

4

Condições Geométricas e Caracterização Geológico-Geotécnica e Hidrogeotécnica da PDE-05 e Entornos

A caracterização geológica-geotécnica teve como base as investigações executadas na área bem como os mapeamentos geológico e geotécnico de superfície, além das seções geológicas verticais e horizontais oriundas do modelo geológico tridimensional da mina. Estes mapeamentos foram executados pelas empresas PROMINAS e VOGBR, respectivamente.

As investigações geológico-geotécnicas, apresentadas no item 3.4, foram executadas para a instalação de instrumentos para o monitoramento hidrogeotécnico, tais como piezômetros e indicadores de nível de água, além de correlacionadas com as informações obtidas no mapeamento de campo e demais furos de sondagens antigos provenientes das campanhas exploratórias da mina, permitindo a identificação das unidades hidrogeotécnicas existentes na área em estudo. No Apêndice A é apresentado uma seção geológica-geotécnica vertical da área em estudo.

Realizaram-se também alguns ensaios de campo e laboratório complementares as quais permitiram definir melhor os parâmetros hidrogeológicos e caracterizar o estéril disposto na PDE-05 assim como o material de fundação.

4.1. Configuração Geométrica da Pilha

A partir da topografia de campo disponibilizada pela CVRD foi possível levantar algumas informações geométricas da pilha tais como dimensões dos taludes e bermas, ângulos de face e global médio dos taludes etc.

A pilha possui atualmente uma altura total de 61 m, divididos em quatro taludes, de altura variável entre 10,0 m e 23,0 m, conformando ângulo de inclinação de face entre 24,5° e 36,6°. A largura entre bermas é também variável de 5,0 m a 12,0 m, conformando um ângulo médio da pilha de 27,5°.

O escoamento das águas superficiais ocorre livremente sobre o terreno natural, possibilitando a formação de pequenas erosões e o aumento do carreamento de material fino proveniente da pilha (VOGBR, 2006). Em uma primeira análise, o material depositado apresenta uma resistência relativamente boa aos processos erosivos em virtude de não haver estruturas de drenagens superficiais revestidas implantadas na base dos taludes, os quais se encontram revegetados, como é o caso do 1º, 2º e 3º bancos. Há um canal periférico escavado em solo na ombreira esquerda da pilha, atualmente não conectado ao sistema de drenagem superficial, mas que futuramente poderá ser utilizado para direcionar as águas superficiais provenientes dos taludes e bermas.

Na base desta pilha encontra-se o córrego Derrubada, canalizado em seção retangular, revestido em pedra argamassada, com seções interrompidas devido à ruptura local dos bancos inferiores da PDE-02. Na ombreira esquerda da PDE-02, o referido canal foi totalmente destruído por erosões e voçorocas. Ressalta-se que, devido à dinâmica da mina, a geometria da PDE-05 é bastante variável ao longo do tempo, visto que ela ainda está em operação, devendo atingir sua conformação final de encerramento até o final do ano de 2007.

4.2. Caracterização Geológico-Geotécnica da Área da PDE-05 e Adjacências

A caracterização geológico-geotécnica dos materiais encontrados na área em questão constitui base essencial para o correto entendimento dos possíveis condicionantes da sub-pressão na fundação da pilha e, conseqüentemente, a elaboração do modelo conceitual e implementação dos modelos computacionais condizentes com a realidade encontrada na área. Esta caracterização é apresentada a seguir, sendo possível identificar, basicamente, os seguintes materiais:

- Solos coluvionares e material orgânico indiviso;
- Solos residuais provenientes da alteração de itabiritos, xistos e gnaisses;
- Carapaça laterítica;
- Xisto, gnaisses, quartzito e itabirito.

Para facilitar a compreensão e distribuição espacial dos materiais encontrados na área em questão, optou-se em dividi-la em três porções, as quais serão descritas a seguir. A Figura 9 apresenta uma vista geral da área,

identificando alguns pontos importantes registrados durante as atividades de caracterização da área.



Figura 9 – Vista aérea da região em estudo (imagem Ikonos), identificando alguns aspectos importantes registrados durante a caracterização da área.

a) Porção central e adjacências da PDE-05

No que se refere ao material existente na PDE-05, o material é constituído basicamente por dois tipos de itabiritos: friáveis e rocha sã, os quais podem estar desagregados ou em blocos de tamanhos variados e apresentando de baixa a alta resistência à alteração.

Sob o maciço da PDE-05 e entorno, encontram-se solos residuais, provenientes da alteração de itabiritos e xistos (VOGBR, 2006), sendo que na ombreira esquerda encontram-se solos residuais provenientes da alteração de xistos sotoposto a uma pequena camada de colúvio pouco desenvolvido¹¹. Ressalta-se que nesta região da ombreira esquerda foi realizada, na época da implantação da pilha de estéril, escavação (corte) de um canal periférico para drenagem de água superficial, podendo-se observar em grande parte do talude um veio de quartzo. Na ombreira direita ocorrem apenas solos residuais provenientes da alteração de itabiritos.

As informações obtidas neste levantamento de campo puderam ser confirmadas através das sondagens rotativas NA-ANPE5-01 e PZ-ANPE5-01 indicaram a presença de solo residual (material de fundação da PDE-05) nas profundidades de 18,0 m (El. 820,34m) e 22,3 m (El. 798,73m), respectivamente. Para a sondagem exploratória FDDE0158, encontrou-se na profundidade de 37,1 m (El. 825,54m) rocha alterada de xisto sotoposta a uma camada de 6,0 m composta por itabirito friável (material de fundação da PDE-05).

Encontra-se, sotoposto ao solo residual, o xisto intercalado por lentes de itabirito e quartzito semi-compactos. Em profundidades maiores, o xisto apresenta baixo grau de fraturamento e porosidade praticamente inexistente, conforme observado no perfil geológico da sondagem FDDE0008.

b) Porção a montante da PDE-05

Na região a montante da pilha (porção SE), observam-se afloramentos de itabiritos (Figura 10), próximos ao paiol de explosivos nº 1, sendo que, sobre este itabirito, também se encontra uma camada pouco espessa de laterita.

¹¹ A expressão “colúvio pouco desenvolvido” refere-se aos materiais inconsolidados formados pela ação da gravidade ou água onde o transporte deste material ocasionou carreamento de porções mais finas (solo) e pequenos fragmentos de rocha.

Entretanto, para a porção SW, entre os paióis de explosivos nº 2 e nº 3, observa-se a presença de uma camada de solo residual de xisto e gnaiss sotoposta a um solo coluvionar pouco desenvolvido. Além disso, nesta porção foi identificada uma zona de falha no contato xisto/itabirito. Esta falha é evidenciada principalmente pelas dobras (vergência W-E) presentes nos itabiritos (Figura 11), e também pelos indicadores cinemáticos observados. No mapa geológico local da mina (PROMINAS, 2005) esta falha foi denominada como falha de empurrão.

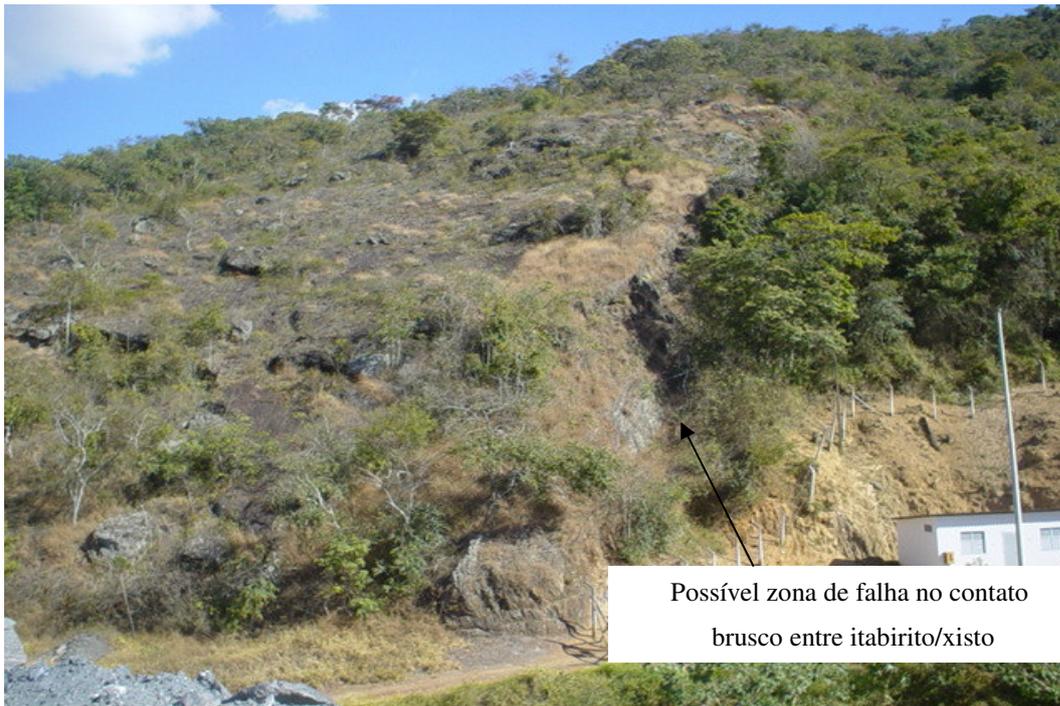


Figura 10 – Vista a partir do topo da PDE-05 para região de montante. No canto esquerdo da foto, grande afloramento de itabirito e presença vegetação rasteira. No lado direito da foto, vista do paiol de explosivos nº2 e vegetação de mata densa sobre o solo residual de xisto.

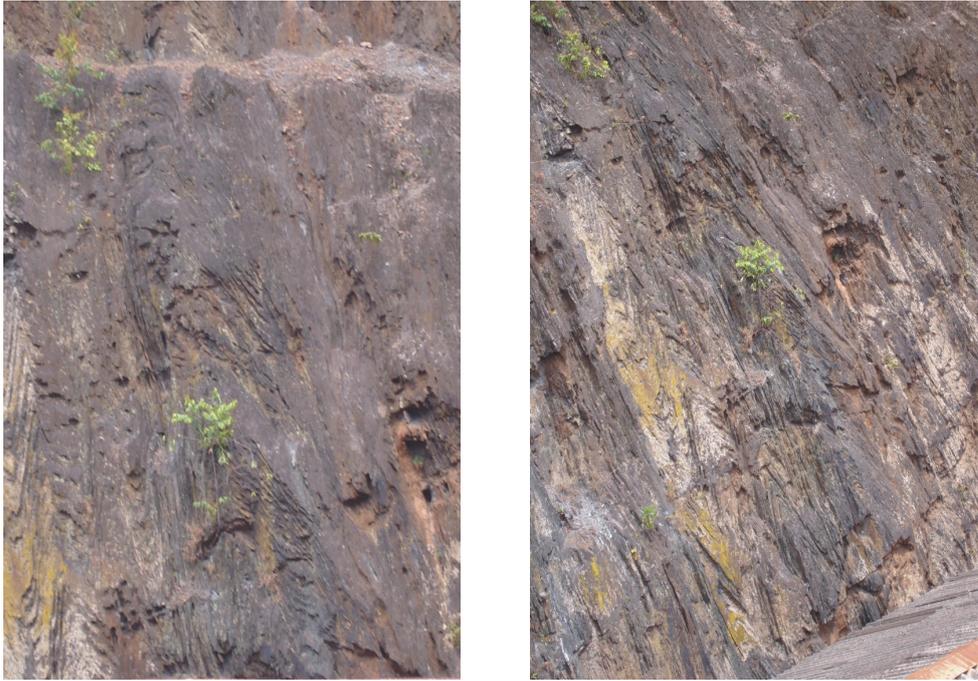


Figura 11 – Vista a partir do paiol de explosivos nº1 da PDE-05 para região de montante, mostrando os dobramentos (vergência W-E) presentes nos itabiritos.

Em algumas das sondagens exploratórias executadas na região de montante da PDE-05 observam-se informações interessantes relativas às características físicas dos litotipos perfurados entre outros dados úteis referentes à possibilidade de percolação da água subterrânea ou não nestas rochas. No Quadro 3, enfatiza-se principalmente a litologia, a porosidade, o grau de fraturamento e a hidratação dos testemunhos de sondagem.

Quadro 3 – Informações extraídas das descrições geológicas dos testemunhos das sondagens exploratórias na área de montante.

Nº Furo	Litologia	Intervalo (m)	Observações
FD-BU0001	xisto/itabirito	De 15,20 a 30,40	Alta porosidade e grau de fraturamento médio. Muito hidratado, exceto para o trecho 22,95 m a 30,40 m (porções de itabirito semi-compacto e friável).
FD-BU0002	canga/itabirito friável	De 3,30 a 28,40	Alta porosidade. Muito hidratado, exceto para o trecho 8,00 m a 28,40 m (porções de itabirito friável). Trechos não recuperados na sondagem: 9,40 m a 10,25 m; 17,55 m a 18,00 m e 20,10 m a 22,75 m
	itabirito compacto	De 28,40 a 50,00	Porosidade inexistente. Não hidratado. Presença de dobras complexas.

(continua)

Nº Furo	Litologia	Intervalo (m)	Observações
FD-BU0003	Quartzito	De 4,90 a 18,50	Alta porosidade, pouco fraturado. Hidratação não observada.
	itabirito friável / semi-compacto	De 18,50 a 34,90	Alta porosidade. Não hidratado.
	itabirito compacto	De 34,90 a 50,05	Não hidratado. Pouco fraturado. Presença de dobras.

c) Porção a jusante da PDE-05.

Nesta região encontra-se parte de alguns taludes da PDE-02, formada por estéril de xisto, que no ano de 2002 sofreu uma ruptura em alguns bancos, seguida por um escorregamento com posterior fluxo de material ao longo do vale a jusante da PDE-02. Toda esta região é coberta por solos residuais, sendo que no local em que ocorreu o fluxo de material, este solo residual possui espessuras da ordem de 4,5 m a 6,0 m.

Nas ombreiras, a espessura de solo residual é bem mais expressiva, isto é, em torno de 15,0 m. Na região a NW, encontram-se também acima deste solo um solo coluvionar pouco desenvolvido com matriz siltosa e presença de material mal selecionado com pedregulhos de granulometria fina.

Para a região localizada na porção SE (ombreira direita da PDE-02), observa-se um material coluvionar mais desenvolvido, com presença de pedregulhos e blocos de itabirito mal selecionados, provenientes das minas do Cabral e do Pico.

O Quadro 4 apresenta algumas informações extraídas das descrições geológicas dos testemunhos das sondagens exploratórias, realizadas na região de jusante da PDE-05. Enfatizam-se principalmente a litologia, a porosidade, o grau de fraturamento e a hidratação.

Quadro 4 – Informações extraídas das descrições geológicas dos testemunhos das sondagens exploratórias na área de jusante.

Nº Furo	Litologia	Intervalo (m)	Observações
FD-DE0013	xisto friável	De 10,60 a 67,60	Muito hidratado. Material friável. Grau de fraturamento baixo
	xisto compacto / itabirito compacto	De 67,60 a 144,70	Pouco hidratado. Grau de fraturamento baixo. Trecho de 118,75 m a 144,70 m de porosidade alta.
	xisto/itabirito compacto	De 144,70 a 187,60	Grau de fraturamento baixo/médio. Pouco hidratado e porosidade inexistente exceto p/ os trechos 144,70 m a 146,90 m e 162,85 m a 166,85 m.
	quartzito / xisto semi-compacto / compacto	De 187,60 a 252,10	Grau de fraturamento médio/baixo. Não hidratado exceto para o trecho 201,65 m a 211,50 m com baixa hidratação.
FD-DE0078	xisto friável	De 31,50 a 69,90	Muito hidratado.
	itabirito compacto / xisto compacto	De 69,90 a 146,35	Grau de fraturamento baixo/médio exceto p/ o trecho 69,90 m a 107,50 m de fraturamento alto. Hidratação variando de pouca a nenhuma.
	quartzito / xisto compacto	De 146,35 a 221,55	Não hidratado exceto para o trecho de 190,50 m a 196,50 m com hidratação baixa. Pouco fraturado.

As sondagens rotativas NA-ANPE2-01 e NA-ANPE2-02 indicaram a presença de solo residual nas profundidades de 20,50 m e 13,80 m, respectivamente. A sondagem NA-ANPE2-03 indicou a presença de topo rochoso (Figura 12) na profundidade de 10,00 m, sotoposto ao estéril da PDE-02, não sendo observada presença de camada de solo residual nesta sondagem. Tal ocorrência pode se justificar pelo fato de a sondagem ter sido executada exatamente no centro do talvegue (drenagem). Na região próxima à sondagem NA-ANPE2-03, há afloramentos de gnaisses bastantes resistentes e pouco alterados.



Figura 12 – Testemunho da sondagem rotativa NA-ANPE2-03 apresentando o início do gnaiss pouco fraturado a são a partir dos 10,0 m.

O Quadro 5 apresenta, resumidamente, as características gerais de cada tipo de solo ocorrente na área da PDE-05 e entorno.

Quadro 5 – Características gerais de cada tipo de solo encontrado na PDE-05 e entornos.

Local	Tipo de Solo	Distribuição Espacial	Descrição	Camada Máx. (m)
CENTRAL E ADJACÊNCIAS PDE-05	Solo Coluvionar	Solos com ocorrência restrita, limitada à ombreira esquerda da PDE-05.	Material silto-argiloso contendo pedregulhos, que variam de finos a grossos, mal selecionados.	1,0
	Solo Residual de Itabiritos	Ocorrem na ombreira direita da PDE-05.	Solo silto-arenoso de coloração avermelhada. Em alguns locais, observa-se presença de cobertura laterítica.	1,5
	Solo Residual de Quartzo-Feldspato-Xisto	Solo encontrado na ombreira esquerda e na fundação da PDE-05.	Constitui-se predominantemente por material areno-siltoso, de coloração avermelhada e porções de alteração de rocha expressivas de cor amarelada muito intemperizada. Em alguns locais, observa-se a presença de veios de quartzo na matriz do solo, principalmente a montante da pilha na porção oeste.	11,0

(continua)

Local	Tipo de Solo	Distribuição Espacial	Descrição	Camada Máx. (m)
À MONTANTE PDE-05	Solo Coluvionar	Solo com ocorrência restrita, limitada à ombreira esquerda da PDE-05 que se apresenta em depósitos com espessura baixa. Tais depósitos podem ser encontrados principalmente na porção NW da pilha.	Material silto-argiloso contendo pedregulhos, que variam de finos a grossos, blocos e matações, sendo geralmente mal selecionados.	0,5
	Solo Residual de Itabiritos	Ocorrem na porção SE da PDE-05, mais precisamente, na ombreira direita e também na montante da pilha.	Solo silto-arenoso de coloração vermelha a marrom, com estruturas pouco preservadas. Em alguns locais observa-se a presença de cobertura laterítica.	3,0
	Solo Residual de Xistos	Solos predominantes na área da PDE-05, exceto na porção SE da mesma.	Constitui-se predominantemente por material silto-argiloso com porções arenosas em alguns locais, de coloração vermelha escura.	10,0
À JUSANTE PDE-05	Solo Coluvionar	Solo com ocorrência limitada às ombreiras esquerda (coluvionar pouco desenvolvido) e ombreira direita (coluvionar desenvolvido) da PDE-02.	Coluvionar pouco desenvolvido: matriz silto-argiloso contendo pedregulhos com granulometria fina, geralmente mal selecionados e pouco espessos.	0,5
			Coluvionar desenvolvido: matriz siltosa, marrom avermelhada, contendo pedregulhos e blocos de itabiritos, geralmente mal selecionados e pouco espessos.	1,5
	Solo Residual de gnaisses	Solo com ocorrência na porção norte da PDE-02, mais precisamente nas ombreiras próximas à sondagem NAANPE2-03.	Solo silto-arenoso de coloração variada, com estruturas pouco preservadas.	2,0
	Solo Residual de Xistos	Predominantes na área da PDE-02, exceto na porção norte (próximo ao furo NA-ANPE2-03).	Constitui-se por material silto-arenoso, de coloração avermelhada. Em alguns locais, observa-se a presença de veios de quartzo na matriz do solo.	15,0

4.3. Ensaios de Campo e Laboratório Complementares

Procurando caracterizar melhor alguns materiais existentes na área, bem como identificar as possíveis causas da sub-pressão na fundação da PDE-05, executaram-se algumas investigações de campo e laboratório complementares na área em questão. O Quadro 6, exposto a seguir, apresenta o número e a área das investigações complementares de campo e laboratório, realizadas com este intuito. A memória de cálculo de todos os ensaios de campo e laboratório complementares encontra-se no Apêndice C.

Quadro 6 – Sumário das investigações de campo e laboratório complementares.

	Tipo de investigação	Objetivo	Nº de Ensaios	Área/Local
Em Campo	Ensaio com o permeâmetro de Guelph	Estimar a condutividade hidráulica saturada de campo do meio poroso.	18	Camadas superficiais do estéril de itabirito e solo de fundação da PDE-05.
	Ensaio com o tensiômetro	Determinar a curva característica de alguns materiais existentes na área estudada (estéril e fundação)	09	Camadas superficiais do estéril de itabirito e solo de fundação da PDE-05.
	Ensaio de permeabilidade	Estimar a condutividade hidráulica dos materiais (maciço das pilhas de estéril e fundação).	07	Instrumentos de monitoramento hidrogeotécnico existentes nas pilhas de estéril da mina (PDE-01, PDE-03, e PDE-05).
	Índice de vazios	Determinar o índice de vazios <i>in situ</i> subsidiando os parâmetros de entrada para o cálculo da Curva Característica do estéril a partir da retroanálise	04	Camadas superficiais do estéril de itabirito na área da PDE-05.
Em Laboratório	Caracterização física e classificação dos solos ¹²	Identificação das partículas constituintes do solo a partir das curvas granulométricas, limites de consistência, teor de umidade, densidade média dos grãos e índice de vazios.	06	Camadas superficiais e ombreira esquerda da PDE-05 sendo coletado material estéril e solo de fundação, respectivamente.
	Ensaio de adensamento	Determinar o coeficiente de adensamento (cv) e estimar a dissipação das poropressões geradas devido ao carregamento.	02	Ombreira esquerda da PDE-05 – material da fundação: solo residual quartzo-feldspato-xisto.
	Difração de raios-X	Identificação dos argilo-minerais existentes no estéril e no material da fundação da pilha.	04	Camadas superficiais e ombreira esquerda da PDE-05 sendo coletado material estéril e solo de fundação, respectivamente.

4.3.1. Ensaio de Campo

Em campo, foram realizados ensaios utilizando o permeâmetro de Guelph e ensaios do tipo relatado por Veloso (2000). Ambos os ensaios tiveram como objetivo estimar as propriedades hidrogeológicas e características do meio poroso para região saturada e não saturada a fim de permitir, com maior precisão, a criação de possíveis cenários para as análises de percolação de água na região da pilha.

¹² Foram realizados 3 ensaios para caracterização completa (incluindo granulometria com sedimentação, limites de Atterberg, densidade média e teor de umidade) e 3 ensaios para determinação do índice de vazios (mínimo, máximo, saturado do estéril).

Estimou-se também, a partir dos dados de testes de funcionamento dos instrumentos de monitoramento hidrogeotécnico (piezômetros), a condutividade hidráulica de alguns dos materiais existentes no subsolo da área em questão.

a) Permeâmetro de Guelph

O permeâmetro de Guelph é um aparelho leve e de fácil operação que possibilita a realização de ensaios *in situ* para obtenção da condutividade hidráulica saturada (Moreira, 1998). A condutividade deve ser determinada somente para regiões localizadas acima do lençol freático, a partir de uma carga de pressão constante, através da perfuração de um pequeno furo para instalação do equipamento.

Esta perfuração, de pequeno diâmetro, é feita com auxílio de um trado manual até a profundidade a ser ensaiada. Durante o ensaio e após algum tempo de aplicação da carga constante, uma pequena área em torno do furo estará saturada, formando um bulbo de saturação. Nesta região, o fluxo se torna constante possibilitando o cálculo do K_{fs} .

Na prática não se consegue a saturação total do solo, identificando-se duas hipóteses que explicariam a permanência de ar nos vazios do solo: (i) diferentes velocidades do avanço da frente de saturação; (ii) altos valores de sucção, inibindo em certas regiões o avanço da frente da saturação (Diene, 2004).

Entretanto, esta saturação de campo não se configura como uma desvantagem do ensaio, visto que a saturação total é muito difícil de ser atingida em uma situação real.

Na região da PDE-05, realizaram-se 18 ensaios utilizando o permeâmetro de Guelph, de maneira aleatória e dispersa ao longo das bermas de acesso da pilha, o que permitiu obter uma boa estimativa do valor da condutividade hidráulica saturada e não-saturada de campo para o material estéril. Além disso, foi executado um ensaio, na ombreira esquerda da pilha, no material composto pela alteração de rocha quartzo-feldspato-xisto.

As metodologias adotadas para a realização dos ensaios foram as propostas por Reynolds *et al.* (1983) e Elrick *et al.* (1989), com as quais, a partir da aplicação de uma carga constante por meio do permeâmetro de Guelph, obtêm-se as vazões de água infiltrada e, portanto, pode-se calcular a condutividade hidráulica de campo (K_{fs}) do material ensaiado.

A Figura 13 mostra o permeâmetro de Guelph durante a execução do ensaio no 1º banco da pilha de estéril PDE-05. Os resultados dos ensaios são apresentados na Tabela 1 a seguir.



Figura 13 – Execução do ensaio EN-6a utilizando o permeâmetro de Guelph, realizado no 1º banco. Ao fundo, vista do 2º, 3º e 4º bancos da pilha de estéril PDE-05.

Tabela 1 – Resultado dos ensaios utilizando o permeâmetro de Guelph na região da PDE-05 e entorno.

Nº Ensaio	Prof. (cm)	Data Execução	Local	K_{fs} (cm/s)
EN-01a	30,00	16/05/06	PDE-05 (3º banco - berma de acesso)	$2,86 \times 10^{-3}$
EN-01b	28,00	16/05/06	PDE-05 (3º banco - berma de acesso)	$1,09 \times 10^{-2}$
EN-02a	28,50	16/05/06	PDE-05 (3º banco - berma de acesso)	$6,78 \times 10^{-3}$
EN-02b	27,00	16/05/06	PDE-05 (3º banco - berma de acesso)	$1,02 \times 10^{-3}$
EN-03a	28,00	16/05/06	PDE-05 (2º banco - berma de acesso)	$9,50 \times 10^{-3}$
EN-03b	29,50	16/05/06	PDE-05 (2º banco - berma de acesso)	$1,57 \times 10^{-2}$
EN-04a	28,00	16/05/06	PDE-05 (2º banco - berma de acesso)	$2,44 \times 10^{-3}$
EN-04b	29,00	17/05/06	PDE-05 (2º banco - berma de acesso)	$2,92 \times 10^{-4}$
EN-05a	28,00	17/05/06	PDE-05 (2º banco - berma de acesso)	$3,98 \times 10^{-4}$
EN-05b	28,00	17/05/06	PDE-05 (2º banco - berma de acesso)	$1,30 \times 10^{-3}$
EN-06a	30,00	17/05/06	PDE-05 (1º banco - berma de acesso)	$1,77 \times 10^{-4}$

(continua)

Nº Ensaio	Prof. (cm)	Data Execução	Local	K_{fs} (cm/s)
EN-06b	30,00	17/05/06	PDE-05 (1º banco - berma de acesso)	$3,53 \times 10^{-4}$
EN-07a	30,00	17/05/06	PDE-05 (1º banco - berma de acesso)	$1,21 \times 10^{-3}$
EN-07b	29,00	17/05/06	PDE-05 (1º banco - berma de acesso)	$3,46 \times 10^{-3}$
EN-08a	28,00	18/05/06	PDE-05 (3º banco - berma de acesso)	$1,89 \times 10^{-2}$
EN-08b	27,00	18/05/06	PDE-05 (3º banco - berma de acesso)	$7,29 \times 10^{-4}$
EN-09a	30,00	18/05/06	PDE-05 (3º banco - berma de acesso)	$7,53 \times 10^{-4}$
EN-10a	49,00	20/07/06	PDE-05 (ombreira esquerda) – alt. rocha	$4,54 \times 10^{-3}$

Os valores encontrados nos ensaios com o permeâmetro de Guelph mostram que a condutividade hidráulica média (K_{fs}) do estéril de itabirito é da ordem de 2×10^{-3} cm/s. Este valor é condizente com as propriedades físicas destes materiais que possuem grande porcentagem de fração de areia. Entretanto, valores maiores podem ainda ser encontrados para o valor de K_{fs} em regiões de maior profundidade da pilha, devido principalmente, à natureza do método de disposição do estéril, que provoca a concentração de grandes blocos de rocha na base dos taludes.

As diferenças encontradas nos resultados dos ensaios de campo variam de 10^{-2} a 10^{-4} cm/s. De um modo geral, os menores valores encontrados para o K_{fs} , como por exemplo para o ensaio EN-06a, estão situados nas bermas de acesso inferiores, ou seja, nas regiões de disposição mais antigas. Pode-se explicar esta diferença devido ao tráfego de caminhões associado à incidência repentina de precipitações gerando um aumento do grau de compactação do material disposto e, conseqüentemente, a redução da permeabilidade.

Por outro lado, materiais dispostos recentemente encontram-se em estado relativamente fofo e com maior índice de vazios, o que facilita a infiltração da água (ensaio EN-08a).

b) Ensaios utilizando o procedimento descrito por Veloso (2000)

A partir dos procedimentos descritos por Veloso (2000), foram realizados, simultaneamente, alguns ensaios utilizando o tensiômetro e o permeâmetro de

Guelph, na região da PDE-05, a fim de se determinar dos parâmetros hidráulicos de solos não saturados.

A configuração do ensaio consistiu em escavar um furo de profundidade rasa (superficial) para colocação do permeâmetro de Guelph juntamente com o tensiômetro, o qual foi instalado a partir da cota de fundo do furo. Em seguida, aplicou-se uma carga constante qualquer no furo, utilizando o tubo de Mariotte do Guelph, sendo medida a variação da sucção (através do tensiômetro) ao longo do tempo (Velloso *et al.*, 2006). Segundo Velloso (2000), quanto maior o valor inicial de sucção obtido durante o ensaio mais confiáveis e representativos são os parâmetros de toda a curva característica calculada.

O tensiômetro é um instrumento simples e eficiente que permite obter a sucção do solo em campo. Ele é constituído por um tubo de PVC (polivinil clorídrico), de comprimento variável, preenchido com água desaerada, em cuja extremidade inferior há uma cápsula de porcelana porosa. É fechado hermeticamente na extremidade superior, onde se encontra um transdutor de pressão (ou manômetro) que permite a leitura (ou obtenção) das pressões geradas no interior do tubo, correspondendo estas à sucção ou à pressão hidrostática da água intersticial (Marinho, 1995).

Para os ensaios realizados na área da PDE-05 utilizou-se o tensiômetro modelo 2725, fabricado pela Soilmoisture Equipment Corp. e faixa de operação entre 0 a 100 kPa .

O diâmetro e a carga hidráulica aplicada para todos os ensaios foram de dez e cinco centímetros, respectivamente. No total foram realizados nove ensaios com o tensiômetro, sendo sete no material estéril de itabirito e os demais na alteração de rocha e solo residual. Nos ensaios realizados no estéril optou-se por variar a posição do tensiômetro (horizontal e vertical) de forma a avaliar possíveis diferenças nos parâmetros calculados.

Em resumo, as medidas de sucção do solo realizadas pelo tensiômetro ocorrem em virtude da geração de vácuo no interior do tubo de PVC, que está durante todo o ensaio hermeticamente fechado. Ao colocar a cápsula de porcelana do aparelho em contato com uma região na qual o solo encontra-se não saturado, haverá tendência da água existente no interior do tensiômetro percolar para o solo, de forma a atingir o equilíbrio do sistema. Entretanto, como o tubo encontra-se

fechado esta percolação não ocorre, salvo para as limitações de sucção do aparelho.

Dentre os nove ensaios realizados, apenas quatro foram utilizados para calcular a curva característica (Apêndice A), sendo três voltados para o estéril e um para alteração de rocha quartzo-feldspato-xisto. Os parâmetros não saturados obtidos a partir da retro-análise dos dados de campo de quatro ensaios são apresentados a seguir na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros dos materiais não saturados estimados a partir da retro-análise.

Nº Ensaio	Parâmetros obtidos					Local
	α	n	K_{sat} (cm/s)	θ_r	θ_s	
En_TEN-01	0,047	1,775	$2,48 \times 10^{-3}$	0,04	0,39	PDE-05 (4º banco- topo) - Estéril
En_TEN-02	0,062	1,662	$1,49 \times 10^{-3}$	0,04	0,39	PDE-05 (4º banco- topo) - Estéril
En_TEN-05	0,031	1,491	$1,95 \times 10^{-3}$	0,04	0,39	PDE-05 (banco em construção - entre o 3º e 4º) - Estéril
En_TEN-09	0,016	1,332	$1,79 \times 10^{-3}$	0,05	0,35	PDE-05 (ombreira esquerda) - Alteração de rocha

No mesmo local do ensaio En_TEN-09, foi também realizado um ensaio utilizando somente o permeâmetro de Guelph (EN-10a) para determinação da condutividade hidráulica de campo. Este procedimento permitiu comparar os valores calculados de K_{fs} para os dois ensaios, nos quais se pode observar uma pequena diferença entre o valor calculado a partir da retro-análise ($K_{fs} = 1,79 \times 10^{-3}$ cm/s) com o valor estimado no ensaio com o Guelph ($K_{fs} = 4,54 \times 10^{-3}$ cm/s).

Para todas as curvas características, calculadas a partir dos dados da retro-análise (material estéril e alteração de rocha), nota-se que a configuração destas curvas apresenta formas típicas de materiais arenosos. Materiais desta natureza possuem grandes poros que, para pequenos valores de sucção, são suficientes para reduzir o teor de umidade do material (Veloso, 2000).

Outra característica importante, e mencionada por Hillel (1971), é que, durante a drenagem, ocorre o esvaziamento rápido dos grandes poros, os quais perdem a propriedade de condutores à medida que a sucção é aumentada. Neste momento, a alta permeabilidade inicial deste material decresce abruptamente,

fornecendo, para situações de sucção elevada, valores de permeabilidade bem menores do que os obtidos em solos argilosos em mesma condição.

A Figura 14 ilustra o ensaio utilizando o tensiômetro e o permeâmetro de Guelph, simultaneamente, conforme procedimento descrito por Veloso (2000).

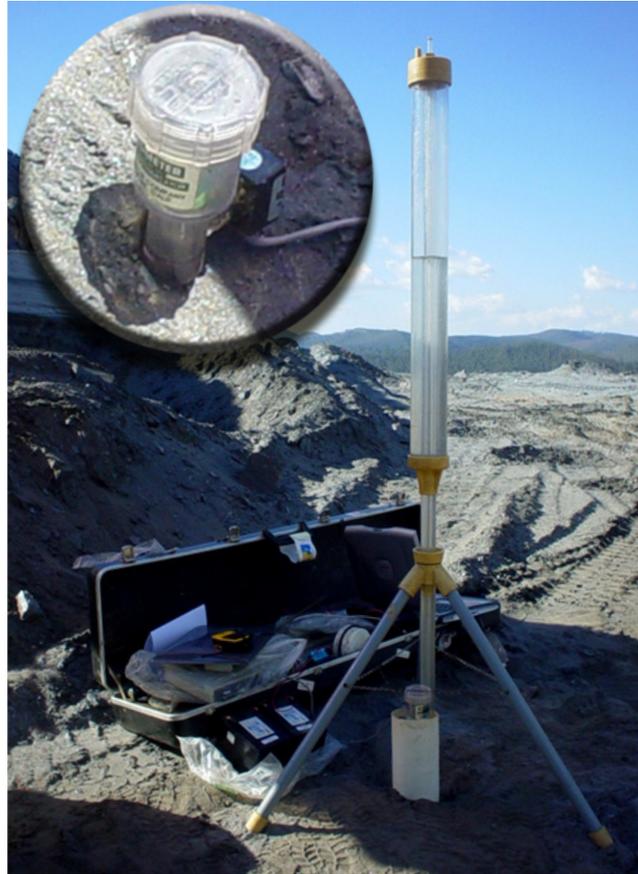


Figura 14 – Vista do ensaio utilizando simultaneamente o tensiômetro e o permeâmetro de Guelph, realizado no 3º banco da PDE-05, conforme procedimento proposto por Veloso (2000). No detalhe, tensiômetro cravado no estéril de itabirito.

c) Medida da condutividade hidráulica a partir dos testes de funcionamento dos instrumentos instalados

Ao final da execução das sondagens hidrogeotécnicas (VOGBR, 2006), foram realizados testes nos instrumentos instalados nas pilhas de estéril (indicadores de nível de água e piezômetros) para verificação de seu funcionamento. Tais dados consistem em medidas de infiltração de água nos instrumentos ao longo do tempo, mantendo-se uma carga constante igual à altura da boca do tubo do instrumento.

De posse destes dados, mediram-se os valores da condutividade hidráulica dos materiais nos quais estes instrumentos estão instalados (trecho referente ao pré-filtro). Estas medidas foram realizadas apenas para os piezômetros instalados nas PDE-01, PDE-03 e PDE-05 da mina do Andrade, totalizando 7 valores para a condutividade hidráulica do estéril de xisto, itabirito e solo residual de xisto. Os dados provenientes de medições feitas nos indicadores de nível de água foram descartados devido à dificuldade de se estimar tal propriedade, pois os estes encontravam-se parcialmente saturados e conectados a diferentes materiais.

Para o cálculo das condutividades, adotou-se o procedimento recomendado pela ABGE (1996), utilizando-se para isso as medidas de infiltração de água ao longo do tempo (vazão) e os dados dos perfis construtivos dos instrumentos instalados. Os valores medidos para o cálculo da condutividade hidráulica nos piezômetros são apresentados na Tabela 3, a seguir.

Tabela 3 – Valores medidos para o cálculo da condutividade hidráulica realizados nos piezômetros existente nas pilhas de estéril da mina do Andrade.

Local (pilha)	Nº Instrumento	Trecho		Prof. N.A. (m)	Litologia	K _{fs} (cm/s)
		De (m)	Até(m)			
PDE-01	PZANPE1-01	10,50	14,00	3,57	Estéril xisto	3,17x10 ⁻⁵
PDE-03	PZANPE03-01	7,40	10,90	6,99	Estéril (xisto/itabirito)	3,21x10 ⁻⁴
	PZANPE03-02	21,80	25,00	13,05	Solo residual xisto	1,49x10 ⁻⁵
	PZANPE03-03	31,00	34,20	33,44	Estéril (xisto/itabirito)	4,47x10 ⁻⁴
	PZANPE03-04	23,30	29,80	13,37	Solo residual xisto	5,99x10 ⁻⁵
	PZANPE03-05	6,30	9,50	8,26	Estéril (xisto/itabirito)	1,29x10 ⁻³
PDE-05	PZANPE5-02	37,50	41,00	14,30	Solo residual xisto (fundação)	4,23x10 ⁻⁵

Apesar da pequena quantidade de ensaios realizados, observa-se que os valores de K_{fs} para o estéril e o solo residual, ambos provenientes de xisto, possuem valores da condutividade hidráulica próximos e de mesma ordem de grandeza (K_{fs} = 10⁻⁵ cm/s).

As diferenças encontradas nos ensaios realizados em trechos contendo porções de estéril de itabirito e de xisto se devem à presença em maior ou em menor quantidade de material no trecho ensaiado. Para o estéril de itabirito e para

o estéril de xisto os valores esperados para o K_{fs} são da ordem de 10^{-3} cm/s e 10^{-6} cm/s, respectivamente (Apêndice A).

Os valores de K_{fs} obtidos no ensaio de permeabilidade utilizando o permeâmetro de Guelph permitiram identificar uma diferença de duas ordens de grandeza entre os valores de condutividade hidráulica obtidos para o solo residual de xisto ($K_{fs} = 4,23 \times 10^{-5}$ cm/s) e para o da rocha alterada ($K_{fs} = 4,54 \times 10^{-3}$ cm/s). Estas diferenças são atribuídas às variações existentes nas estruturas do meio poroso do solo e da rocha alterada, aos efeitos de escala, bem como às limitações de cada ensaio, e se mostraram coerentes quando comparadas à diferença entre os valores esperados (3 ordens de grandeza).

4.3.2. Ensaio de Laboratório

O objetivo dos ensaios de laboratório complementar foi primeiramente o de identificar os principais constituintes do solo e do estéril encontrados na PDE-05 e em suas adjacências, mas que não foram caracterizadas em etapas anteriores de estudo da área.

Outro objetivo buscado foi também o de confirmar a possibilidade ou não da geração de poro-pressão devido à disposição de estéril na PDE-05 e, conseqüentemente, o adensamento lento do material de fundação, podendo ser esta a principal causa da geração de sub-pressões nesta pilha.

Desta maneira, optou-se por realizar ensaios de caracterização completa (granulometria e limites de Atterberg), índice de vazios máximo e mínimo e adensamento edométrico em corpos de prova inundados. Para o material estéril foram coletadas duas amostras deformadas (AM-01 e AM-02) da superfície da pilha. Para o material de fundação foi extraído um bloco contendo uma amostra indeformada (AM-03), conforme apresentado na Figura 15. Todo esse material foi ensaiado no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, obedecendo às metodologias contempladas nas normas técnicas da ABNT entre outras especificações.



Figura 15 – Vista do bloco AM-03 de amostra indeformada extraída da ombreira esquerda da PDE-05. Material classificado como solo residual com alterações de rocha (quartzo-feldspato-xisto).

Além dos ensaios de laboratório, foram preparadas quatro lâminas para realização de testes de difração de raios-X, a fim de se identificar os argilo-minerais existentes tanto para o material o estéril (amostras AM-01 e AM-02) como da fundação da pilha (amostra AM-03).

a) Caracterização física e classificação dos solos

- Material estéril de itabirito: as amostras deformadas AM-01 e AM-02 coletadas da superfície da PDE-05 apresentaram predominância da fração arenosa, sendo classificadas como areias silto-argilosas de granulometria muito uniforme. As distribuições granulométricas médias destas duas amostras possuem cerca de 3% de argila, 13% de silte, 69% de areia e 15% de pedregulho, além de possuírem índice de plasticidade nulo.

A densidade média dos grãos é de $4,12\text{g/cm}^3$, considerada razoável devido à presença de teores elevados de hematita (estéril de itabirito).

O índice de vazios mínimo e máximo foi de 0,79 e 1,56, respectivamente, para condição não saturada. Foi calculado também o índice de vazios mínimo para a uma amostra moldada em condição saturada, obtendo-se o valor de 0,34.

Para a validação dos valores encontrados em laboratório, extraiu-se, *in situ*, quatro amostras do material estéril, cravando-se um anel de volume conhecido, seguido da pesagem do material existente no interior de cada anel, em laboratório, obtendo-se um valor médio para o índice de vazios *in situ* igual a 0,35.

- Solo residual de xisto com porções de alteração de rocha quartzo-feldspato-xisto: na ombreira esquerda da PDE-05 foi extraído um bloco de amostra indeformada denominada como AM-03, que, ao apresentar predominância da fração arenosa, pode ser classificada como areia silto-argilosa de granulometria muito uniforme. A distribuição granulométrica desta amostra possui cerca de 9% de argila, 11% de silte, 74% de areia e 6% de pedregulho, além de possuírem índice de plasticidade nulo. A densidade média relativa dos grãos foi de $2,65\text{g/cm}^3$.

É importante ressaltar que para ambos os materiais, estéril e solo residual, os limites de consistência mostraram-se com uma característica não plástica, devido ao fato de o quartzo ser o mineral predominante encontrado na fração areia e pequena existência da fração de finos (silte e argila inferior a 20%).

A Figura 16 apresenta as curvas granulométricas das amostras AM-01, AM-02 e AM-03 retiradas na área da PDE-05 e adjacências.

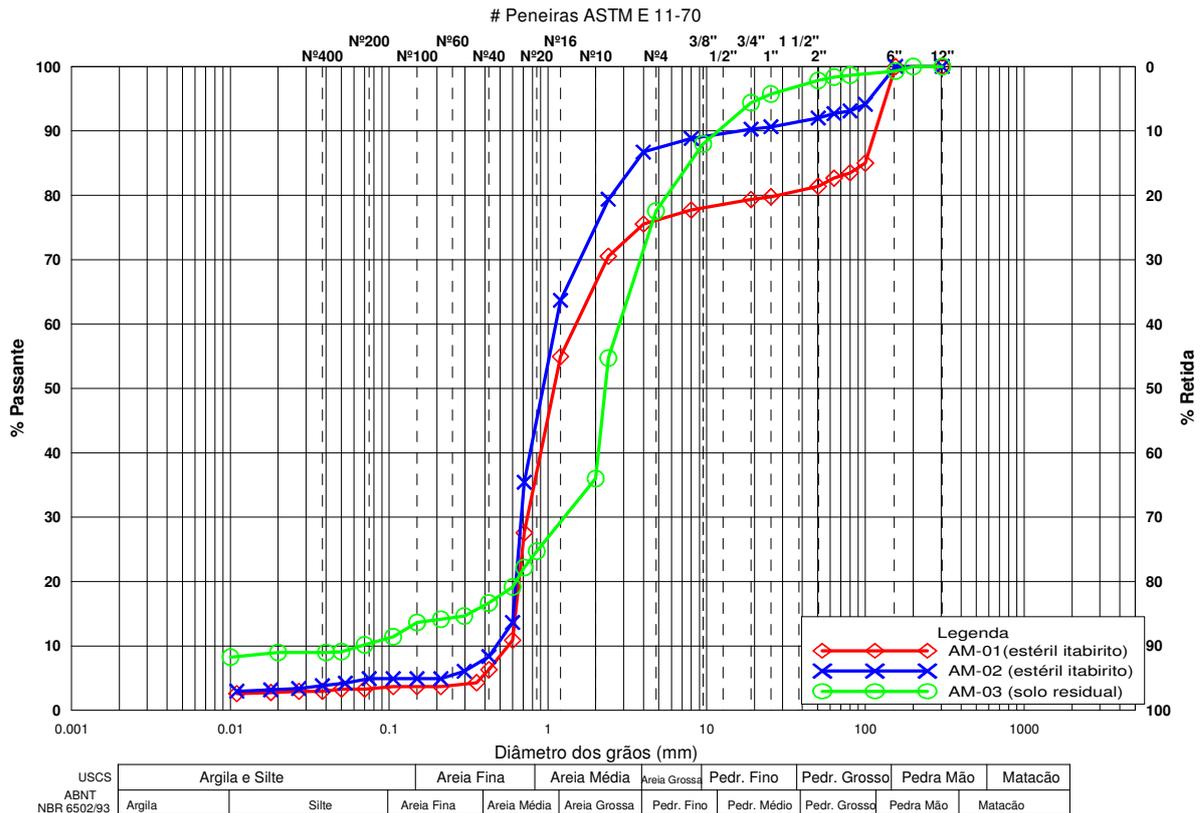


Figura 16 - Curvas granulométricas das amostras de estéril de itabirito (AM-01, AM-02) coletadas na superfície da PDE-05 e de solo residual com porções de alteração de rocha quartzo-feldspato-xisto (AM-03) coletadas na ombreira esquerda da pilha.

b) Ensaio de adensamento convencional

Foram moldados dois corpos de prova (CPs) extraídos a partir da amostra indeformada AM-03, localizada na ombreira esquerda da PDE-05 (coordenadas UTM N 7.811.695 / E 689.462). Ambos CPs foram ensaiados sob condições nas quais a amostra permaneceu inundada desde o início dos carregamentos, com a finalidade de determinar o coeficiente de adensamento do solo (c_v) e de avaliar quanto tempo o material da fundação da pilha levaria para dissipar o excesso de poro pressão gerado à disposição de estéril.

Os corpos de prova foram preparados com a utilização de anéis rígidos com dimensões de 10,10 cm de diâmetro e 3,00 cm de altura. As aparas resultantes da talhagem foram utilizadas na determinação da umidade inicial de cada corpo de prova e, a partir da pesagem dos corpos de prova, juntamente com os anéis, determinaram-se as massas específicas naturais.

O carregamento foi feito em estágios de tensão com duração de vinte e quatro horas cada um. Em cada novo estágio, a carga acrescentada era aplicada de forma a dobrar a pressão exercida sobre o corpo de prova no estágio anterior,

exceto para as situações nas quais o valor do carregamento não seria ideal para a execução do ensaio (colocação e retirada das cargas).

O carregamento foi conduzido até a definição da reta de compressão virgem, limitando-se a uma pressão máxima de 1200 kPa, e o descarregamento foi feito em cinco estágios, preservando-se o mesmo tempo de duração de cada estágio.

A Figura 17 ilustra as curvas de adensamento do par de ensaios, na condição inundada, da amostra AM-03.

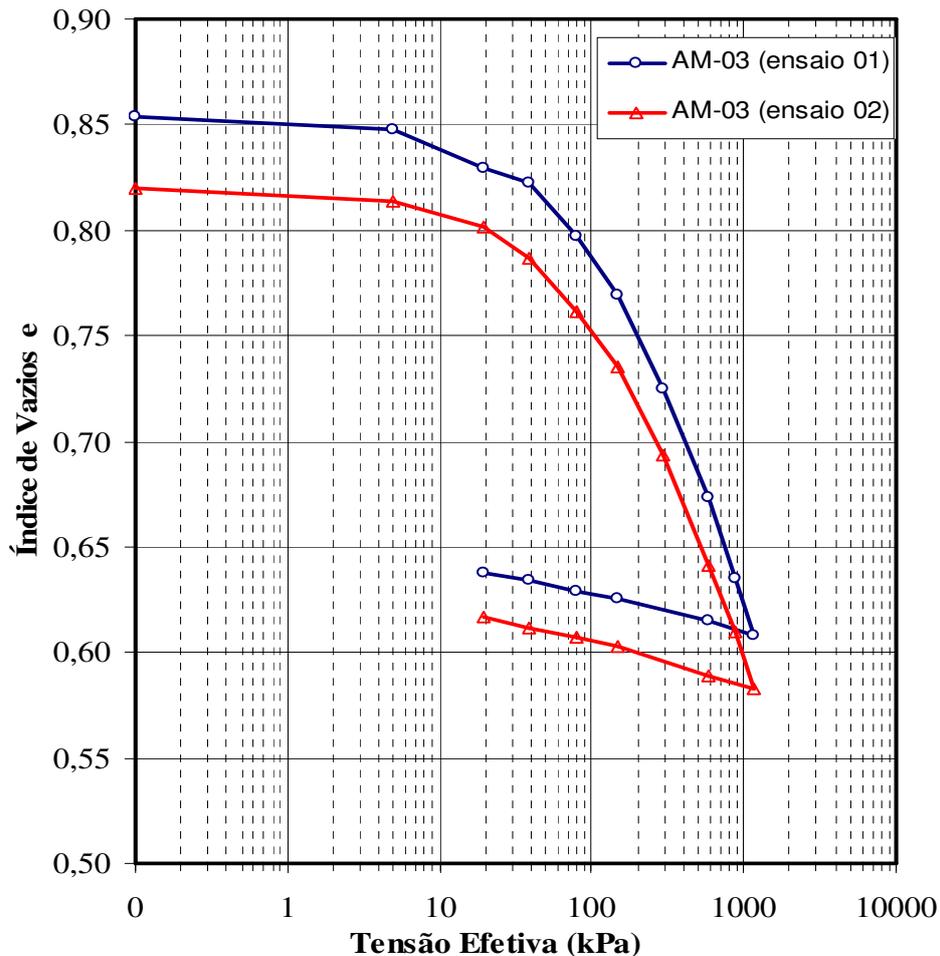


Figura 17 - Curvas de adensamento do par de ensaios na condição inundada extraída da amostra AM-03. Material ensaiado: solo residual de xisto com porções de alteração de rocha quartzo-feldspato-xisto (ombreira esquerda da PDDE-05).

O valor do coeficiente de adensamento encontrado para os dois ensaios calculado pelo método de Taylor foi de 14,2 cm^2/s e 14,6 cm^2/s para um carregamento de 1177 kPa. Para estes valores, o excesso de poro pressão gerado pelo carregamento é dissipado rapidamente, ficando descartada a hipótese da geração de sub-pressão na fundação da pilha relacionada a este fato, o que

apresenta coerência em relação à classificação do solo, que é composto por porções arenosas elevadas.

c) Identificação mineralógica a partir de difratometria de raios-X

A partir dos resultados de quatro lâminas orientadas por meio de difração raios-X (DRX), pôde-se identificar os principais minerais existentes nas amostras do material existente na PDE-05 (estéril de itabirito) e em sua fundação (solo residual de xisto com porções de rocha alterada quartzo-feldspato-xisto).

O ensaio referente às amostras de solo foi realizado no laboratório do DCMM¹³ sendo as análises e os demais ensaios (material estéril) realizados pela equipe do CDTN¹⁴. Para ambas as amostras, utilizou-se o método do pó para obtenção dos difratogramas de raios-X.

Nas amostras referentes ao estéril constatou-se a predominância do mineral quartzo e hematita. Foram identificados também os minerais caulinita, magnetita e moscovita em quantidade inferior a três por cento da amostra total. Nas lâminas compostas por solo residual pôde-se observar a predominância do mineral quartzo, gibbsita e microlina. Cerca de 10% destas amostras de solo, observa-se também o argilomineral caulinita. Os resultados da difratometria de raios-X encontram-se no Apêndice A, deste trabalho.

O Quadro 7 apresenta os principais minerais e suas porcentagens encontradas nas lâminas quatro lâminas orientadas por meio de DRX.

¹³ DCMM – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio.

¹⁴ CDTN – Centro de Desenvolvimento Tecnológico Nuclear é uma instituição dedicada à pesquisa nuclear e pertence à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

Quadro 7 – Resultado da difratometria de raios-X nas amostras da PDE-05.

Amostra	Mineral Identificado ¹⁵			
	Predominante (>40%)	Maior (<30%)	Menor (<10%)	Minoritário (<3%)
AM-01 (estéril)	Quartzo	Hematita	-	Caulinita Magnetita Moscovita
AM-02 (estéril)	Quartzo	Hematita	-	Caulinita Magnetita
AM-03 (solo residual)	Quartzo	Gibbsita	Albita Caulinita Microclina	Dolomita Goethita Muscovita
	Gibbsita	Microlina	Caulinita Quartzo	Goethita

Ressalta-se que os minerais identificados no método DRX apresentam valores de densidade média relativa dos grãos compatíveis com os encontrados nos ensaios de caracterização completa em laboratório, mostrando uma coerência entre ambas as análises.

¹⁵ Albita: $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$; Caulinita: $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$; Dolomita: $(\text{Ca,Mg})(\text{CO}_3)_2$; Goethita: FeO.OH ; Gibbsita: $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; Hematita: Fe_2O_3 ; Magnetita: Fe_3O_4 ; Microclina: KAlSi_3O_8 ; Moscovita: $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$; Quartzo: SiO_2 .