Diferença de pressão (kPa)	3,0038																		
<p>Tensão efetiva na base da amostra calculada por:</p> $\sigma'_{bA} = H_s \cdot (\gamma_s - \gamma_w) + \Delta P_A$ $\sigma'_{bA}(\text{kPa}) = 2,855$			<p>Cálculo tensão efetiva na base teórica:</p> $\sigma'_{bTeor} = \gamma_w (G_s - 1) H_s + \int_0^{H_s} \frac{v \gamma_w}{k} (1 + e) dz$																			
<p>Ponto fixo no gráfico:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>k_p (m/s)</td> <td>5,084E-08</td> </tr> <tr> <td>e_c</td> <td>1,674</td> </tr> </table>			k _p (m/s)	5,084E-08	e _c	1,674	<p>Cálculo do erro:</p> $Err(B,D) = \left 1 - \frac{\sigma'_{bA}}{\sigma'_{bTeor}} \right + \left 1 - \frac{H_A}{H_{Teor}} \right $															
k _p (m/s)	5,084E-08																					
e _c	1,674																					
<p>Valores convergentes:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>σ' bteor (e)</td> <td>2,8546</td> </tr> <tr> <td>H teor</td> <td>0,0632</td> </tr> </table>			σ' bteor (e)	2,8546	H teor	0,0632	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Parâmetros Calculados:</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>2,749</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>-0,122</td> </tr> <tr> <td>Z (kPa)</td> <td>0,460</td> </tr> <tr> <td>C (m/s)</td> <td>7,59E-09</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>3,692</td> </tr> <tr> <td>Erro (%)</td> <td>0,00144</td> </tr> </tbody> </table>		Parâmetros Calculados:		A	2,749	B	-0,122	Z (kPa)	0,460	C (m/s)	7,59E-09	D	3,692	Erro (%)	0,00144
σ' bteor (e)	2,8546																					
H teor	0,0632																					
Parâmetros Calculados:																						
A	2,749																					
B	-0,122																					
Z (kPa)	0,460																					
C (m/s)	7,59E-09																					
D	3,692																					
Erro (%)	0,00144																					
Iteração 01	Ponto	z	(γ _s -γ _w)z	e	k(e)	v.γ _s [(1+e)/k(e)]dz	∫	σ' bteor (e)	H teor													
	0	0,00000	0,0000	3,023	4,51E-07	0	0,000	0,0000	0													
	1	0,00176	0,0540	3,023	4,51E-07	0,141656222	0,142	0,1957	0,0071													
	2	0,00353	0,1081	3,023	4,51E-07	0,141656222	0,283	0,3914	0,0142													
	3	0,00529	0,1621	3,023	4,51E-07	0,141656222	0,425	0,5870	0,0213													
	4	0,00706	0,2161	3,023	4,51E-07	0,141656222	0,567	0,7827	0,0284													
	5	0,00882	0,2701	3,023	4,51E-07	0,141656222	0,708	0,9784	0,0355													
	6	0,01059	0,3242	3,023	4,51E-07	0,141656222	0,850	1,1741	0,0426													
	7	0,01235	0,3782	3,023	4,51E-07	0,141656222	0,992	1,3698	0,0497													
	8	0,01412	0,4322	3,023	4,51E-07	0,141656222	1,133	1,5655	0,0568													
	9	0,01588	0,4862	3,023	4,51E-07	0,141656222	1,275	1,7611	0,0639													
10	0,01765	0,5403	3,023	4,51E-07	0,141656222	1,417	1,9568	0,071														

Iteração 02	Ponto	z	(ys-yw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	∫	σ' teor (e)	H _{teor}
	0	0	0,0000	3,023	4,51E-07	0	0,000	0,0000	0
	1	0,00176	0,0540	2,895	3,84E-07	0,16094332	0,161	0,2150	0,006874
	2	0,00353	0,1081	2,804	3,41E-07	0,176855726	0,338	0,4459	0,013587
	3	0,00529	0,1621	2,734	3,11E-07	0,190597201	0,528	0,6905	0,020176
	4	0,00706	0,2161	2,677	2,88E-07	0,20280125	0,731	0,9473	0,026665
	5	0,00882	0,2701	2,630	2,69E-07	0,213847814	0,945	1,2152	0,033071
	6	0,01059	0,3242	2,589	2,54E-07	0,223985057	1,169	1,4932	0,039405
	7	0,01235	0,3782	2,553	2,42E-07	0,233385172	1,402	1,7806	0,045676
	8	0,01412	0,4322	2,522	2,31E-07	0,242173164	1,645	2,0768	0,051891
	9	0,01588	0,4862	2,494	2,21E-07	0,250443026	1,895	2,3813	0,058057
10	0,01765	0,5403	2,468	2,13E-07	0,258267453	2,153	2,6936	0,064177	

Iteração 03	Ponto	z	(ys-yw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	∫	σ' teor (e)	H _{teor}
	0	0	0,0000	3,023	4,51E-07	0	0,000	0,0000	0
	1	0,00176	0,0540	2,885	3,79E-07	0,162635017	0,163	0,2167	0,006856
	2	0,00353	0,1081	2,783	3,32E-07	0,180866285	0,344	0,4516	0,013531
	3	0,00529	0,1621	2,702	2,98E-07	0,197211034	0,541	0,7028	0,020065
	4	0,00706	0,2161	2,637	2,72E-07	0,212157695	0,753	0,9690	0,026483
	5	0,00882	0,2701	2,581	2,51E-07	0,226014876	0,979	1,2490	0,032803
	6	0,01059	0,3242	2,533	2,35E-07	0,238992238	1,218	1,5420	0,039038
	7	0,01235	0,3782	2,491	2,21E-07	0,25123988	1,469	1,8473	0,045199
	8	0,01412	0,4322	2,453	2,08E-07	0,262869618	1,732	2,1642	0,051294
	9	0,01588	0,4862	2,420	1,98E-07	0,273967382	2,006	2,4922	0,057328
10	0,01765	0,5403	2,389	1,89E-07	0,284600901	2,291	2,8308	0,063309	

Iteração 04	Ponto	z	(ys-yw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	∫	σ' teor (e)	H _{teor}
	0	0	0,0000	3,023	4,51E-07	0	0,000	0,0000	0
	1	0,00176	0,0540	2,884	3,79E-07	0,162781934	0,163	0,2168	0,006854
	2	0,00353	0,1081	2,781	3,31E-07	0,181277121	0,344	0,4521	0,013526
	3	0,00529	0,1621	2,699	2,97E-07	0,197973271	0,542	0,7041	0,020054
	4	0,00706	0,2161	2,632	2,70E-07	0,213337541	0,755	0,9715	0,026463
	5	0,00882	0,2701	2,575	2,49E-07	0,227663514	0,983	1,2532	0,032772
	6	0,01059	0,3242	2,525	2,32E-07	0,241150038	1,224	1,5483	0,038994
	7	0,01235	0,3782	2,482	2,18E-07	0,253939244	1,478	1,8563	0,045139
	8	0,01412	0,4322	2,443	2,05E-07	0,266136935	1,744	2,1765	0,051215
	9	0,01588	0,4862	2,408	1,95E-07	0,277824416	2,022	2,5083	0,05723
10	0,01765	0,5403	2,376	1,85E-07	0,289065784	2,311	2,8514	0,063189	

Iteração 05	Ponto	z	(ys-yw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	∫	σ' teor (e)	H _{teor}
	0	0	0,0000	3,023	4,51E-07	0	0,000	0,0000	0
	1	0,00176	0,0540	2,884	3,79E-07	0,162794683	0,163	0,2168	0,006854
	2	0,00353	0,1081	2,780	3,31E-07	0,18131722	0,344	0,4522	0,013525
	3	0,00529	0,1621	2,699	2,96E-07	0,198054662	0,542	0,7042	0,020053
	4	0,00706	0,2161	2,631	2,70E-07	0,213472906	0,756	0,9717	0,026461
	5	0,00882	0,2701	2,574	2,49E-07	0,227864209	0,984	1,2536	0,032768
	6	0,01059	0,3242	2,524	2,32E-07	0,241426199	1,225	1,5491	0,038988
	7	0,01235	0,3782	2,481	2,17E-07	0,254299928	1,479	1,8574	0,045131
	8	0,01412	0,4322	2,442	2,05E-07	0,266590261	1,746	2,1780	0,051205
	9	0,01588	0,4862	2,407	1,94E-07	0,27837769	2,024	2,5104	0,057217
10	0,01765	0,5403	2,375	1,85E-07	0,289725605	2,314	2,8542	0,063173	

Iteração 06	Ponto	z	(ys-γw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	∫	σ' teor (e)	H teor
	0	0	0,0000	3,023	4,51E-07	0	0,000	0,0000	0
	1	0,00176	0,0540	2,884	3,79E-07	0,162795789	0,163	0,2168	0,006854
	2	0,00353	0,1081	2,780	3,31E-07	0,181321018	0,344	0,4522	0,013525
	3	0,00529	0,1621	2,699	2,96E-07	0,198062936	0,542	0,7043	0,020053
	4	0,00706	0,2161	2,631	2,70E-07	0,213487495	0,756	0,9718	0,026461
	5	0,00882	0,2701	2,574	2,49E-07	0,227886941	0,984	1,2537	0,032768
	6	0,01059	0,3242	2,524	2,32E-07	0,241458851	1,225	1,5492	0,038988
	7	0,01235	0,3782	2,481	2,17E-07	0,25434421	1,479	1,8575	0,04513
	8	0,01412	0,4322	2,442	2,05E-07	0,266647806	1,746	2,1782	0,051204
	9	0,01588	0,4862	2,406	1,94E-07	0,278450053	2,024	2,5107	0,057216
10	0,01765	0,5403	2,374	1,85E-07	0,289814269	2,314	2,8545	0,063171	

Iteração 07	Ponto	z	(ys-γw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	∫	σ' teor (e)	H teor
	0	0	0,0000	3,023	4,51E-07	0	0,000	0,0000	0
	1	0,00176	0,0540	2,884	3,79E-07	0,162795885	0,163	0,2168	0,006854
	2	0,00353	0,1081	2,780	3,31E-07	0,18132137	0,344	0,4522	0,013525
	3	0,00529	0,1621	2,699	2,96E-07	0,198063748	0,542	0,7043	0,020053
	4	0,00706	0,2161	2,631	2,70E-07	0,213488998	0,756	0,9718	0,026461
	5	0,00882	0,2701	2,574	2,49E-07	0,227889382	0,984	1,2537	0,032768
	6	0,01059	0,3242	2,524	2,32E-07	0,241462488	1,225	1,5492	0,038988
	7	0,01235	0,3782	2,481	2,17E-07	0,254349306	1,479	1,8576	0,04513
	8	0,01412	0,4322	2,442	2,05E-07	0,266654626	1,746	2,1782	0,051204
	9	0,01588	0,4862	2,406	1,94E-07	0,278458861	2,024	2,5107	0,057216
10	0,01765	0,5403	2,374	1,85E-07	0,289825326	2,314	2,8546	0,063171	

ANEXO 2

Planilha de cálculo – RF10%

HCT - Cálculo dos parâmetros			
Cliente	Carol	Amostra	RF10%
Projeto	Dissertação	Célula	-
Operador	-	Data	-

Dados Iniciais		1ª Etapa - Fluxo	
Peso específico da água (kN/m³)	9,8065	Tensão efetiva inicial (kPa)	0
Peso específico dos sólidos (kN/m³)	40,42	Velocidade (m/s)	1,67E-08
Altura de sólidos (m)	0,016859	Altura final Ha (m)	0,073
Índice de vazios inicial (e00)	3,686017	Diferença de pressão (kPa)	4,860741

2ª Etapa - Carregamento		3ª Etapa - Permeabilidade	
Altura final (m)	0,0469	Velocidade (m/s)	2,50E-08
Tensão aplicada (kPa)	57,29688	Diferença de pressão (kPa)	16,7011

Tensão efetiva na base da amostra calculada por:

$$\sigma'_{bA} = H_s \cdot (\gamma_s - \gamma_w) + \Delta P_A$$

$$\sigma'_{bA}(\text{kPa}) = 5,3769$$

Cálculo tensão efetiva na base teórica:

$$\sigma'_{bTeor} = \gamma_w (G_s - 1) H_s + \int_0^{H_s} \frac{V\gamma_w}{k} (1 + e) dz$$

Ponto fixo no gráfico:

k _p (m/s)	6,885E-10
e _c	1,782

Valores convergentes:

σ' bteor (e)	5,3769
H _{teor}	0,0730

Cálculo do erro:

$$Err(B,D) = \left| 1 - \frac{\sigma'_{bA}}{\sigma'_{bTeor}} \right| + \left| 1 - \frac{H_A}{H_{Teor}} \right|$$

Parâmetros Calculados:	
A	7,535
B	-0,345
Z (kPa)	7,940
C (m/s)	2,12E-10
D	2,042

Erro (%):	0,0036
------------------	---------------

Iteração 01	Ponto	z	(γ _s -γ _w).z	e	k(e)	v.γ _s [(1+e)/k(e)]dz	∫	σ' bteor (e)	H _{teor}
	0	0,00000	0,0000	3,686	3,04E-09	0	0,000	0,0000	0
	1	0,00169	0,0516	3,686	3,04E-09	0,425860013	0,426	0,4775	0,0079
	2	0,00337	0,1032	3,686	3,04E-09	0,425860013	0,852	0,9549	0,0158
	3	0,00506	0,1548	3,686	3,04E-09	0,425860013	1,278	1,4324	0,0237
	4	0,00674	0,2064	3,686	3,04E-09	0,425860013	1,703	1,9099	0,031601
	5	0,00843	0,2581	3,686	3,04E-09	0,425860013	2,129	2,3874	0,039501
	6	0,01012	0,3097	3,686	3,04E-09	0,425860013	2,555	2,8648	0,047401
	7	0,01180	0,3613	3,686	3,04E-09	0,425860013	2,981	3,3423	0,055301
	8	0,01349	0,4129	3,686	3,04E-09	0,425860013	3,407	3,8198	0,063201
9	0,01517	0,4645	3,686	3,04E-09	0,425860013	3,833	4,2972	0,071101	
10	0,01686	0,5161	3,686	3,04E-09	0,425860013	4,259	4,7747	0,079002	

Iteração 02	Ponto	z	(ys-yw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	∫	σ' bteor (e)	H _{teor}
	0	0	0,0000	3,686	3,04E-09	0	0,000	0,0000	0
	1	0,00169	0,0516	3,612	2,92E-09	0,436790127	0,437	0,4884	0,007776
	2	0,00337	0,1032	3,544	2,80E-09	0,447402997	0,884	0,9874	0,015437
	3	0,00506	0,1548	3,481	2,70E-09	0,457724991	1,342	1,4968	0,022992
	4	0,00674	0,2064	3,422	2,61E-09	0,467779053	1,810	2,0161	0,030447
	5	0,00843	0,2581	3,366	2,52E-09	0,477585297	2,287	2,5453	0,037808
	6	0,01012	0,3097	3,314	2,45E-09	0,487161462	2,774	3,0841	0,045081
	7	0,01180	0,3613	3,265	2,37E-09	0,496523292	3,271	3,6322	0,052272
	8	0,01349	0,4129	3,219	2,30E-09	0,50568483	3,777	4,1895	0,059384
	9	0,01517	0,4645	3,175	2,24E-09	0,514658666	4,291	4,7558	0,066422
10	0,01686	0,5161	3,133	2,18E-09	0,523456136	4,815	5,3309	0,073391	

Iteração 03	Ponto	z	(ys-yw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	∫	σ' bteor (e)	H _{teor}
	0	0	0,0000	3,686	3,04E-09	0	0,000	0,0000	0
	1	0,00169	0,0516	3,611	2,91E-09	0,437036514	0,437	0,4886	0,007773
	2	0,00337	0,1032	3,540	2,80E-09	0,448113945	0,885	0,9884	0,015427
	3	0,00506	0,1548	3,473	2,69E-09	0,459094899	1,344	1,4991	0,022968
	4	0,00674	0,2064	3,409	2,59E-09	0,469982127	1,814	2,0207	0,030401
	5	0,00843	0,2581	3,349	2,50E-09	0,48077845	2,295	2,5531	0,037733
	6	0,01012	0,3097	3,291	2,41E-09	0,491486713	2,786	3,0962	0,044967
	7	0,01180	0,3613	3,237	2,33E-09	0,502109737	3,289	3,6499	0,05211
	8	0,01349	0,4129	3,185	2,25E-09	0,5126503	3,801	4,2141	0,059165
	9	0,01517	0,4645	3,135	2,18E-09	0,52311111	4,324	4,7889	0,066136
10	0,01686	0,5161	3,087	2,12E-09	0,533494798	4,858	5,3740	0,073026	

Iteração 04	Ponto	z	(ys-yw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	∫	σ' bteor (e)	H _{teor}
	0	0	0,0000	3,686	3,04E-09	0	0,000	0,0000	0
	1	0,00169	0,0516	3,611	2,91E-09	0,437042066	0,437	0,4887	0,007773
	2	0,00337	0,1032	3,540	2,80E-09	0,448134884	0,885	0,9884	0,015427
	3	0,00506	0,1548	3,472	2,69E-09	0,459144361	1,344	1,4992	0,022967
	4	0,00674	0,2064	3,409	2,59E-09	0,470075786	1,814	2,0208	0,030399
	5	0,00843	0,2581	3,348	2,50E-09	0,480933923	2,295	2,5534	0,03773
	6	0,01012	0,3097	3,290	2,41E-09	0,491723085	2,787	3,0967	0,044962
	7	0,01180	0,3613	3,235	2,33E-09	0,502447199	3,290	3,6508	0,052102
	8	0,01349	0,4129	3,182	2,25E-09	0,513109847	3,803	4,2155	0,059153
	9	0,01517	0,4645	3,132	2,18E-09	0,523714313	4,326	4,7908	0,066119
10	0,01686	0,5161	3,084	2,11E-09	0,534263615	4,861	5,3767	0,073004	

Iteração 05	Ponto	z	(ys-yw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	∫	σ' bteor (e)	H _{teor}
	0	0	0,0000	3,686	3,04E-09	0	0,000	0,0000	0
	1	0,00169	0,0516	3,611	2,91E-09	0,437042191	0,437	0,4887	0,007773
	2	0,00337	0,1032	3,540	2,80E-09	0,448135463	0,885	0,9884	0,015427
	3	0,00506	0,1548	3,472	2,69E-09	0,459145976	1,344	1,4992	0,022967
	4	0,00674	0,2064	3,409	2,59E-09	0,470079292	1,814	2,0208	0,030399
	5	0,00843	0,2581	3,348	2,50E-09	0,480940465	2,295	2,5534	0,037729
	6	0,01012	0,3097	3,290	2,41E-09	0,491734097	2,787	3,0967	0,044962
	7	0,01180	0,3613	3,235	2,33E-09	0,502464394	3,290	3,6508	0,052102
	8	0,01349	0,4129	3,182	2,25E-09	0,51313521	3,803	4,2156	0,059152
	9	0,01517	0,4645	3,132	2,18E-09	0,523750087	4,326	4,7909	0,066118
10	0,01686	0,5161	3,084	2,11E-09	0,534312288	4,861	5,3769	0,073003	

Iteração 06	Ponto	z	(ys-yw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	∫	σ'_{bleor}(e)	H_{teor}
	0	0	0,0000	3,686	3,04E-09	0	0,000	0,0000	0
	1	0,00169	0,0516	3,611	2,91E-09	0,437042194	0,437	0,4887	0,007773
	2	0,00337	0,1032	3,540	2,80E-09	0,448135478	0,885	0,9884	0,015427
	3	0,00506	0,1548	3,472	2,69E-09	0,459146025	1,344	1,4992	0,022967
	4	0,00674	0,2064	3,409	2,59E-09	0,470079413	1,814	2,0208	0,030399
	5	0,00843	0,2581	3,348	2,50E-09	0,480940714	2,295	2,5534	0,037729
	6	0,01012	0,3097	3,290	2,41E-09	0,491734555	2,787	3,0967	0,044962
	7	0,01180	0,3613	3,235	2,33E-09	0,50246517	3,290	3,6508	0,052102
	8	0,01349	0,4129	3,182	2,25E-09	0,513136441	3,803	4,2156	0,059152
	9	0,01517	0,4645	3,132	2,18E-09	0,523751942	4,326	4,7909	0,066118
10	0,01686	0,5161	3,084	2,11E-09	0,534314969	4,861	5,3769	0,073003	

Iteração 07	Ponto	z	(ys-yw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	∫	σ'_{bleor}(e)	H_{teor}
	0	0	0,0000	3,686	3,04E-09	0	0,000	0,0000	0
	1	0,00169	0,0516	3,611	2,91E-09	0,437042194	0,437	0,4887	0,007773
	2	0,00337	0,1032	3,540	2,80E-09	0,448135479	0,885	0,9884	0,015427
	3	0,00506	0,1548	3,472	2,69E-09	0,459146026	1,344	1,4992	0,022967
	4	0,00674	0,2064	3,409	2,59E-09	0,470079417	1,814	2,0208	0,030399
	5	0,00843	0,2581	3,348	2,50E-09	0,480940723	2,295	2,5534	0,037729
	6	0,01012	0,3097	3,290	2,41E-09	0,491734573	2,787	3,0967	0,044962
	7	0,01180	0,3613	3,235	2,33E-09	0,502465202	3,290	3,6508	0,052102
	8	0,01349	0,4129	3,182	2,25E-09	0,513136495	3,803	4,2156	0,059152
	9	0,01517	0,4645	3,132	2,18E-09	0,523752029	4,326	4,7909	0,066118
10	0,01686	0,5161	3,084	2,11E-09	0,534315101	4,861	5,3769	0,073003	

ANEXO 3

Planilha de cálculo – RF30%

HCT - Cálculo dos parâmetros			
Cliente	Carol	Amostra	RF30%
Projeto	Dissertação	Célula	-
Operador	-	Data	-

Dados Iniciais		1ª Etapa - Fluxo	
Peso específico da água (kN/m³)	9,8065	Tensão efetiva inicial (kPa)	0
Peso específico dos sólidos (kN/m³)	40,42	Velocidade (m/s)	1,33E-08
Altura de sólidos (m)	0,022476	Altura final Ha (m)	0,085945
Índice de vazios inicial (e00)	2,7373	Diferença de pressão (kPa)	8,5624

2ª Etapa - Carregamento		3ª Etapa - Permeabilidade	
Altura final (m)	0,060015	Velocidade (m/s)	3,33E-09
Tensão aplicada (kPa)	57,29688	Diferença de pressão (kPa)	7,541

Tensão efetiva na base da amostra calculada por:

$$\sigma'_{bA} = H_s \cdot (\gamma_s - \gamma_w) + \Delta P_A$$

$$\sigma'_{bA}(\text{kPa}) = 9,250$$

Cálculo tensão efetiva na base teórica:

$$\sigma'_{bTeor} = \gamma_w (G_s - 1) H_s + \int_0^{H_s} \frac{\gamma_w}{k} (1 + e) dz$$

Ponto fixo no gráfico:

k _p (m/s)	2,599E-10
e _c	1,670

Valores convergentes:

σ' bteor (e)	9,2517
H _{teor}	0,0808

Cálculo do erro:

$$Err(B,D) = \left| 1 - \frac{\sigma'_{bA}}{\sigma'_{bTeor}} \right| + \left| 1 - \frac{H_A}{H_{Teor}} \right|$$

Parâmetros Calculados:

A	39,051
B	-0,671
Z (kPa)	52,618
C (m/s)	4,23E-11
D	3,540

Erro (%): 6,37

Iteração 01	Ponto	z	(γ _s -γ _w).z	e	k(e)	v.γ _s [(1+e)/k(e)]dz	∫	σ' bteor (e)	Hteor
	0	0,00000	0,0000	2,737	1,49E-09	0	0,000	0,0000	0
	1	0,00022	0,0069	2,737	1,49E-09	7,33E-02	0,073	0,0802	0,00084
	2	0,00045	0,0138	2,737	1,49E-09	7,33E-02	0,147	0,1604	0,00168
	3	0,00067	0,0206	2,737	1,49E-09	7,33E-02	0,220	0,2406	0,00252
	4(...)	0,00090	0,0275	2,737	1,49E-09	7,33E-02	0,293	0,3208	0,00336
	95	0,02135	0,6537	2,737	1,49E-09	7,33E-02	6,966	7,6194	0,0798
	96	0,02158	0,6605	2,737	1,49E-09	7,33E-02	7,039	7,6996	0,08064
	97	0,02180	0,6674	2,737	1,49E-09	7,33E-02	7,112	7,7798	0,08148
	98	0,02203	0,6743	2,737	1,49E-09	7,33E-02	7,186	7,8600	0,08232
	99	0,02225	0,6812	2,737	1,49E-09	7,33E-02	7,259	7,9402	0,08316
100	0,02248	0,6881	2,737	1,49E-09	7,33E-02	7,332	8,0204	0,084	

Iteração 02	Ponto	z	(ys-yw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	J	σ'bteor (e)	Hteor
	0	0,00000	0,0000	2,737	1,49E-09	0	0,000	0,0000	0,000000
	1	0,00022	0,0069	2,735	1,49E-09	7,35E-02	0,074	0,0804	0,000839
	2	0,00045	0,0138	2,732	1,48E-09	7,37E-02	0,147	0,1610	0,001678
	3	0,00067	0,0206	2,729	1,48E-09	7,40E-02	0,221	0,2419	0,002516
	4(...)	0,00090	0,0275	2,726	1,47E-09	7,42E-02	0,295	0,3229	0,003354
	95	0,02135	0,6537	2,500	1,08E-09	9,47E-02	7,969	8,6225	0,077144
	96	0,02158	0,6605	2,498	1,08E-09	9,49E-02	8,064	8,7242	0,077930
	97	0,02180	0,6674	2,496	1,08E-09	9,51E-02	8,159	8,8263	0,078716
	98	0,02203	0,6743	2,493	1,07E-09	9,54E-02	8,254	8,9285	0,079501
99	0,02225	0,6812	2,491	1,07E-09	9,56E-02	8,350	9,0310	0,080285	
100	0,02248	0,6881	2,489	1,07E-09	9,59E-02	8,446	9,1338	0,081069	

Iteração 03	Ponto	z	(ys-yw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	J	σ'bteor (e)	Hteor
	0	0,00000	0,0000	2,737	1,49E-09	0	0,000	0,0000	0,000000
	1	0,00022	0,0069	2,734	1,49E-09	7,35E-02	0,074	0,0804	0,000839
	2	0,00045	0,0138	2,732	1,48E-09	7,37E-02	0,147	0,1610	0,001678
	3	0,00067	0,0206	2,729	1,48E-09	7,40E-02	0,221	0,2419	0,002516
	4(...)	0,00090	0,0275	2,726	1,47E-09	7,42E-02	0,295	0,3229	0,003354
	95	0,02135	0,6537	2,472	1,04E-09	9,77E-02	8,062	8,7157	0,076934
	96	0,02158	0,6605	2,470	1,04E-09	9,80E-02	8,160	8,8206	0,077713
	97	0,02180	0,6674	2,467	1,03E-09	9,83E-02	8,258	8,9257	0,078493
	98	0,02203	0,6743	2,464	1,03E-09	9,86E-02	8,357	9,0312	0,079271
99	0,02225	0,6812	2,461	1,03E-09	9,89E-02	8,456	9,1370	0,080049	
100	0,02248	0,6881	2,459	1,02E-09	9,92E-02	8,555	9,2431	0,080827	

Iteração 04	Ponto	z	(ys-yw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	J	σ'bteor (e)	Hteor
	0	0,00000	0,0000	2,737	1,49E-09	0	0,000	0,0000	0,000000
	1	0,00022	0,0069	2,734	1,49E-09	7,35E-02	0,074	0,0804	0,000839
	2	0,00045	0,0138	2,732	1,48E-09	7,37E-02	0,147	0,1610	0,001678
	3	0,00067	0,0206	2,729	1,48E-09	7,40E-02	0,221	0,2419	0,002516
	4(...)	0,00090	0,0275	2,726	1,47E-09	7,42E-02	0,295	0,3229	0,003354
	95	0,02135	0,6537	2,470	1,04E-09	9,80E-02	8,069	8,7222	0,076919
	96	0,02158	0,6605	2,467	1,03E-09	9,83E-02	8,167	8,8274	0,077699
	97	0,02180	0,6674	2,464	1,03E-09	9,86E-02	8,265	8,9329	0,078477
	98	0,02203	0,6743	2,461	1,03E-09	9,89E-02	8,364	9,0387	0,079255
99	0,02225	0,6812	2,459	1,02E-09	9,92E-02	8,464	9,1448	0,080033	
100	0,02248	0,6881	2,456	1,02E-09	9,96E-02	8,563	9,2512	0,080809	

Iteração 05	Ponto	z	(ys-yw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	J	σ'bteor (e)	Hteor
	0	0,00000	0,0000	2,737	1,49E-09	0	0,000	0,0000	0,000000
	1	0,00022	0,0069	2,734	1,49E-09	7,35E-02	0,074	0,0804	0,000839
	2	0,00045	0,0138	2,732	1,48E-09	7,37E-02	0,147	0,1610	0,001678
	3	0,00067	0,0206	2,729	1,48E-09	7,40E-02	0,221	0,2419	0,002516
	4(...)	0,00090	0,0275	2,726	1,47E-09	7,42E-02	0,295	0,3229	0,003354
	95	0,02135	0,6537	2,470	1,04E-09	9,80E-02	8,069	8,7226	0,076919
	96	0,02158	0,6605	2,467	1,03E-09	9,83E-02	8,167	8,8278	0,077698
	97	0,02180	0,6674	2,464	1,03E-09	9,86E-02	8,266	8,9333	0,078476
	98	0,02203	0,6743	2,461	1,03E-09	9,89E-02	8,365	9,0391	0,079254
99	0,02225	0,6812	2,458	1,02E-09	9,93E-02	8,464	9,1453	0,080032	
100	0,02248	0,6881	2,456	1,02E-09	9,96E-02	8,564	9,2517	0,080808	

Iteração 06	Ponto	z	(ys-yw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	J	σ' bteor (e)	Hteor
	0	0,00000	0,0000	0,0000	2,737	1,49E-09	0	0,000	0,0000
1	0,00022	0,0069	0,0069	2,734	1,49E-09	7,35E-02	0,074	0,0804	0,000839
2	0,00045	0,0138	0,0138	2,732	1,48E-09	7,37E-02	0,147	0,1610	0,001678
3	0,00067	0,0206	0,0206	2,729	1,48E-09	7,40E-02	0,221	0,2419	0,002516
4(...)	0,00090	0,0275	0,0275	2,726	1,47E-09	7,42E-02	0,295	0,3229	0,003354
95	0,02135	0,6537	0,6537	2,470	1,04E-09	9,80E-02	8,069	8,7226	0,076918
96	0,02158	0,6605	0,6605	2,467	1,03E-09	9,83E-02	8,167	8,8278	0,077698
97	0,02180	0,6674	0,6674	2,464	1,03E-09	9,86E-02	8,266	8,9333	0,078476
98	0,02203	0,6743	0,6743	2,461	1,03E-09	9,89E-02	8,365	9,0391	0,079254
99	0,02225	0,6812	0,6812	2,458	1,02E-09	9,93E-02	8,464	9,1453	0,080032
100	0,02248	0,6881	0,6881	2,456	1,02E-09	9,96E-02	8,564	9,2517	0,080808

Iteração 07	Ponto	z	(ys-yw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	J	σ' bteor (e)	Hteor
	0	0,00000	0,0000	0,0000	2,737	1,49E-09	0	0,000	0,0000
1	0,00022	0,0069	0,0069	2,734	1,49E-09	7,35E-02	0,074	0,0804	0,000839
2	0,00045	0,0138	0,0138	2,732	1,48E-09	7,37E-02	0,147	0,1610	0,001678
3	0,00067	0,0206	0,0206	2,729	1,48E-09	7,40E-02	0,221	0,2419	0,002516
4(...)	0,00090	0,0275	0,0275	2,726	1,47E-09	7,42E-02	0,295	0,3229	0,003354
95	0,02135	0,6537	0,6537	2,470	1,04E-09	9,80E-02	8,069	8,7226	0,076918
96	0,02158	0,6605	0,6605	2,467	1,03E-09	9,83E-02	8,167	8,8278	0,077698
97	0,02180	0,6674	0,6674	2,464	1,03E-09	9,86E-02	8,266	8,9333	0,078476
98	0,02203	0,6743	0,6743	2,461	1,03E-09	9,89E-02	8,365	9,0391	0,079254
99	0,02225	0,6812	0,6812	2,458	1,02E-09	9,93E-02	8,464	9,1453	0,080032
100	0,02248	0,6881	0,6881	2,456	1,02E-09	9,96E-02	8,564	9,2517	0,080808

ANEXO 4

Planilha de cálculo – RG35%

HCT - Cálculo dos parâmetros																					
Cliente	Carol			Amostra	RG35%																
Projeto	Dissertação			Célula	-																
Operador	-			Data	-																
Dados Iniciais					1ª Etapa - Fluxo																
Peso específico da água (kN/m³)	9,8065			Tensão efetiva inicial (kPa)	0																
Peso específico dos sólidos (kN/m³)	29,46			Velocidade (m/s)	2,50E-05																
Altura de sólidos (m)	0,04107			Altura final Ha (m)	0,085																
Índice de vazios inicial (e00)	1,072			Diferença de pressão (kPa)	0,29																
2ª Etapa - Carregamento					3ª Etapa - Permeabilidade																
Altura final (m)	0,08301			Velocidade (m/s)	6,67E-06																
Tensão aplicada (kPa)	57,29688			Diferença de pressão (kPa)	0,327																
Tensão efetiva na base da amostra calculada por: $\sigma'_{bA} = H_s \cdot (\gamma_s - \gamma_w) + \Delta P_A$ $\sigma'_{bA}(\text{kPa}) = 1,0972$				Cálculo tensão efetiva na base teórica: $\sigma'_{bTeor} = \gamma_w (G_s - 1) H_s + \int_0^{H_s} \frac{\gamma_w}{k} (1 + e) dz$				<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">Parâmetros Calculados:</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">1,104</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">-0,019</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Z (kPa)</td> <td style="text-align: center;">4,789</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">C (m/s)</td> <td style="text-align: center;">8,56E-06</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">D</td> <td style="text-align: center;">31,616</td> </tr> </tbody> </table>		Parâmetros Calculados:		A	1,104	B	-0,019	Z (kPa)	4,789	C (m/s)	8,56E-06	D	31,616
Parâmetros Calculados:																					
A	1,104																				
B	-0,019																				
Z (kPa)	4,789																				
C (m/s)	8,56E-06																				
D	31,616																				
Ponto fixo no gráfico:		Valores convergentes:		Cálculo do erro: $Err(B,D) = \left 1 - \frac{\sigma'_{bA}}{\sigma'_{bTeor}} \right + \left 1 - \frac{H_A}{H_{Teor}} \right $																	
k _p (m/s)	1,660E-05			σ' bteor (e)	1,0972																
e _c	1,021			H _{teor}	0,0850																
Erro (%): 0,00002																					
Iteração 01	Ponto	z	(γ _s -γ _w)z	e	k(e)	v.γ _s [(1+e)/k(e)]dz	∫	σ' bteor (e)	H _{teor}												
	0	0,00000	0,0000	1,072	7,71E-05	0	0,000	0,0000	0												
	1	0,00411	0,0807	1,072	7,71E-05	0,027060362	0,027	0,1078	0,00851												
	2	0,00821	0,1614	1,072	7,71E-05	0,027060362	0,054	0,2156	0,017019												
	3	0,01232	0,2422	1,072	7,71E-05	0,027060362	0,081	0,3233	0,025529												
	4	0,01643	0,3229	1,072	7,71E-05	0,027060362	0,108	0,4311	0,034039												
	5	0,02054	0,4036	1,072	7,71E-05	0,027060362	0,135	0,5389	0,042549												
	6	0,02464	0,4843	1,072	7,71E-05	0,027060362	0,162	0,6467	0,051058												
	7	0,02875	0,5650	1,072	7,71E-05	0,027060362	0,189	0,7544	0,059568												
	8	0,03286	0,6457	1,072	7,71E-05	0,027060362	0,216	0,8622	0,068078												
	9	0,03696	0,7265	1,072	7,71E-05	0,027060362	0,244	0,9700	0,076587												
10	0,04107	0,8072	1,072	7,71E-05	0,027060362	0,271	1,0778	0,085097													

Iteração 02	Ponto	z	(ys-yw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	∫	σ' bteor (e)	Hteor
	0	0	0,0000	1,072	7,71E-05	0	0,000	0,0000	0
	1	0,00411	0,0807	1,072	7,61E-05	0,027417704	0,027	0,1081	0,008508
	2	0,00821	0,1614	1,071	7,51E-05	0,027771832	0,055	0,2166	0,017014
	3	0,01232	0,2422	1,071	7,41E-05	0,028122843	0,083	0,3255	0,025518
	4	0,01643	0,3229	1,070	7,32E-05	0,02847083	0,112	0,4347	0,034021
	5	0,02054	0,4036	1,070	7,23E-05	0,02881588	0,141	0,5442	0,042521
	6	0,02464	0,4843	1,069	7,15E-05	0,029158077	0,170	0,6541	0,051021
	7	0,02875	0,5650	1,069	7,06E-05	0,029497501	0,199	0,7643	0,059518
	8	0,03286	0,6457	1,069	6,98E-05	0,029834226	0,229	0,8748	0,068014
	9	0,03696	0,7265	1,068	6,90E-05	0,030168326	0,259	0,9857	0,076508
10	0,04107	0,8072	1,068	6,83E-05	0,030499869	0,290	1,0969	0,085001	

Iteração 03	Ponto	z	(ys-yw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	∫	σ' bteor (e)	Hteor
	0	0	0,0000	1,072	7,71E-05	0	0,000	0,0000	0
	1	0,00411	0,0807	1,072	7,61E-05	0,027418883	0,027	0,1081	0,008508
	2	0,00821	0,1614	1,071	7,51E-05	0,027775328	0,055	0,2166	0,017014
	3	0,01232	0,2422	1,071	7,41E-05	0,028129754	0,083	0,3255	0,025518
	4	0,01643	0,3229	1,070	7,32E-05	0,028482215	0,112	0,4347	0,034021
	5	0,02054	0,4036	1,070	7,23E-05	0,028832765	0,141	0,5442	0,042521
	6	0,02464	0,4843	1,069	7,14E-05	0,029181454	0,170	0,6541	0,05102
	7	0,02875	0,5650	1,069	7,06E-05	0,02952833	0,199	0,7644	0,059518
	8	0,03286	0,6457	1,069	6,97E-05	0,029873438	0,229	0,8750	0,068013
	9	0,03696	0,7265	1,068	6,89E-05	0,030216823	0,259	0,9859	0,076508
10	0,04107	0,8072	1,068	6,81E-05	0,030558527	0,290	1,0972	0,085	

Iteração 04	Ponto	z	(ys-yw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	∫	σ' bteor (e)	Hteor
	0	0	0,0000	1,072	7,71E-05	0	0,000	0,0000	0
	1	0,00411	0,0807	1,072	7,61E-05	0,027418887	0,027	0,1081	0,008508
	2	0,00821	0,1614	1,071	7,51E-05	0,027775343	0,055	0,2166	0,017014
	3	0,01232	0,2422	1,071	7,41E-05	0,028129791	0,083	0,3255	0,025518
	4	0,01643	0,3229	1,070	7,32E-05	0,028482289	0,112	0,4347	0,034021
	5	0,02054	0,4036	1,070	7,23E-05	0,028832892	0,141	0,5442	0,042521
	6	0,02464	0,4843	1,069	7,14E-05	0,029181654	0,170	0,6541	0,05102
	7	0,02875	0,5650	1,069	7,05E-05	0,029528624	0,199	0,7644	0,059518
	8	0,03286	0,6457	1,069	6,97E-05	0,029873852	0,229	0,8750	0,068013
	9	0,03696	0,7265	1,068	6,89E-05	0,030217383	0,259	0,9859	0,076507
10	0,04107	0,8072	1,068	6,81E-05	0,030559262	0,290	1,0972	0,085	

Iteração 05	Ponto	z	(ys-yw).z	e	k(e)	v.ys[(1+e)/k(e)]dz	∫	σ' bteor (e)	Hteor
	0	0	0,0000	1,072	7,71E-05	0	0,000	0,0000	0
	1	0,00411	0,0807	1,072	7,61E-05	0,027418887	0,027	0,1081	0,008508
	2	0,00821	0,1614	1,071	7,51E-05	0,027775343	0,055	0,2166	0,017014
	3	0,01232	0,2422	1,071	7,41E-05	0,028129791	0,083	0,3255	0,025518
	4	0,01643	0,3229	1,070	7,32E-05	0,028482289	0,112	0,4347	0,034021
	5	0,02054	0,4036	1,070	7,23E-05	0,028832893	0,141	0,5442	0,042521
	6	0,02464	0,4843	1,069	7,14E-05	0,029181655	0,170	0,6541	0,05102
	7	0,02875	0,5650	1,069	7,05E-05	0,029528627	0,199	0,7644	0,059518
	8	0,03286	0,6457	1,069	6,97E-05	0,029873856	0,229	0,8750	0,068013
	9	0,03696	0,7265	1,068	6,89E-05	0,030217389	0,259	0,9859	0,076507
10	0,04107	0,8072	1,068	6,81E-05	0,03055927	0,290	1,0972	0,085	