

Anexo 10.3-2 – Metodologias Aplicadas

Classificação de Solos segundo Sistema Unificado de Classificação dos Solos - SUCS

Dada a infinidade de solos que existem na natureza é necessário um sistema de classificação que indique características geotécnicas comuns de um determinado grupo de solos a partir de ensaios simples de identificação.

Portanto, a elaboração de um sistema de classificação deve partir dos conhecimentos qualitativos e quantitativos existentes, ao longo do tempo ir acumulando informações e corrigindo distorções, até que em um mesmo grupo possam estar colocados solos com características semelhantes. No desenvolvimento de um sistema, se deve ter o cuidado para que o volume de informações requeridas ao usuário seja de fácil memorização, para que se torne prático. Estas informações poderão ser obtidas, tanto através da identificação visual e tátil como através de ensaios simples de laboratório.

A identificação fornecerá dados para um conhecimento qualitativo, enquanto os ensaios de laboratório resultarão dados quantitativos sobre o solo. Conclui-se que a classificação dos solos permite resolver alguns problemas simples e serve de apoio na seleção de um dado solo quando se podem escolher vários materiais a serem utilizados. Apesar das inúmeras limitações a que estão sujeitas as diferentes classificações, estas constituem um meio prático para a caracterização e identificação dos solos. Existem diversos sistemas de classificação, podendo ser estes específicos ou não. Assim, tem-se um sistema com base na origem dos solos (residuais, transportados/sedimentares ou orgânicos), um sistema de classificação pedológica (solos zonais, intrazonais e azonais), um sistema com base na textura (tamanho das partículas), um sistema de classificação visual e tátil, e sistemas que levam em consideração parâmetros do solo (Geotécnicos - SUCS, HRB/AASHO, MCT).

Este sistema é oriundo do *Airfield Classification System* idealizado por Arthur Casagrande, e inicialmente utilizado para classificação de solos para construção de aeroportos, e depois expandido para outras aplicações, e normalizado pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 1985).

Os solos neste sistema são classificados em solos grossos, solos finos e altamente orgânicos. Para a fração grossa, foram mantidas as características granulométricas como parâmetros mais representativos para a sua classificação, enquanto que para fração fina, Casagrande optou por usar os limites de consistência, por serem parâmetros mais importantes do que o tamanho das partículas.

Cada tipo de solo tem um símbolo e um nome. Os nomes dos grupos são simbolizados por um par de letras. Onde o prefixo é uma das subdivisões ligada ao tipo de solo, e o sufixo, às características granulométricas e à plasticidade.

Na **Figura 10.3-1**, nas duas últimas colunas, estão indicados os símbolos de cada grupo e seus respectivos nomes, bem como uma série de observações necessárias a

classificação do solo.

CRITÉRIOS DO SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS (ASTM, 1983)

CRITÉRIOS PARA DETERMINAÇÃO DOS SUBGRUPOS E NOMES DOS GRUPOS USANDO ENSAIOS DE LABORATÓRIO				CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS		
				SÍMBOLO GRUPO	NOME DO GRUPO	
Solos Grossos Pr ₂₀₀ > 50%	Pedregulhos mais que 50% da fração grossa retida na peneira 4,8mm (# 4)	Pedregulhos limpos Pp ₂₀₀ < 5% [3]	Cu ≥ 4 e 1 ≤ Cc ≤ 3	GW	Pedregulho bem graduado 5	
			Cu < 4 e/ou 1 > Cc > 3	GP	Pedregulho mal graduado 5	
		Pedregulhos com finos Pp ₂₀₀ > 12% [3]	Finos classificados como	ML MH	GM	Pedregulho siltoso 5, 6, 7
		CL CH		GC	Pedregulho argiloso 5, 6, 7	
	Areias mais que 50% da fração grossa passa na peneira 4,8mm (#4)	Areias limpas Pp ₂₀₀ < 5% [4]		Cu ≥ 6 e 1 ≤ Cc ≤ 3	SW	Areia bem graduada 8
				Cu < 6 e/ou 1 > Cc > 3	SP	Areia mal graduada 8
Areias com finos Pp ₂₀₀ > 12% [4]		Finos classificados como	ML MH	SM	Areia siltosa 6, 7, 8	
	CL CH		SC	Areia argilosa 6, 7, 8		
Solos Finos Pp ₂₀₀ ≥ 50%	Siltos e argilas LL < 50%	Inorgânicos	IP > 7, pontos sobre ou acima da linha A [9]	CL	Argila pouco plástica 10, 11, 12	
			IP < 4, pontos abaixo da linha A [9]	ML	Silte 10, 11, 12	
		Orgânicos	LL _{líquido} < 0,75 LL _{plástico}	OL	Argila orgânica 10, 11, 12, 13 Silte orgânico 10, 11, 12, 14	
	Siltos e argilas LL ≥ 50%	Inorgânicos	Pontos sobre ou acima da linha A	CH	Argila muito plástica 10, 11, 12	
			Pontos abaixo da linha A	MH	Silte elástico 10, 11, 12	
		Orgânicos	LL _{líquido} < 0,75 LL _{plástico}	OH	Argila orgânica 10, 11, 12, 15 Silte orgânico 10, 11, 12, 16	
Solos altamente orgânicos		Principalmente matéria orgânica, cor escura e cheiro		PT	Turfa	

1: Válido para material passando na peneira de 75mm abertura

2: Se a amostra contém seixos e matacões acrescentar "com seixos e matacões", ao nome do grupo para P₂₀₀ entre 5 - 12% exigem símbolo duplo.

3: Pedregulhos

- GW - CH: Pedregulho bem graduado com silte
- GW - GC: Pedregulho bem graduado com argila
- GP - GH: Pedregulho mal graduado com silte
- GP - GC: Pedregulho mal graduado com argila

4: Areias

- SW - SH: Areia bem graduada com silte
- SW - SC: Areia bem graduada com argila
- SP - SH: Areia mal graduada com silte
- SP - SC: Areia mal graduada com argila

5: Se % Areia ≥ 15, acrescentar "com areia"

6: Se finos: CL - ML, usar símbolo duplo: GC - GH; SC - SH

7: Se finos são orgânicos, acrescentar, "com finos orgânicos"

8: Se % Pedregulho ≥ 15%, acrescentar "com pedregulhos"

9: Se pontos estão na área hachurada, é CL - ML (argila-siltosa)

10: Se P₂₀₀: 15-29%, por "com areia" ou "com pedregulho",

Se P₂₀₀ ≥ 30%: 11: % pedregulho < 15%, acrescentar arenoso

12: % areia < 15%, acrescentar pedregulho

13: Para IP > 4%, e pontos sobre ou acima da linha A

14: Para IP < 4% ou pontos abaixo da linha A

15: Para pontos sobre ou acima da linha A

16: Para pontos abaixo da linha A

G	gravel	Cascalho (pedregulho)
S	sand	areia
C	clay	argila
W	well graded	bem graduado
P	poor graded	mal graduado
F	finos	finos (pas. # 200)
M	mo	mó ou limo (areia fina)
O	organic	matéria orgânica
L	low liquid limit	LL baixo
H	high liquid limit	LL alto
Pt	peat	turfa

Observação

$$Cu = D_{60} / D_{10}$$

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

Figura 10.3-1 – Características utilizadas para a classificação geotécnica dos solos.

Solos grossos

Os solos grossos ou granulares são os que possuem partículas menores que 75mm e que tenham mais do que 50% de partículas com tamanhos maiores do que 0,075mm (# 200). Uma subdivisão separa os solos grossos em pedregulhos, quando mais do que 50% da fração grossa tem partículas com tamanho maior do que 4,8mm (retido na # 4), e areias, quando uma porcentagem maior ou igual, destas partículas, tem tamanho menor que 4,8mm (passa na # 4). Sempre que as porcentagens de finos estiver entre 5 e 12%, o solo deverá ser representado por um símbolo duplo, sendo o primeiro o do solo grosso (GW, GP, SW, SP), enquanto que o segundo símbolo dependerá da região onde se localizar o ponto representativo dos finos desse solo. Para porcentagens de finos, maior do que 12%, e classificados como CL-ML resultará em um símbolo duplo para o solo grosso, GC-GM se for pedregulho ou SC-SM se for areia.

Solos finos

Nesta divisão, foram colocados os solos que tem uma porcentagem maior ou igual a 50%, de partículas com tamanho menor do que 0,075mm (passando na # 200). Estes solos, siltes e argilas, foram inicialmente separados em função do limite de liquidez: menor que 50% e maior ou igual a 50%. Cada uma destas subdivisões leva em conta a origem inorgânica ou orgânica do solo. Para a definição de origem orgânica deverão ser realizados dois ensaios de limite de liquidez: um com o solo secado em estufa, (LL)_s, e o outro nas condições naturais, (LL)_n. Se a relação (LL)_s/(LL)_n < 0,75 o solo deverá ser considerado orgânico. Quando da proposição inicial do sistema de classificação por Casagrande, foi introduzido o gráfico de plasticidade, montado a partir dos limites de consistência dos solos finos. Com a revisão do sistema foram introduzidas algumas modificações, resultando o gráfico mostrado na **Figura 10.3-2**.

Nela, os grupos estão distribuídos em cinco regiões, sendo a linha "A" separadora dos solos argilosos inorgânicos (CL, CH) dos siltosos inorgânicos (ML, MH). A linha vertical LL = 50% separa os solos de alta plasticidade (MH, CH) dos de baixa plasticidade (ML, CL). Os solos orgânicos podem se situar, tanto acima quanto abaixo da linha "A"; as argilas orgânicas serão representadas por pontos situados sobre ou acima dessa linha, enquanto, os siltes orgânicos estarão abaixo. A quinta região é a hachurada, onde o solo deverá ter o símbolo duplo, CL-ML, representando solos LL < 50% e $4 \leq IP \leq 7$. O gráfico de plasticidade deverá ser usado na classificação, tanto dos solos finos quanto da fração fina dos solos grossos.

Na última revisão do SUCS foi introduzida, a linha "U" para ajudar na avaliação dos resultados dos ensaios de limites de consistência, visto que ela deve representar um limite superior empírico para os solos naturais. Qualquer ponto que venha se situar acima dessa linha deve ter os resultados dos ensaios verificados. A linha "U", tanto quanto a linha "A", é quebrada, iniciando-se na vertical para LL = 16% até IP = 7% e a partir desse ponto tem a equação: $IP = 0,9 \cdot (LL - 8)$.

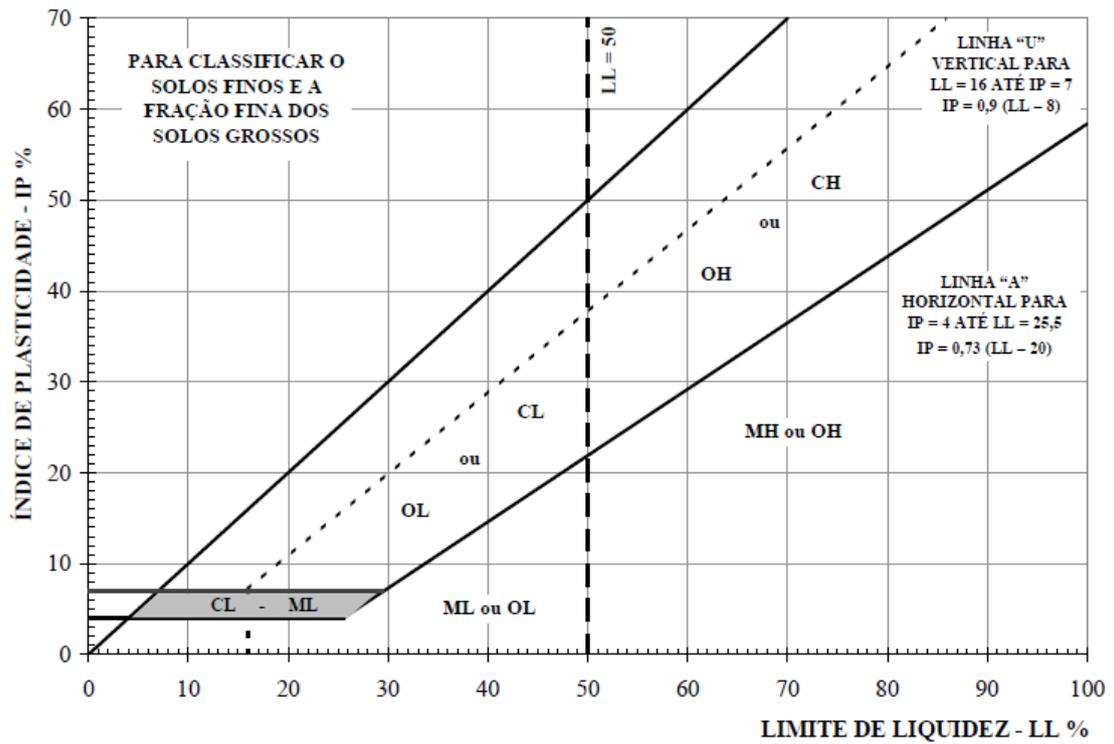


Figura 10.3-2 – Gráfico de índice de plasticidade versus limite de liquidez.

Classificação Tátil e Visual

Esta classificação é feita de tal forma que a maioria dos solos possam se enquadrar em três grupos (granulação grossa, granulação fina e altamente orgânica), através de um exame visual e alguns ensaios simples de campo.

Para a fração grossa, pedregulhos e areias, informações quanto à composição granulométrica, forma das partículas, existência ou não de finos são sempre necessárias; estas partículas são ásperas ao tato, visíveis ao olho nu e se separam quando secas. Para os solos finos, siltes e argilas, os principais ensaios de identificação no campo são:

- a) ensaio de dilatância;
- b) ensaio de plasticidade;
- c) determinação da resistência seca do solo;
- d) observações quanto à cor e cheiro (solos orgânicos).

Os itens a, b e c são feitos com material que passa na peneira nº 40 (0,42mm). No campo, muitas vezes, separa-se o material retido na peneira nº 40 fazendo-se o possível para retirar o material entre a peneira nº 10 e nº 40. O ensaio de dilatância consiste em adicionar água no material, tornando-o pegajoso. A massa formada deve ter um volume de 8 cm³ e é colocada na palma de uma das mãos em posição horizontal. Bate-se vigorosamente uma mão de encontro com a outra, várias vezes e espreme-se amassa entre os dedos. Segundo as reações ocorridas durante o ensaio de dilatância, os solos podem classificar-se em:

- solos não plásticos (siltes e areias) apresentam uma reação rápida (presença de água livre quando sacudido);
- solos altamente plásticos resultam em reação nula.

Portanto, dependendo da velocidade que a massa muda de consistência, define-se que a reação do teste é rápida, lenta ou nula.

Ensaio de plasticidade consiste em obter um cilindro de 3mm de diâmetro sobre uma superfície lisa ou entre as palmas da mão. À medida que o processo vai se desenvolvendo, o solo vem se tornando mais duro (perda de umidade). Os solos situados abaixo da linha "A" do gráfico de plasticidade formam cilindros frágeis e com exceção dos solos orgânicos. Estes solos resultam em cilindros muito moles e pegajosos quando estão próximos do limite de plasticidade. Quanto mais alta a posição do solo em relação à linha "A", mais resistentes são os cilindros ao se aproximarem ao limite de plasticidade.

O ensaio de resistência seca consiste em moldar uma amostra de solo úmido e deixar secar em estufa ou no ar livre. Após a secagem tenta-se desagregar a amostra com pressão dos dedos. De acordo com o esforço aplicado na amostra podemos definir como:

- os solos de pouca resistência seca (desagregam-se imediatamente com pequeno

esforço - solos siltosos);

- os solos de resistência seca razoável (desagregam-se com certo esforço - solos argilosos e orgânicos).

A cor serve para separar os horizontes de um perfil de solo e pode indicar a existência do nível do lençol freático. Utiliza-se em amostras de solos úmidos porque pode haver uma mudança razoável com a secagem. Adota-se a carta de cores de MUNSEEL preparado pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos.

Os solos de cor vermelha indicam a presença de óxidos de ferro e ausência do lençol freático próximo. Os solos de cor cinza ou manchados indicam que a variação do nível d'água. Quanto ao cheiro, os solos orgânicos apresentam, em geral, odor característico, que pode ajudar na identificação.

Os métodos para estimar a porcentagem passante na peneira nº 200 são muitos e a escolha depende do tempo, habilidade do técnico e equipamento disponível. Entre eles podemos citar:

- decantação - consiste em misturar solo com água num recipiente e derramar a mistura turva de água e solo. Repete-se a operação várias vezes, até conseguir remover praticamente todos os finos. Por comparação do resíduo com o material primitivo tem-se idéia da quantidade de finos.

- sedimentação - consiste em misturar água com o solo em uma proveta e agitar bastante. As partículas maiores irão depositar logo (areia deposita em 20 ou 30 segundos).

Coleta de Amostras Indeformadas

Para a retirada de amostras indeformadas visando à realização de análises de parâmetros geotécnicos foi utilizada uma metodologia alternativa à tradicionalmente aplicada para este fim. A principal diferença foi à substituição da caixa de madeira por uma seção de 20 cm de altura de tubo de PVC de 200 mm de diâmetro e uso de filme plástico em substituição ao uso de parafina.

A sequência de ações necessárias para a retirada da amostra inclui:

- Escavação de um bloco de cujo núcleo será retirado a amostra. Esta tarefa é realizada com auxílio de enxadão;
- Lapidação da porção externa do bloco em formato cilíndrico. Esta etapa deve ser feita com uso de espátulas, facas e facões;
- Encaixe do tubo de PVC. Pode ser utilizada marreta de borracha para facilitar o encaixe, entretanto sem uso de força excessiva;
- Corte da porção basal do bloco. Pode ser feita com uso de cabo de aço em solos mais macios ou com facão (para solos mais duros);
- Envolvimento com filme plástico.

Alguns cuidados devem ser especialmente observados durante o processo de retirada da amostra:

- A lapidação deve ser feita com muito cuidado e lentamente de forma a não se quebrar o bloco. Nesta etapa há o risco real de se perder a amostragem;
- O recorte da base também deve ser muito cuidadoso sob o risco de deformar a porção basal da amostra e também comprometer a amostragem;
- O envolvimento com filme de PVC deve ser com máxima compressão possível e em múltiplas camadas, de forma a manter a amostra firme e evitar a perda da umidade natural;
- O transporte da amostra deve ser em caixas de isopor com o máximo cuidado para evitar impactos e pequenos choques que também poderá comprometer a qualidade das análises.

A seguir ilustra-se o processo de retirada das amostras indeformadas (sequência de **Figuras 10.3-3 a 10.3-11**).



Figura 10.3-3 – Escavação do núcleo do bloco do qual será retirada a amostra indeformada



Figura 10.3-4 – Ilustração do bloco indeformado já separado da matriz do perfil de solo de onde a amostra será retirada



Figura 10.3-5 – Processo de lapidação do bloco utilizando o tubo de PVC como gabarito. Esta etapa deve ser feita com auxílio de pá reta, espátula e facão



Figura 10.3-6 – Amostra já lapidada pronta para o encaixe do tubo de PVC



Figura 10.3-7 – Processo de encaixe do tubo de PVC



Figura 10.3-8 – Uso de marreta de borracha em golpes leves para facilitar o encaixe da amostra sem deixar espaços entre a amostra e a porção

	<p>interna do tubo</p>
	
<p>Figura 10.3-9 – Processo de finalização da amostragem depois do recorte da base</p>	<p>Figura 10.3-10 – Envolvimento com uso de filme plástico que deve ser homogeneamente distribuído por toda a porção externa da amostra</p>
	
<p>Figura 10.3-11 – Transporte da amostra indeformada</p>	

Levantamento Geofísico Complementar

Para o levantamento geofísico complementar, no âmbito das atividades de investigações de campo, foi utilizado o *Ground Penetrating Radar* (GPR) que é um método eletromagnético que emprega ondas de rádio em altas frequências (normalmente entre 10 MHz a 3000 MHz) para identificar estruturas e feições geológicas rasas de subsuperfície ou localizar objetos enterrados pelo homem. O princípio físico e a metodologia de aquisição de dados GPR são semelhantes à técnica de reflexão sísmica e a técnica de sonar, com exceção de que o GPR é baseado na reflexão de ondas eletromagnéticas (ANNAN, 1992).

Esse método consiste na transmissão de ondas eletromagnéticas (EM), repetidamente radiadas para dentro do subsolo, por uma antena transmissora, colocada na superfície. A propagação do sinal EM depende da frequência do sinal transmitido e das propriedades elétricas dos materiais, as quais são principalmente dependentes do conteúdo de água presente no solo (TOPP et al., 1980). As mudanças das propriedades elétricas, em subsuperfície, fazem com que parte do sinal seja refletido. As ondas de radar refletidas e difratadas, em subsuperfície, e são recebidas através de outra antena denominada de antena receptora, também colocada na superfície da Terra (**Figura 10.3–12**). A energia refletida é então registrada em função do tempo de chegada, amplificada, digitalizada e gravada no disco rígido de um computador notebook (DANIELS, 1996). Após o processamento dos dados, o resultado obtido é uma imagem de alta resolução da subsuperfície.

O método GPR destaca-se em investigações rasas, devido a sua elevada resolução e aquisição de um grande volume de dados tomados em um pequeno intervalo de tempo (ANNAN, 1992). É um método relativamente novo, quando comparado com as demais metodologias geofísicas.

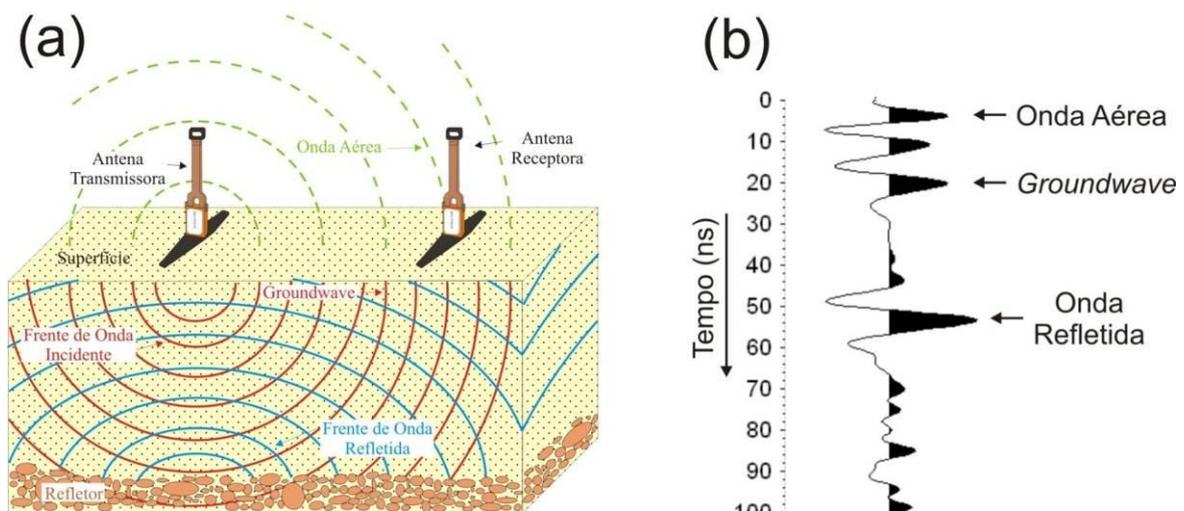


Figura 10.3–12 (a) Diagrama de antenas GPR (modo biestático) ilustrando o comportamento das frentes de onda. (b) Traço esquemático mostrando as chegadas das principais frentes de onda do GPR (BORGES, 2007).

Os fundamentos do GPR encontram-se na teoria de propagação de ondas eletromagnéticas (ANNAN, op. cit.; DANIELS, op. cit.). Para as baixas frequências (< 1

MHz) utilizadas na maioria dos métodos eletromagnéticos, os estudos de indução de correntes elétricas na Terra são adequadamente descritos por um processo de difusão do campo eletromagnético, em que as correntes de deslocamento podem ser desprezadas e somente as correntes de condução são consideradas. Entretanto, para as altas frequências do radar, tanto as correntes de condução, quanto as correntes de deslocamento devem ser consideradas (WARD; HOHMANN, 1987).

As equações de Maxwell são as bases para toda a teoria do GPR (ANNAN, op. cit.; DANIELS, op. cit.). Um bom detalhamento algébrico das equações de Maxwell, com ênfase no método GPR, pode ser encontrado em Porsani (1999).

Os fatores mais importantes que governam a propagação da onda EM, num determinado meio, são a velocidade e a atenuação. Para materiais geológicos com baixa perda, o campo EM propaga-se com uma velocidade (v) que depende, essencialmente, da constante dielétrica relativa (ϵ_r) dos materiais (Eq. 10.3-1).

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{Eq. 10.3-1}).$$

onde c é a velocidade da luz (0,3 m/ns).

Os principais fatores que influenciam a profundidade de penetração do sinal GPR são: o espalhamento geométrico, a atenuação pelo terreno e a partição da energia nas interfaces, todos relacionados à perda de energia durante a propagação da onda EM.

A profundidade de investigação e a resolução do GPR variam de acordo com a frequência da antena. Quanto maior a frequência, maior a resolução vertical e menor a profundidade de investigação, e vice-versa (**Quadro 10.3-1**).

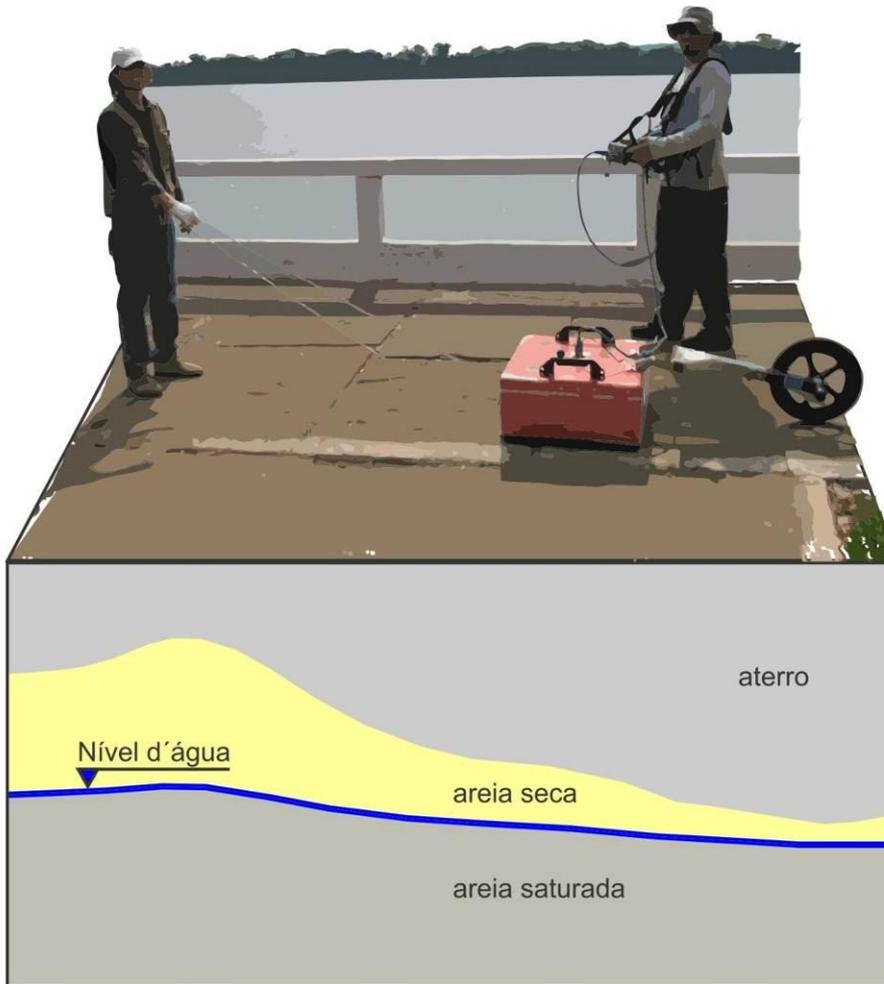
Existem três técnicas de aquisição de dados de GPR: perfis de reflexão (usando antenas monoestáticas ou biestáticas), sondagens de velocidade (*common mid point* – CMP e *wide angle reflection and refraction* – WARR) e transiluminação ou tomografia de radar (REYNOLDS, 1997; BOOTH et al., 2004).

Nos perfis de reflexão, uma ou mais antenas de radar são movidas simultaneamente na superfície do solo, e os traços são adquiridos em intervalos de distância ou tempo contínuos. O resultado é uma seção *common offset* ou *constant offset* sendo que o tempo de trânsito duplo está no eixo vertical e no eixo horizontal o número de traços, i.e., distância (**Figura 10.3–12**).

Quadro 10.3-1 – Frequência central da antena versus profundidade máxima de penetração do GPR (valores médios encontrados em solos brasileiros).

Frequência Central (MHz)	700	500	250	200	100	50
Profundidade Máxima de Penetração (m)	3	5	10	15	18	25

(a)



(b)

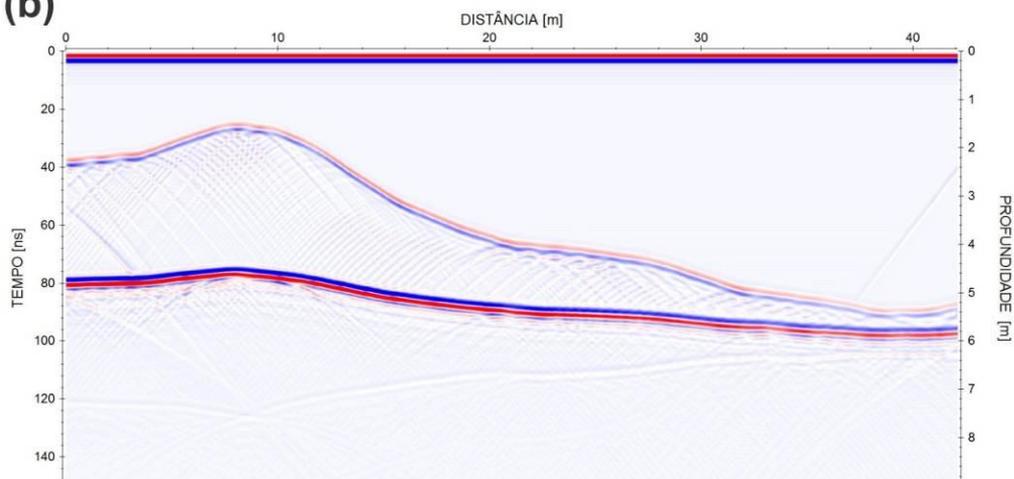


Figura 10.3–12 – (a) Representação esquemática de uma aquisição de dados de GPR em uma área onde o nível d'água está dentro de uma camada de areia. (b) Modelo sintético do tempo de trânsito da onda eletromagnética em resposta ao modelo hidrogeológico. A anomalia de alta amplitude, que ocorre a 80ns é relacionada ao topo da zona saturada (nível d'água).