

4º RELATÓRIO CONSOLIDADO DE ANDAMENTO DO PBA E DO ATENDIMENTO
DE CONDICIONANTES

CAPÍTULO 2 – ANDAMENTO DO PROJETO BÁSICO AMBIENTAL

Anexo 10.3-2 - Metodologias Aplicadas

Neste item é apresentada a metodologia utilizada para cada tipo de ensaio realizado.

Ensaio de Expansão Unidimensional

O ensaio foi realizado segundo a ASTM D4546 - 08: *Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Cohesive Soils*. Essa norma estabelece o procedimento de ensaio para medir tanto a expansão, quanto a colapsividade de solos argilosos.

O equipamento empregado no ensaio foi um oedômetro convencional (**Figura 10.3-1**). Devido ao reduzido número de blocos coletados, foi utilizado Método B (*single point wetting after loading test on a single specimen*), com tempo de inundação máximo de 72 horas. Visando reproduzir as condições de campo, a carga de compressão unidimensional inicial foi de 25,15 kPa, equivalente a 1,20m de altura de solo, aproximadamente. As amostras utilizadas foram coletadas a 1 metro de profundidade, mas a disponibilidade dos pesos do equipamento só permitiu colocar uma carga equivalente a 1,20m.

As amostras indeformadas foram moldadas em um anel de 50 mm de diâmetro e 20mm de altura (**Figura 10.3-1**). Antes da saturação o carregamento foi colocado em dois estágios, o que permitiu a recompressão da amostra. O primeiro foi de 12,58 kPa e o segundo completou os 25,15kPa, em um tempo total de 50 minutos. Depois disso, sob o carregamento constante, foi iniciada a inundação, utilizando água destilada. Segundo o estabelecido na norma as leituras foram tomadas a partir de 30 segundos depois de realizada a inundação, dobrando o tempo de leitura até chegar em 72 horas.

Com as leituras tomadas, e levando-se em conta a altura inicial do espécime, foi calculada a deformação dos corpos de prova. O processo, desde o início do carregamento até a leitura final (72 horas) foi plotado em um gráfico de pressão aplicada - σ versus índice de vazios - e , o que permite observar o comportamento do corpo de prova durante o todo o processo.

Além disto, com base nos resultados dos ensaios de caracterização e obtenção da umidade inicial e a final foi calculado o grau de saturação das amostras, empregando a formulação estabelecida na norma.



Figura 10.3-1 - Equipamentos utilizados no ensaio de expansão unidimensional.

Ensaio de Adensamento Oedométrico com Medição de Colapso

Os ensaios oedométricos são os mais utilizados em laboratório para avaliar a possibilidade de ocorrência de colapso, além de fornecerem informações quantitativas que permitem a estimativa da magnitude dos recalques.

O ensaio é executado de maneira convencional (Ensaio de Adensamento Unidimensional, NBR 12007), com apenas um corpo de prova, no teor de umidade natural (campo), até atingir a tensão de interesse (200 kPa). Após a estabilização das deformações. Inunda-se o corpo de prova e medem-se as deformações adicionais (colapso). Prossegue-se o ensaio, aplicando-se incrementos de carga até a máxima tensão de interesse; fazendo-se as leituras de deformação vertical. Ao final do ensaio a amostra é descarregada, retirando as cargas em incrementos. A **Figura 10.3-2** apresenta o equipamento usado para a execução do ensaio. A **Figura 10.3-3** mostra uma curva típica obtida neste tipo de ensaio.



Figura 10.3-2 - Prensa usada no ensaio de adensamento.

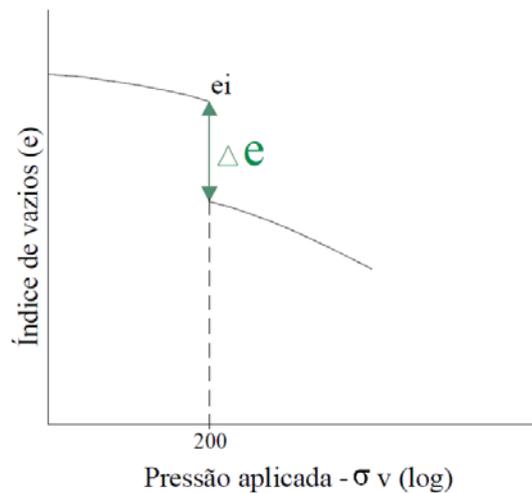


Figura 10.3-3 - Curva obtida em um ensaio edométrico simples com medição de colapso em 200 kPa.

Foi feita uma classificação da colapsibilidade, quanto à sua gravidade, nas obras de engenharia segundo o critério de Jennings & Knight (1975) apresentado no **Quadro 10.3-1**. Esta classificação de colapsibilidade, em conjunto com os dados do **Quadro 10.3-2** e **Quadro 10.3-3**, subsidiou a classificação geotécnica dos solos e atualização do Mapa Geológico-Geotécnico.

Quadro 10.3-1 - Classificação da colapsibilidade nas obras de engenharia (Jennings & Knight, 1975).

CP (%)	GRAVIDADE DO PROBLEMA
0 – 1	Nenhum
1 – 5	Moderado
5 – 10	Problemático
10 – 20	Grave
> 20	Muito grave

O potencial de colapso é calculado usando a seguinte expressão:

$$CP = \frac{\Delta e}{1 + e_i}$$

Onde:

CP: potencial de colapso;

Δe : variação do índice de vazios sob inundação e

e_i : índice de vazios dos solo no início da inundação.

Ensaio de Inderbitzen

É um ensaio de simples execução dentre os realizados em canais hidráulicos no meio geotécnico, apresentando resultados satisfatórios, mesmo sendo um ensaio baseado em métodos empíricos e ainda não normalizado. Para a realização deste ensaio, foi utilizado um equipamento específico construído pela a Universidade de Brasília para o estudo de FACIO (1991) e pesquisas posteriores.

O equipamento consiste em uma estrutura metálica, composta de três rampas hidráulicas articulada de 33 cm de largura e 100 cm de comprimento cada uma, com inclinações variáveis de 0° a 60°, sendo suportada por uma barra metálica fixa na estrutura principal. Estas rampas são dotadas de uma abertura circular central de 10 cm de diâmetro, onde é acoplado um anel contendo a amostra de solo/rocha indeformada, de tal maneira, que seu nível superior coincida com o nível da rampa, para que o escoamento laminar entre em contato com o topo da amostra. As amostras estão confinadas em anéis de PVC, biselados na parte inferior, com 10 cm de diâmetro e 10 cm de altura.

Na parte superior da rampa, uma fôrma metálica esta anexada ao sistema e possui a função de regularização do fluxo d'água fornecido diretamente da rede hidráulica, através da abertura de um registro. A vazão utilizada para o ensaio é controlada por um rotâmetro, estando este, interligado a canalização. A água e o solo desagregado pelo fluxo são coletados em baldes plásticos e posteriormente, passados por um conjunto de peneiras de malhas 0,25 mm (peneira #60), 0,15 mm (peneira #100), 0,075 mm (peneira #200).

As variáveis de ensaio adotadas foram determinadas de acordo com os parâmetros observados em campo. A inclinação da rampa metálica foi de 40°, com vazão de água de aproximadamente 120 l/h, em amostras de solo na condição de umidade natural. O material erodido foi recolhido por diferentes baldes de PVC nos tempos de 1, 5, 10 e 20 minutos.

Um esquema típico do ensaio Inderbitzen publicado em Fonseca e Ferreira (1981) é apresentado a seguir na **Figura 10.3-4**.

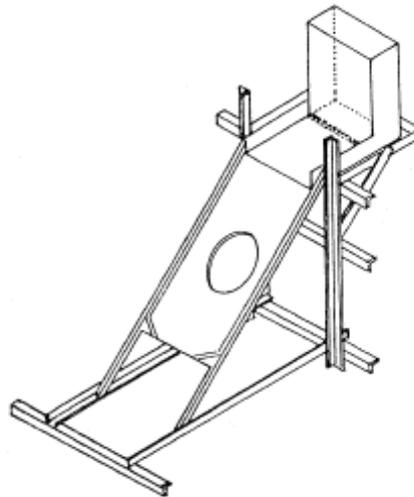


Figura 10.3-4 - Esquema do equipamento Inderbitzen da Universidade de Brasília, que é idêntico ao usado pelo IPR/COPPE aqui apresentado (Fonseca & Ferreira, 1981).

LEVANTAMENTO GEOFÍSICO COMPLEMENTAR

GPR

Na área urbana de Altamira, visando a identificação do topo do nível d'água entre os poços de monitoramento instalados, foram realizadas seções de GPR com o equipamento SIR-3000 (fabricado pela *Geophysical Survey Systems Inc.*), que consiste em um módulo de aquisição conectado a um par de antenas blindadas de 200 MHz (**Figura 10.3-5**).





Figura 10.3-5 - Fotografias ilustram a aquisição de dados de GPR ao longo da área urbana de Altamira/PA.

Todos os perfis de GPR foram adquiridos no modo *common offset* (afastamento comum), e os parâmetros de aquisição de dados foram:

- 1024 amostras por traço, correspondendo a um intervalo de amostragem temporal de 0,1953 ns;
- A frequência de amostragem temporal foi de 2550 MHz, resultando em uma janela temporal de 200 ns;
- O intervalo de amostragem entre os traços foi de 5 cm. Esta amostragem foi realizada automaticamente com o uso de um odômetro eletrônico (roda);

A distribuição dos perfis foi feita na área em função da distribuição dos poços de monitoramento, com o objetivo de verificar o comportamento do nível d'água e correlacionar com maior detalhamento as interfaces geológicas entre os mesmos, possibilitando assim elaborar um modelo hidrogeológico mais preciso.

Os dados de GPR 2D foram processados no software *ReflexW*, versão 5.5 (SANDMEIER, 2010). A rotina de processamento dos dados consistiu em:

- Conversão de formato dos arquivos - os arquivos do SIR3000 possuem extensão *.dzt, deste modo o ReflexW converte estes arquivos para o formato *.ASCII, possibilitando assim o processamento e visualização conjunta dos dados;
- Ajuste do tempo zero - definição da disposição do tempo zero do radargrama. Para o ajuste do tempo zero e da identificação do refletor correspondente aos alvos, os tempos de trânsito da onda eletromagnética foram ajustados, conforme o pico positivo da *wavelet* refletida (YELF, 2004). De acordo com a frequência da antena, a posição do pico é modificada. Frequências menores possuem um maior comprimento de onda, aumentando assim o erro de posicionamento dos refletores;
- Filtragem temporal 1D - remoção de frequências não desejadas (ruídos). Após a análise do espectro de amplitude dos dados, definem-se as frequências máximas e mínimas que serão utilizadas nos filtros. O filtro *subtract-mean (dewow)* remove os ruídos de grande comprimento de onda (baixa frequência) relacionados a frequências de equipamentos eletrônicos. O filtro passa banda (*bandpassfrequency*) atua em cada traço independentemente do domínio da frequência, sendo utilizado para retirar ruídos aleatórios na faixa de frequência diferente do da antena;
- Filtragem 2D (remoção de background - ruído de fundo) - este filtro 2D permite remover os ruídos horizontais. Quando um valor, diferente de zero, é utilizado, a filtragem passa alta ocorre na direção horizontal. Estruturas de baixa frequência nos dados foram removidas, tal como a reverberações da onda EM.
- Aplicação de ganho (decaimento de energia) - usado com o intuito de melhorar a visualização de refletores fracos. O *energy decay* é aplicado para recuperar a energia da onda eletromagnética perdida principalmente pela atenuação do sinal pelo espalhamento de energia. Ativando-se esta opção, um ganho é aplicado na direção do eixo do tempo em cada traço. Este ganho é baseado na curva de decaimento médio de amplitude. Primeiro uma curva de decaimento médio é determinada de todos os traços existentes do perfil. Depois da aplicação de um filtro de mediana nesta curva, cada amostra do traço é dividida pelo valor da curva de decaimento. Frequentemente é necessário aplicar um fator de escala (parâmetro de multiplicação) menor do que um porque após a aplicação deste ganho, alguns valores de amplitude excederão a amplitude máxima do perfil original (SANDMEIER, 2010);
- Migração dos dados – a migração das difrações¹ (*diffraction stack migration*, GAZDAG & SGUAZZERO, 1984) foi efetuada para melhorar o posicionamento dos alvos nas seções de GPR. O propósito da migração é reconstruir o mapa de refletividade da terra pelo registro GPR obtido em superfície. O termo migração refere-se ao movimento dos eventos observados para a sua posição espacial verdadeira. A migração é um processo inverso no qual as ondas registradas são propagadas de volta à localização correspondente ao difrator (GAZDAG & SGUAZZERO, 1984) e
- Conversão da seção de tempo para profundidade – realizou-se um ajuste hiperbólico de alguns pontos de difração (tubulações) encontrados ao longo dos perfis. A

¹ A difração é um evento que ocorre nos registros sísmicos e de GPR, de traçado aproximadamente hiperbólico, causado por uma descontinuidade do meio (DUARTE, 2003). No caso deste relatório, as barras de aço presentes no pavimento rígido, devido ao seu diâmetro, comportam-se como eventos hiperbólicos.

velocidade média obtida foi de 0,09 m/ns, utilizada na inversão dos dados (tempo para profundidade).

Eletrorresistividade

A eletrorresistividade é um método geoeletrico baseado na determinação da resistividade elétrica dos materiais, tendo sido utilizado nos mais variados campos de aplicação das geociências.

O método da eletrorresistividade baseia-se no estudo do potencial elétrico tanto dos campos elétricos naturais, existentes na crosta terrestre, como dos campos artificialmente provocados. A partir de medições do potencial elétrico na superfície pode-se determinar, no subsolo, a existência de corpos minerais e reconhecer estruturas geológicas (TELFORD *et al*, 1990).

Os campos elétricos estudados em prospecção são bastante variados. Alguns minerais podem atuar como uma bateria e criar seu próprio campo elétrico, constituindo um método especial chamado de potencial espontâneo. O mais frequente é enviar energia ao terreno, criando assim, campos artificiais cuja deformação permite deduzir características geológicas ou minerais do subsolo. Para tal, utiliza-se corrente contínua ou corrente alternada, sendo esta última a mais usada. As frequências utilizadas em prospecção são, preferencialmente, as mais baixas possíveis devido ao fato de que a profundidade de penetração diminui à medida que se aumenta a frequência.

Suas principais aplicações encontram-se nos mapeamentos geológicos, mineração, prospecção de água subterrânea, engenharia civil e meio ambiente.

Do ponto de vista econômico, a principal vantagem do método elétrico é o seu baixo custo.

Na prospecção elétrica utilizam-se, em geral, três propriedades fundamentais:

- a) Resistividade: define a quantidade de corrente elétrica que atravessa uma camada quando aplicado uma diferença de potencial;
- b) Constante dielétrica: define a capacidade de armazenamento de cargas elétricas nos materiais, geradas pela introdução de corrente alternada de alta frequência no subsolo; e.
- c) Atividade eletroquímica da rocha: responsável pelo aparecimento de correntes elétricas naturais geradas sem qualquer influência dos campos elétricos artificiais.

Qualitativamente, resistividade é uma medida de dificuldade que um determinado material impõe à passagem de uma dada corrente elétrica ou, o inverso, a condutividade é a facilidade com que a corrente elétrica passa através de certo material.

Os dispositivos para medidas de resistividade elétrica consistem, comumente, de um sistema de quatro eletrodos, sendo dois deles usados para enviar uma corrente elétrica (I) ao solo (eletrodos C1 e C2, **Figura 10.3-6**), e os outros dois (eletrodos P1 e P2, **Figura 10.3-6**) usados para medir a diferença de potencial (ΔV) entre eles.

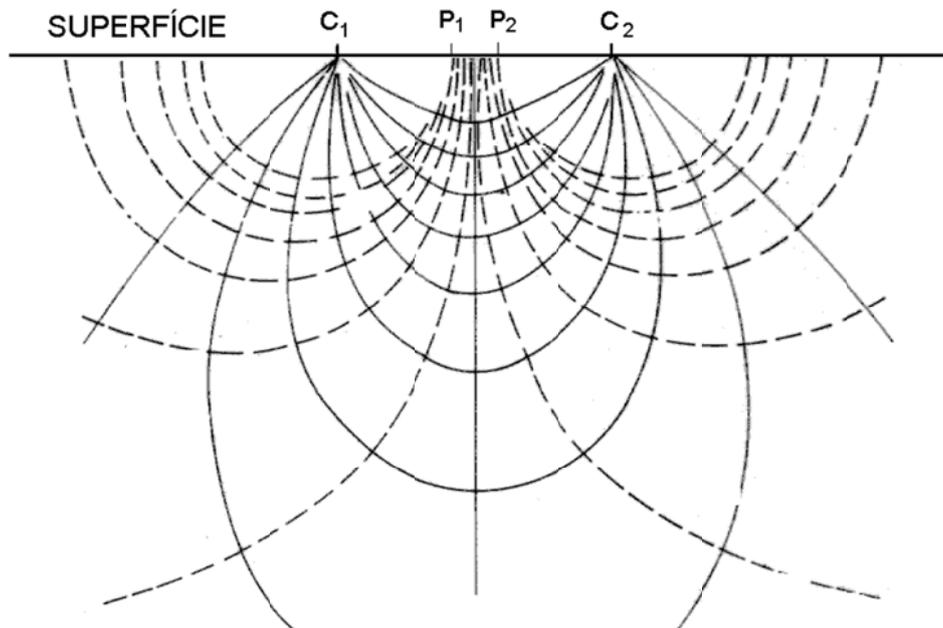


Figura 10.3-6 - Esquema da distribuição dos eletrodos no solo durante uma aquisição de eletrorresistividade. As linhas cheias indicam o fluxo de corrente no solo, ao passo que as linhas pontilhadas indicam as linhas de equipotenciais geradas pela corrente.

Obtendo-se a diferença de potencial e a corrente que flui no meio, a resistividade elétrica aparente do meio (Eq. 4.1) dependerá somente do fator geométrico (K). Este último é função somente da configuração dos eletrodos no terreno (Eq. 4.2).

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K \quad (\text{Eq. 4.1}).$$

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} + \frac{1}{r_{C2P2}} \right)} \quad (\text{Eq. 4.2}).$$

onde, ρ_a é a resistividade elétrica aparente do meio; r_{C1P1} , r_{C2P1} , r_{C1P2} e r_{C2P2} são as distâncias entre os eletrodos de corrente e de potencial.

No método da eletrorresistividade existem várias técnicas de levantamentos de campo, divididas basicamente em sondagem elétrica vertical (SEV) e tomografia

elétrica (caminhamento elétrico), dentro das quais existe uma grande variedade de configurações possíveis de eletrodos que confere a técnica uma grande versatilidade (LOKE, 2004). Normalmente, os ensaios de SEV são realizados quando se deseja uma informação pontual da resistividade, ao passo que no caminhamento elétrico o objetivo é o estudo da variação lateral da resistividade (TELFORD *et al.*, 1990)

A tomográfica elétrica, como citada anteriormente, possibilita o mapeamento lateral de resistividade elétrica. Nesta técnica, o posicionamento dos eletrodos (potencial e corrente) pode ser realizado de diversas maneiras (arranjos Wenner, polo-polo, polo-dipolo, dipolo-dipolo, Wenner-Schlumberger e gradiente), dependendo do objetivo da investigação (WARD, 1990). Cada arranjo possui uma característica comum como resolução (dipolo-dipolo e polo-dipolo), profundidade de investigação (polo-polo) e razão sinal/ruído (Wenner e Wenner-Schlumberger).

Em aplicações para prospecção mineral, o arranjo dipolo-dipolo mostra-se mais efetivo entre os demais (ELIS, 1998; GALLAS, 2000). Neste arranjo, as fontes de corrente (transmissores) são distanciadas dos receptores em uma distância fixa para cada nível de investigação. Para aumentar a profundidade e o nível investigado, aumenta-se a distância (X) entre o transmissor e os receptores. As medidas são efetuadas em vários níveis de investigação (n), isto é, $n = 1, 2, 3, 4, 5\dots$ é o ponto de intersecção entre uma linha que parte do centro dos eletrodos de corrente e outra que parte do centro dos eletrodos de potencial, com ângulos de 45° (**Figura 10.3-7**).

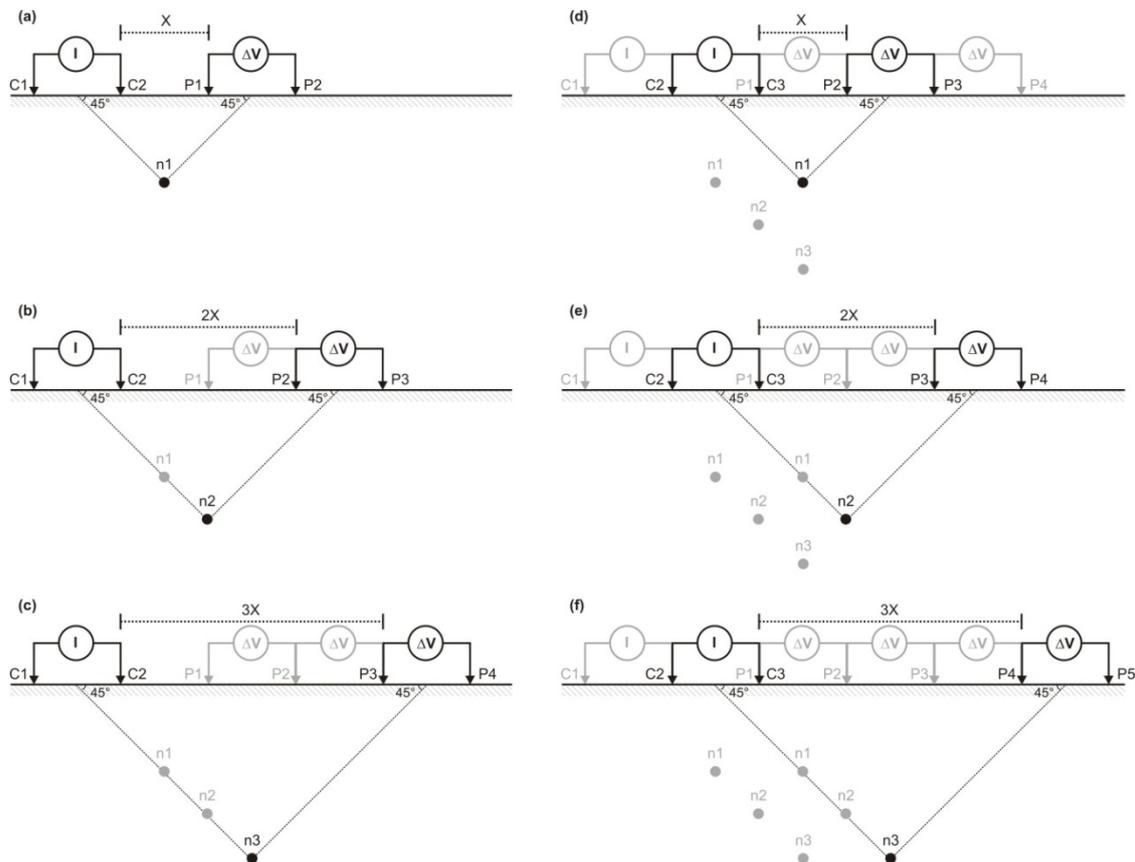


Figura 10.3-7 - Esquema sequencial de aquisição de dados utilizado em caminhamentos elétricos com o arranjo dipolo-dipolo (adaptada de ELIS, 1998).

O resultado da aquisição é um conjunto de dados de resistividade elétrica obtido em n profundidades que formam uma pseudoseção (ELIS, 1998). Esta por sua vez, reflete o comportamento do subsolo em resposta à passagem de correntes elétricas. Cada material geológico mostra um intervalo bem amplo de resistividade, que depende principalmente da composição mineralógica da rocha, da quantidade de fluídos presentes nos poros da rocha, e da salinidade do fluído.

No caso de pacotes rochosos, a resistividade elétrica serve para identificar principalmente as estruturas geológicas, visto o volume de rocha/material em que a corrente flui, possibilitando assim, identificar desde camadas horizontalizadas a zonas de cisalhamento.