

UNIDAD II

Resistividad del terreno y medición

Índice

Unidad II: “Resistividad del terreno y medición”

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	OBJETIVOS.....	2
3.	CONTENIDO	2
3.1.	La resistividad de los suelos	1
3.2.	Influencia en el comportamiento eléctrico del suelo	2
3.3.	Factores que determinan la resistividad de los suelos	3
3.3.1	Naturaleza de los suelos	3
3.3.2	La humedad.....	4
3.3.3	La temperatura del terreno	5
3.3.4	La concentración de sales disueltos	6
3.3.5	La compactación del terreno	7
3.3.6	La estratificación del terreno	8
3.4.	Generalidades de la medición de resistividad	3
3.5.	Finalidad de la medición de la resistividad	3
3.6.	Selección de los equipos de medición	3
3.6.1	Componentes del instrumento.....	3
3.6.2	Requisitos mínimos de instrumentos.....	5
3.6.3	Ensayos tipos.....	5
3.7.	Consideraciones para la medición	6
3.7.1	Precauciones para la medición.....	6
3.7.2	Casos no recomendables para las mediciones.....	6
3.8.	Métodos de medida de la resistividad.....	7
3.8.1	Método de tres electrodos.....	7
3.8.2	Método de los cuatro electrodos	8
3.8.2.1	Configuración de Wenner.....	9
3.8.2.2	Configuración de Schlumberger.....	12
3.8.3	Recomendación práctica	13
3.8.3.1	Parámetros de diseño con medidas Wenner	13
3.8.3.2	Parámetros de diseño – medida indirecta.....	14
3.9.	Resistividades típicas	10
4.	Resumen	25
5.	Preguntas de autoevaluación	26
6.	Respuestas a las preguntas de autoevaluación.....	27

UNIDAD II

"RESISTIVIDAD DEL TERRENO Y MEDICIÓN"

1. INTRODUCCIÓN

En esta unidad se define la resistividad y sus unidades, se describe al terreno desde su característica de conductor de la electricidad y su resistividad, así como los diferentes factores que influyen directamente en el aumento o disminución de esta resistividad.

Analizando el objetivo y la definición de la puesta a tierra de la unidad precedente, se llega a la conclusión que los elementos mas importantes que garantizan una buena puesta a tierra son las uniones metálicas directas entre determinadas partes de una instalación, el electrodo o electrodos en contacto permanente con el terreno y una buena resistividad del terreno.

Para saber el comportamiento del terreno tendremos que analizarlo desde el punto de vista eléctrico, como elemento encargado de disipar las corrientes anormales que lleguen a través de los electrodos, es decir, debemos conocer internamente las diversas resistividades del terreno.

La realización de una instalación de puesta a tierra requiere conocer previamente el perfil de la resistividad del terreno según la profundidad, de esta forma facilita la elección de la deposición de los electrodos de tierra que proporcione mejores resultados técnico – económicos.

Por otro lado, se debe efectuar mediciones para conocer la resistividad del terreno, sin embargo, es práctica usual prescindir de la medición en instalaciones de baja tensión y en lugares cuya intensidad de cortocircuito a tierra sea superior o igual a 16 KA, bastando el examen visual del terreno, pudiéndose estimar la resistividad por medio de la tabla de "resistividades típicas", en la que se dan unos valores referenciales.

Debe resaltarse que la estimación de la resistividad en base a la clasificación del suelo puede dar lugar a grandes errores que obligarían a las pertinentes correcciones posteriores, por lo tanto, debemos apostar o realizar las mediciones ya que es el valor que requerimos y que dependerá de la resistividad de los diferentes estratos y del espesor de cada uno de ellos.

Para efectuar una buena medición es necesario seleccionar adecuadamente el equipo de medición, conocer sus partes, los requisitos mínimos que deben cumplir estos equipos y debe verificarse las certificaciones de los ensayos tipos a las cuales se han sometido.

Actualmente, existen diferentes métodos de medición y en lo posible se ha tratado de resumir los métodos más efectivos para medir la resistividad del terreno.

2. OBJETIVOS

En esta unidad el participante debe lograr los siguientes objetivo:

1. Definir la resistividad del terreno.
2. Interpretar las unidades de la resistividad.
3. Identificar los factores que determinan la resistividad del terreno.
4. Seleccionar el equipo apropiado para medir la resistividad de terreno.
5. Diferenciar los métodos de medición de la resistividad del terreno

3. CONTENIDO

3.1. LA RESISTIVIDAD DE LOS SUELOS

La resistividad de los suelos se expresan en $\Omega\text{-m}$, $\Omega\text{-cm}$ ó $\Omega\text{-mm}$, que corresponde a la resistencia que presenta un cubo de 1 metro cúbico de suelo o aguas, entre sus paredes laterales (aristas) y se representa por la letra griega ρ .

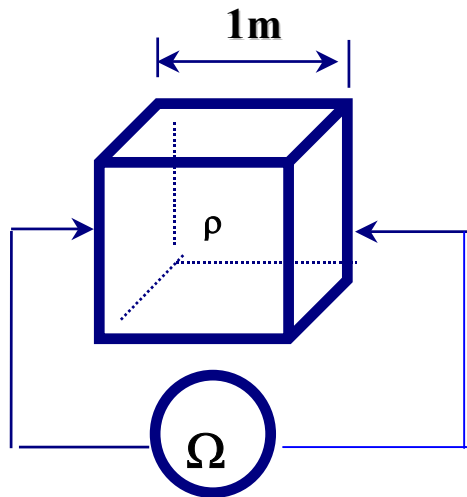


Fig 2.1 Resistividad de un cubo de terreno de 1m de arista.

Donde:

Dimensiones de ρ :

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

$$\rho = \frac{R \cdot s}{l} \Rightarrow \left(\frac{\Omega m^2}{m} \right) = \Omega m$$

para un cubo de 1m de lado :

$$R(\Omega) = \rho \frac{l(m)}{s(m^2)} = \rho \frac{1(m)}{(1 \times 1)m^2} = \frac{\rho}{1m}$$

despejando ρ , $\rho = R(\Omega m)$

Donde :

R = Resistencia en (Ω)

ρ = Resistividad en ($\Omega \cdot m$)

l = Longitud en (m)

S = Sección en (m^2)

La resistividad del terreno depende de su naturaleza, estratificación (capas de distinta composición), contenido de humedad, salinidad y temperatura. La resistividad de un terreno también se ve afectado por las variaciones estacionales.

Por otro lado, a medida que aumenta el tamaño de las partículas aumenta el valor de la resistividad, por ello la grava tiene mayor resistividad que la arena, y esta mayor resistividad que la arcilla.

Debido que las capas no son uniformes en un terreno, cuando se mide la resistividad se esta midiendo la resistividad aparente y por ello amerita determinar la resistividad de cada capa o estrato y sus espesores.

3.2. INFLUENCIAS EN EL COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO DEL SUELO

La tierra representa generalmente un mal conductor (gran contenido de oxido de silicio y óxido de aluminio que son altamente resistivos) pero gracias al amplio volumen disponible, se puede lograr a través de ella los niveles conductivos necesarios para su utilización auxiliar.

La conductividad representa un fenómeno esencialmente electroquímico o electrolítico, y por lo tanto, depende de la cantidad de agua depositada o el nivel de humidificación existente

Los suelos están compuestos principalmente, por óxidos de silicio y óxidos de aluminio que son muy buenos aislantes; sin embargo la presencia de sales y agua contenida en ellos, mejora notablemente la conductividad de los mismos.

3.3. FACTORES QUE DETERMINAN LA RESISTIVIDAD DE LOS SUELOS

En la resistividad del terreno influyen los siguientes factores y es necesario su evaluación:

- Naturaleza de los suelos.
- La humedad.
- La temperatura del terreno.
- La concentración de sales disueltas.
- La compactación del terreno.
- La estratificación del terreno.

3.3.1. NATURALEZA DE LOS SUELOS

Los suelos son buenos, regulares o malos conductores de la electricidad en función de su naturaleza. El análisis y conocimiento de esta naturaleza es el primer paso para la instalación adecuada del sistema de puesta a tierra.

En la tabla siguiente se muestra los valores característicos de la resistividad de los suelos, donde se puede apreciar que entre la resistividad del agua de mar y el hielo existe una gran diferencia y se puede concluir que el agua de mar es el que presenta la mas baja resistividad y por lo tanto un buen conductor de la electricidad.

Tipo de suelo o agua	Valor típico de resistividad (ohm-m)
Agua de mar	2
Arcilla	40
Aguas subterráneas	50
Arena	2000
Granito	25000
Hielo	100000

Tabla 2.1 Resistividades típicas según el tipo de suelo o agua.

El Agua de río, de pozos o de mar (con sales disueltas) es buena conductora, poco resistiva, comparable a los buenos terrenos.

Los suelos de grano muy fino son buenos conductores por lo general, mejores que los de grano medio, y estos a su vez mejores que los de grano grueso.

Los suelos pueden clasificarse según su granulometría en:

- Arcilla (greda)
- Arena finísima
- Arena fina
- Arena gruesa
- Cascajo grava
- Piedra suelta
- Roca.

3.3.2. LA HUMEDAD

La resistividad que presenta un terreno esta en relación directa a los porcentajes de humedad contenida en él; es decir, depende de su estado hidrométrico, al aumentar la humedad disminuye la resistividad y al disminuir la humedad aumenta la resistividad. En todo caso siempre que se añade agua a un terreno disminuye su resistividad respecto al que tendría en seco.

Se dice que el terreno esta "Saturado de agua" cuando todos sus intersticios esta llenos de agua. Una vez pasada la causa de la "saturación" el agua contenida en los espacios entre los diferentes agregados, debido a la gravedad se dirigirá hacia abajo quedando estos ínter espacios ocupados por aire en el interior de los agregados, al ser superior la fuerza de capilaridad que la gravedad.

El agua contenida en ellos no se mueve y en estas circunstancias, se dice que el terreno esta "saturado de humedad". En el siguiente gráfico figura 2.2 se puede observar la variación de resistividad en función de la humedad, en una muestra de arcilla roja, con el porcentaje de humedad contenida.

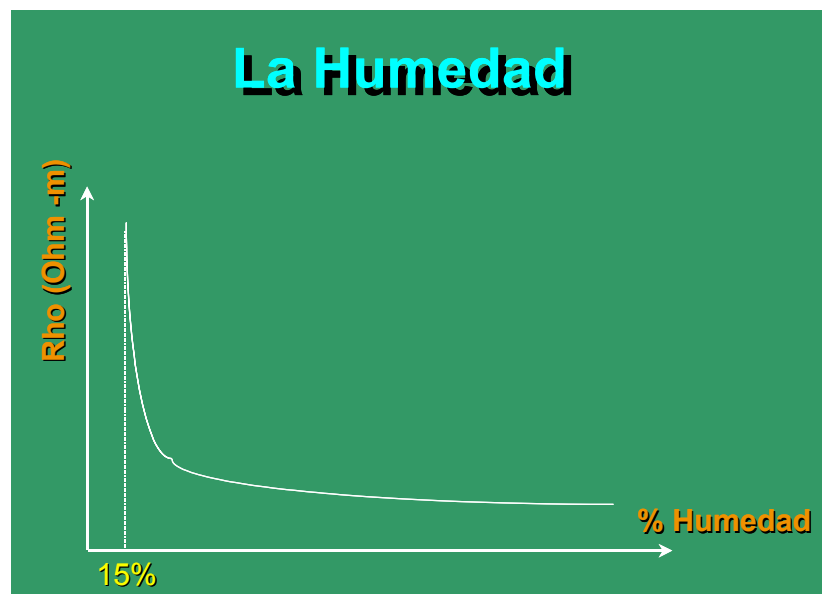


Fig. 2.2 Variación de la resistividad en función al porcentaje de humedad.

3.3.3. LA TEMPERATURA DEL TERRENO

La resistividad de los suelos, también depende de la temperatura, esta característica térmica del terreno depende de su composición, de su grado de compactación y del grado de humedad.

La resistividad del terreno aumenta al disminuir la temperatura, pero cuando el terreno se enfría por debajo de cero grados centígrados el agua que contiene se congela. El hielo es aislante desde el punto de vista eléctrico, lo que implica que la movilidad de los iones del terreno a través del agua se ve detenida al congelarse esta. Una forma de amortiguar este efecto en zonas con clima continental (inviernos fríos y veranos calurosos) deberá introducirse los electrodos a mayor profundidad. En el siguiente gráfico, figura 2.3, se puede observar como aumenta la resistividad de un terreno en función del descenso de la temperatura.

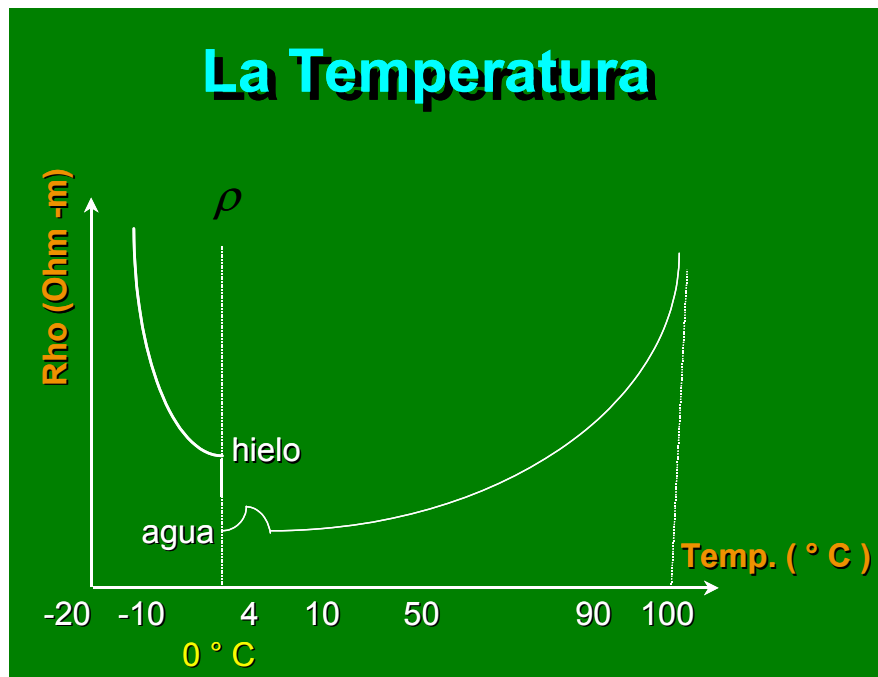


Fig. 2.3 Variación de la resistividad del terreno en función de la temperatura.

3.3.4. LA CONCENTRACIÓN DE SALES DISUELTAS

Al presentarse una mayor concentración de sales disueltas en un terreno, mejora notablemente la conductividad y por lo tanto la resistividad.

El agua hace que las sales penetren hacia la parte profunda del terreno, hacia la capa de depósito, y que un riesgo excesivo o una lluvias excesivas lavan el terreno y, por lo tanto, arrastran la sal que rodea los electrodos aumentando la resistividad.

Tampoco es aconsejable ubicar el electrodo cercano al cause del rio por que son terrenos muy lavados y por lo tanto más resistivos de lo normal.

El siguiente gráfico muestra la variación de la resistividad de un terreno en función del porcentaje de sal presente:

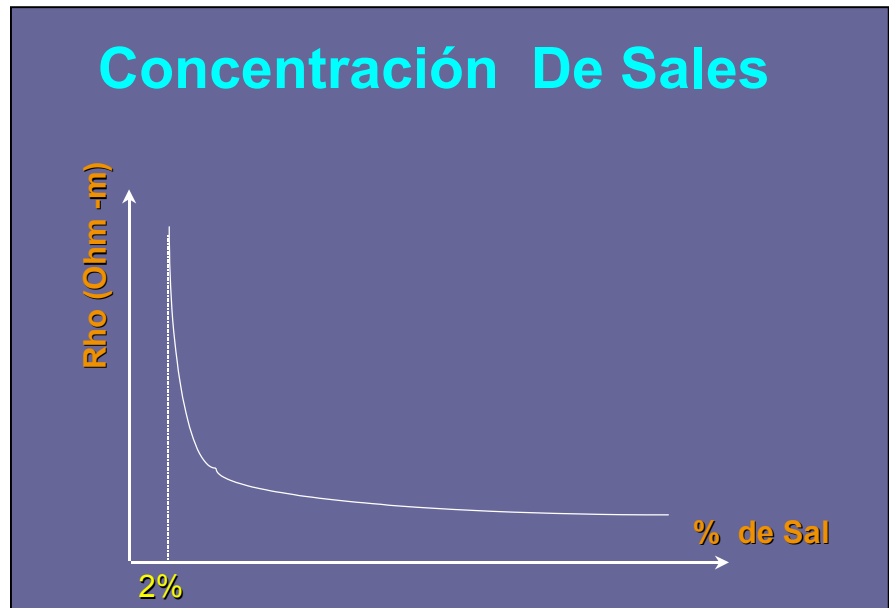


Fig. 2.4 Variación de la resistividad del terreno en función del % de sal.

3.3.5. LA COMPACTACIÓN DEL TERRENO

Cuando la compactación del terreno es grande disminuye la resistividad, por lo tanto es recomendable que exista un buen contacto entre electrodo y el terreno y por lo tanto es necesario una compactación

En el siguiente gráfico se muestra cualitativamente la influencia de la compactación del suelo, en la variación de la resistividad.

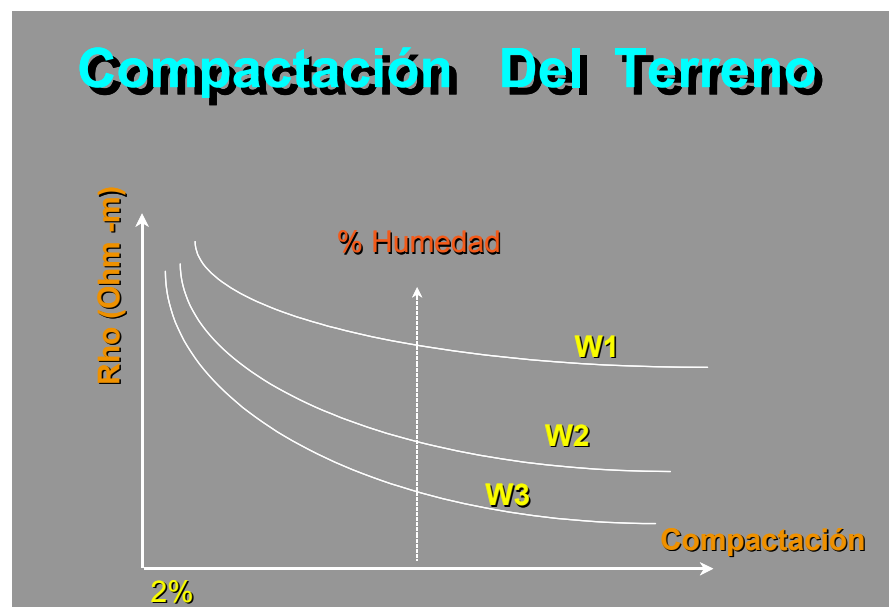


Fig. 2.5 Variación de la resistividad del terreno en función de la compactación del terreno.

3.3.6. LA ESTRATIFICACIÓN DEL TERRENO

El suelo esta formado por capas(estratos) que tienen diferentes resistividades y profundidades debido a la formación geológica que son generalmente horizontales y paralelas a la superficie.

Existen estratos que se presentan en forma inclinada o verticales debido a fallas geológicas pero para los estudios se asumen horizontales

El desconocimiento a priori de la resistividad de las capas inferiores obliga al estudio y medición de las mismas si se requiere conocer el valor de la puesta a tierra a una determinada profundidad.

Se puede afirmar que la resistividad a una profundidad de 5 m puede llegar a ser mayor que solamente a una profundidad de 1,5 m por tratarse de un terreno de una capa arcillosa.

En la siguiente figura se observa que el comportamiento de la resistividad del terreno no es uniforme y depende de la característica de los estratos y en un caso real se puede dar terrenos con diferentes capas con resistividades y espesores diversos que pueden ser mayor a lo requerido, por lo tanto no tendría éxito la puesta a tierra en esta capa.

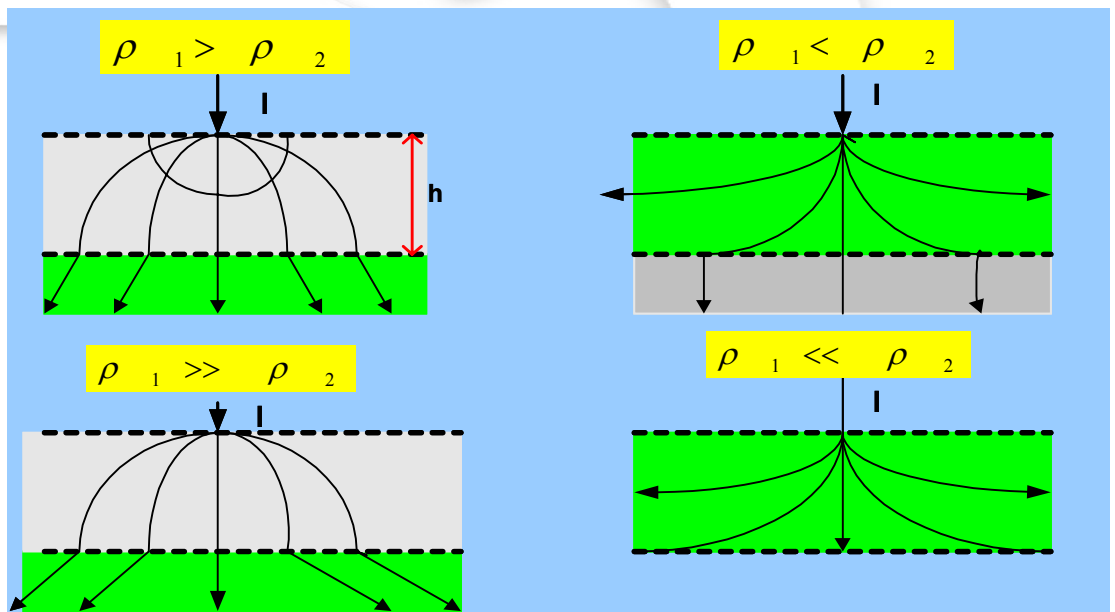


Fig. 2.6 Influencia de la estratificación del terreno.

3.4. GENERALIDADES DE LA MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD

Para conseguir un valor bajo de resistencia de puesta a tierra es necesario saber la resistividad del terreno y su espesor respectivo, para ello debe evaluarse el comportamiento del suelo como conductor eléctrico a partir de medidas realizadas con un instrumento llamado *Telurómetro*. En gran parte de las ciudades del país, a la profundidad que se entierran los electrodos de puesta a tierra (máximo 3,5 m) el suelo está compuesto mayormente de dos estratos:

- Un estrato superficial.
- Un estrato subyacente.

En la Fig. 2.7 se observa el modelo de suelo de dos estratos donde se tiene que cada estrato posee una resistividad y su respectiva profundidad, asimismo, cada estrato tiene diferente composición de terreno.

- **Un estrato superficial**

Generalmente de tierra limosa y/o tierra arenosa, con un espesor variable entre 0,3 y 1,2 m, normalmente seco en la costa y húmedo en la sierra y selva

- **Un estrato subyacente**

Constituido por conglomerados finos y pedregosos en la costa, así como rocosos y pedregosos en la sierra y selva alta.

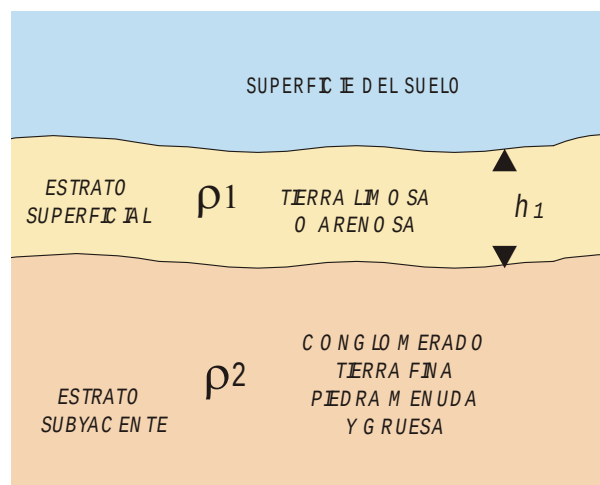


Fig. 2.7 Modelo de suelo de dos estratos (capas)

3.5. FINALIDAD DE LA MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD

El objetivo de la medición de la resistividad tiene las siguientes finalidades:

- Obtener la resistividad de cada estrato o capa.
- Encontrar la profundidad de los estratos o capa.
- Ubicación óptima de las instalaciones de puesta a tierra.

En la Fig. 2.8 se puede observar el flujo de dispersión de la corriente en un terreno de dos estratos en la que se indica los espesores que tiene cada estrato y su respectiva resistividad.

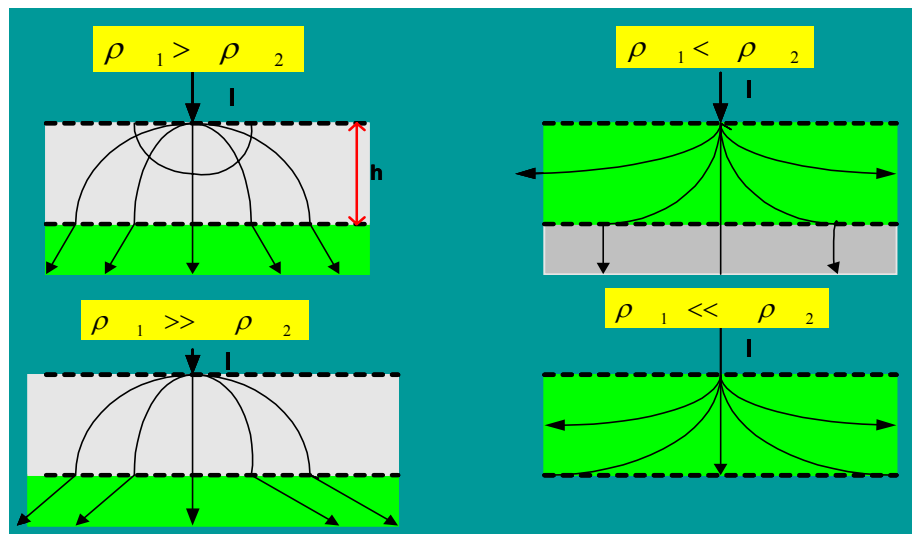


Fig. 2.8 Flujo de dispersión de la corriente en un terreno de dos estratos.

En las capas cuya resistividad es muy baja la corriente fluye con gran facilidad y en terrenos cuya resistividad es alta la corriente de falla a tierra tendrá oposición y no se dispersa en toda la capa.

3.6. SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN

Antes de efectuar una medición de resistividad es necesario seleccionar adecuadamente el equipo a utilizar y para ello se requiere saber cuáles son los componentes del instrumento, es decir, la fuente de potencia, sistema de medida, los requisitos mínimos que deben cumplir estos equipos y qué tipo de ensayo debe ser sometidos estos equipos.

3.6.1. COMPONENTES DEL INSTRUMENTO

Los componentes del instrumento son:

- Fuente de potencia
- Sistema de medida

- **Fuente de potencia:**

- Recomendable alterna o alterna pulsante, capaz de vencer la resistencia propia del circuito y del terreno, tensión entre 50 y 500 V. a una frecuencia de 60 a 70 Hz.
- Debido a la probabilidad de electrólisis no es recomendable fuente de tensión continua.
- En el caso de instrumentos a batería deberá disponer de rectificador estático DC/AC

- **Dispositivos para eliminar corrientes electrolíticas y de inducción:**

- Cuando la fuente es un generador manual, un rectificador mecánico será capaz de rectificar las corrientes electrolíticas y de inducción, de manera que la corriente neta por el circuito de medida sea cero.
- Cuando la fuente de potencia es una batería operada por un convertidor o transistor, el rectificador estático rechazará las corrientes de frecuencia diferente al de la corriente de prueba.

- **Sistema de medida:**

Básicamente se conocen tres sistemas de medida:

1. *Sistema voltímetro:* amperímetro o sistema ohmimétrico; ventaja: la resistencia de los electrodos de corriente no afectan la lectura del instrumento.
2. *Sistema comparador:* de resistencias, ofrece relativa facilidad en la lectura directa.
3. *Sistema de balance nulo:* debido al uso de electrodos de resistencia baja no afecta la lectura del instrumento.

Existen sistemas combinados entre sistema ohmimétrico y el sistema de balance nulo, mejorándose la medición de resistencias bajas.

3.6.2. REQUISITOS MÍNIMOS DE LOS INSTRUMENTOS

Existen tradicionalmente equipos analógicos y digitales, equipos que trabajan a manivela y a batería.

En la actualidad los equipos modernos deben cumplir con los siguientes requisitos:

- Compactos y de fácil traslado y permitir almacenamiento de información.
- Interfase para PC, accesorios, manual, medición multipolo (2,3,4) controlados por microprocesador.
- Opción para medición con pinzas y sin estacas.
- Al usar transductores de medición deben ser de similar clase de precisión.
- Deben tener certificaciones de los siguientes ensayos tipos: ensayo de aislamiento, ensayo de compatibilidad electromagnética, ensayos climáticos, ensayos mecánicos, ensayo de clase de precisión.

3.6.3. ENSAYOS TIPOS

Los equipos de medición para su funcionamiento adecuado en cualquier condición y para arrojar una lectura confiable, debe cumplir con ensayos tipos y deben tener certificaciones de los mismos, a continuación se indican los diferentes ensayos tipos:

- **Certificaciones de los siguientes ensayos tipos**

- Aislamiento: IEC 61000 – 4 – 2, IEC 61010 – 1
- Compatibilidad electromagnética: IEC 1000 – 4 – 2, IEC 61326 – 1
- Climáticos: DIN 40040
- Mecánicos: IEC 529, DIN 40050
- Clase de precisión: (+/-2%)
- Medición de RE: IEC 61557 – 5
- Fabricación: DIN ISO 9001

3.7. CONSIDERACIONES PARA LA MEDICIÓN

Es necesario saber las precauciones que deben tenerse presente antes de efectuar una medición y también, en que casos no es recomendable efectuar una medición.

3.7.1. PRECAUCIONES PARA LA MEDICIÓN

Las mediciones deben efectuarse en épocas apropiadas en la sierra en estiaje y en la costa en verano.

- Los electrodos de exploración deben tener un buen contacto con el terreno.
- Si el terreno es deslizante remover el material suelto hasta encontrar tierra firme.
- Si el suelo tiene capa gruesa de arena verter agua en el punto de clavado de los electrodos.
- Verificar el punto de contacto de la bornera de los instrumentos y la toma de los electrodos.
- Verificar los conductores gastados para evitar puntos de degradación del aislamiento.
- Verificar la presencia de corrientes inducidas.
- La resistencia de los electrodos auxiliares y conductores deben ser tal que no influyan en las mediciones.

3.7.2. CASOS NO RECOMENDABLES PARA LA MEDICIONES

Estas recomendaciones son producto de la experiencia práctica y sirven si se desea un resultado bueno.

Las recomendaciones a tomar en cuenta son:

- Después de una lluvia.
- Durante alta humedad ambiental.
- Cuando hay conductores pelados y no se logran buen contacto en el conexionado.
- Durante horas de tormenta.
- Durante horas de humedad, en la que se escucha chisporroteo en los aisladores.
- Durante la ejecución de trabajos de mantenimiento sobre la infraestructura en las proximidades.

3.8. MÉTODOS DE MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD

Para un análisis real del terreno es fundamental efectuar la medición de la resistividad del terreno. Los métodos de medición se pueden clasificar en:

- **Por el tipo de fuente:**

- Método Volt – amperímetro.
- Uso de instrumento específico.

- **Por el número de electrodos utilizados:**

- Método de tres electrodos.
- Método de cuatro electrodos.
- Configuración de Wenner.
- Configuración de Schulumberger.

3.8.1. MÉTODO DE LOS TRES ELECTRODOS

Básicamente consiste en medir la resistencia de puesta a tierra de un electrodo de dimensiones conocidas, enterrado en un terreno cuya resistividad se desea conocer (Fig. 2.9). El cálculo de la resistividad aparente a una profundidad dada, puede ser realizada utilizando cualquiera de las tres ecuaciones a, b, c; aunque se puede recomendar el uso de la ecuación "c" a partir de la cual se obtiene.

$$\rho_a = \frac{2 \pi L R}{\ln \frac{4L}{r} - 1}$$

Ecuaciones:

$$(a) R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L}{a}$$

$$(b) R = \frac{\rho}{2\pi L} \text{Arc sen } h \frac{L}{a}$$

$$(c) R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - I \right)$$

Donde:

- ρ_a : Resistividad aparente para una profundidad L (Ω - m)
- L : Longitud del electrodo enterrado en contacto con el suelo (metros)
- 2r : Diámetro del Electrodo (metros)
- R : Valor medido de la resistencia (ohmios)

Este método tiene muchas limitaciones, no obstante, actualmente es utilizado por algunas compañías.

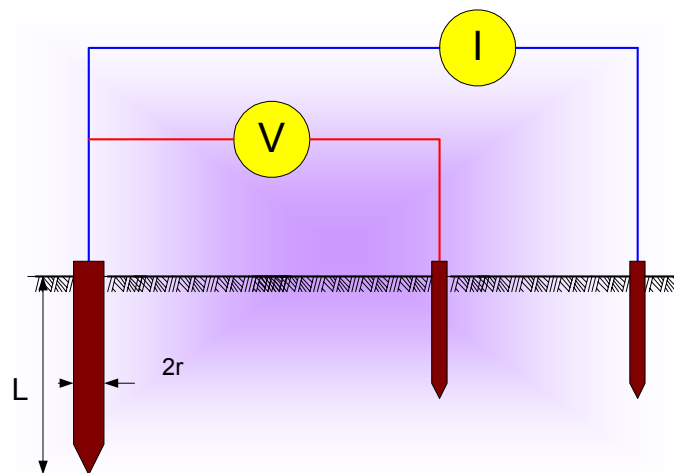


Fig. 2.9 Método de tres electrodos para la medición de resistividad

3.8.2. MÉTODO DE LOS CUATRO ELECTRODOS

El principio de este método está basado en la medición de la diferencia de potencial entre dos de los electrodos, luego de haber inyectado al terreno una corriente a través de los otros dos. La corriente inyectada puede ser corriente continua conmutada o corriente alterna de baja frecuencia (menores de 200 Hz) por razones de acoplamiento entre los conductores.

La ecuación fundamental para la medición de resistividad mediante cuatro electrodos, teniendo en cuenta la Fig. 2.10 es:

$$\rho = \frac{2\pi V}{I} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)}$$

Donde:

V : Diferencia de potencial entre dos electrodos
 I : Corriente inyectada
 r_1, r_2, r_3, r_4 : Distancia entre los electrodos de acuerdo a la figura 3.4.

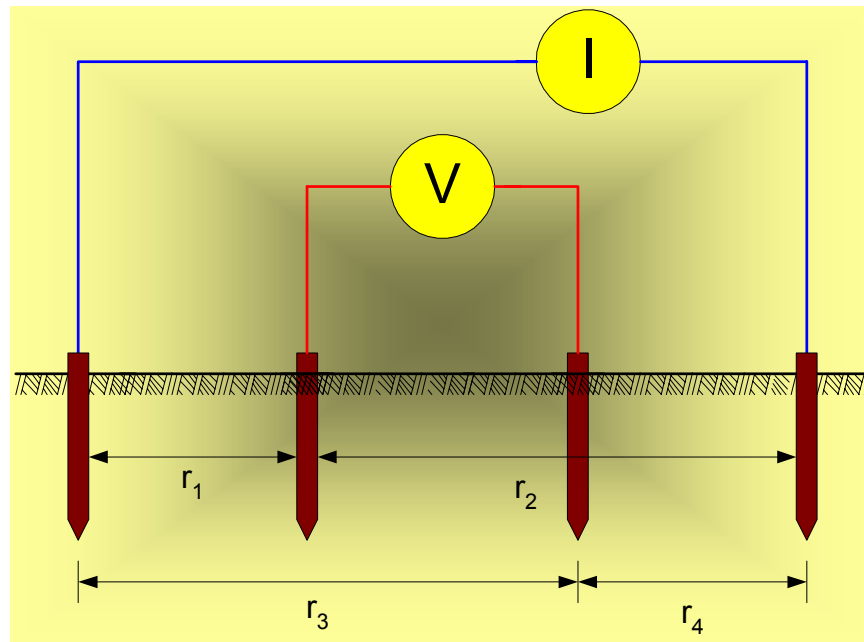


Fig. 2.10 Medición de la resistividad por el método de los cuatro electrodos.

Si el terreno considerado es homogéneo, el valor de la resistividad medida por este método corresponderá al valor único de resistividad presente en el terreno; pero si no es homogéneo, entonces el valor obtenido será ficticio, llamándose resistividad aparente y se designa por ρ_a .

Existen varias configuraciones clásicas de este método, dependiendo de la forma relativa en que se ubiquen los electrodos.

3.5.2.1 Configuración de Wenner

Para esta configuración, los cuatro electrodos se colocan en una línea recta, con igual separación y profundidad de penetración en el terreno (Fig. 2.11 b). El método de medición está basado en la ecuación que se muestra desarrollada por el Dr. Frank Wenner, donde los electrodos 1 y 4 (externos) se utilizan para inyectar la corriente y los electrodos 2 y 3 (centrales) sirven para medir la diferencia de potencial que al dividirse por la corriente inyectada da un valor de resistencia R . Luego:

$$\rho = \frac{4 \pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}}$$

O también:

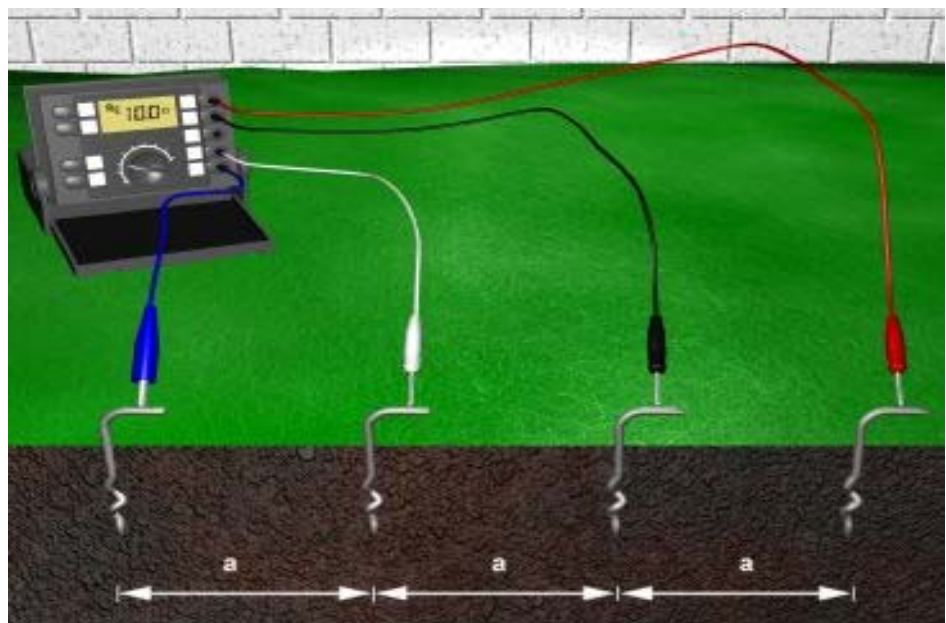
$$\rho = \frac{4 \pi a R}{n}$$

Donde:

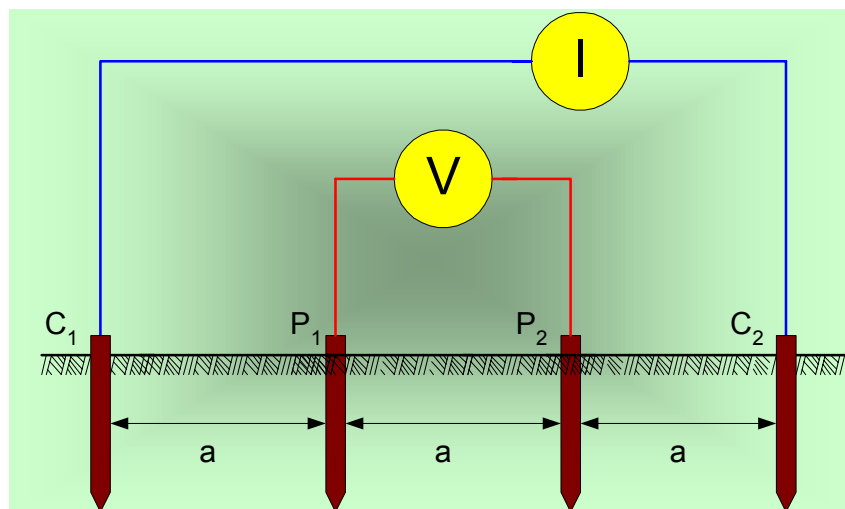
- ρ : Resistividad del terreno (ohmio – metro)
 R : Resistencia medida (ohmios)
 a : Distancia entre electrodos (metros)
 b : Profundidad de penetración de los electrodos (metros)
 n : Factor aproximado que tiene un valor entre 1 y 2 (depende de la relación b/a)

La segunda ecuación puede aproximarse a:

$$\begin{array}{lll} \rho & = & 4\pi a R \quad \text{Si } b > a \\ \rho & = & 2\pi a R \quad \text{Si } b < a \end{array}$$



(a)



(b)

Fig. 2.11 Configuración de Wenner

En la figura 2.11(a), también se puede observar el método de la configuración de Wenner utilizando un instrumento específico de cuatro terminales.

En la configuración de Wenner, los electrodos de corriente (C) y los electrodos de Potencial (P) pueden tener 3 arreglos alternativos, sin alterar el resultado de la resistividad que se va a medir, siempre y cuando se aplique la expresión adecuada. Estos arreglos son mostrados en la siguiente tabla, siendo el más frecuente utilizado para las mediciones el arreglo C – P – P – C.

TABLA 1

Arreglos alternativos en la configuración WENNER

C – P – P – C		$\rho_1 = 2\pi \ a \ R_1$
P – C – C – P		
C – C – P – P		$\rho_2 = 6\pi \ a \ R_2$
P – P – C – C		
C – P – C – P		$\rho_3 = 3\pi \ a \ R_3$
P – C – P – C		

La configuración de Wenner permite una visualización más rápida de la curva, ya que la resistividad puede ser obtenida en forma más directa a partir de los valores de resistencia R leídos en el instrumento. Por otro lado, se pueden utilizar instrumentos menos sensitivos que en la configuración Schlumberger, ya que a medida que se alejan los electrodos también lo hacen los de potencial.

3.5.2.2 Configuración de Schlumberger

Para esta configuración los cuatro electrodos se colocan también en línea recta, manteniendo la separación entre electrodos centrales o de potencial (a) constante; mientras que los electrodos exteriores varían su separación a partir de los electrodos interiores, a distancias múltiplos (na) de la separación base de los electrodos centrales (a), Fig. 2.12

La ecuación fundamental para este caso es:

$$\rho_{\text{asch}} = \pi R.n(n+1) a$$

Algunas de las ventajas de esta configuración son la rapidez con que se realizan las mediciones y la menor sensibilidad a las variaciones laterales del terreno, debido principalmente a que sólo se desplazan los electrodos de corriente, permaneciendo en su lugar los de potencial.

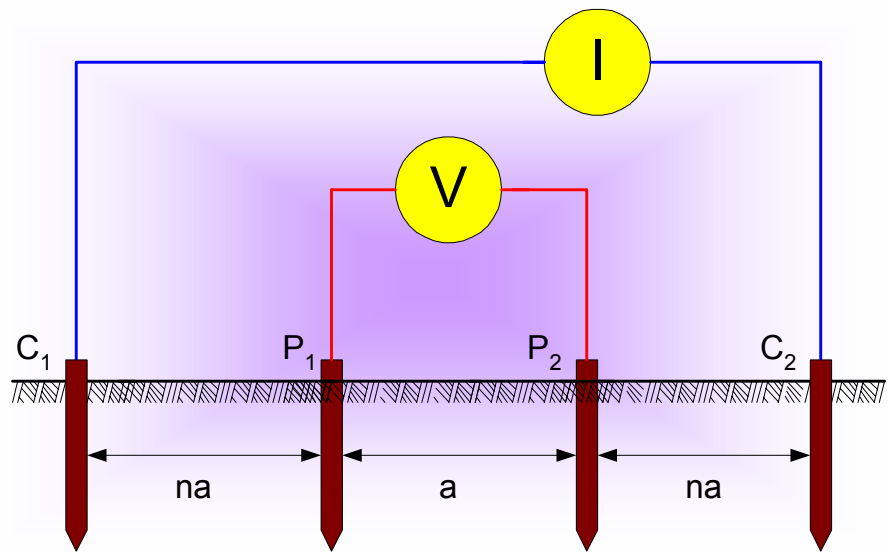


Fig. 2.12 Configuración de Schlumberger.

3.8.3. RECOMENDACIÓN PRÁCTICA

En la práctica se puede adoptar por los siguientes criterios:

3.5.3.1 Parámetros de diseño con medidas Wenner

Siendo restringido el espacio útil disponible para las medidas de resistividad aparente y riguroso el procesamiento formal de las magnitudes obtenidas para este caso particular se opta por un procedimiento expeditivo que permite la estimación gruesa de la resistividad de diseño.

Aplicando el método Wenner, se harán dos sondeos de medida (Fig. 2.13) para obtener (ρ_{ia}) cada uno con el despliegue de (04) electrodos clavados en suelo (C_1, P_1, P_2, C_2) firme a 0,1 m de profundidad y espaciados en línea recta a una misma distancia (a) de 1,0 m y luego 2,0 m

Procedimiento y Ejemplo

Sea un suelo de alta resistividad, típico en las ciudades de la costa (ejemplo).

- El espacio útil para medidas deberá tener por lo menos un radio de 3,0 m (Fig.2.14)
- 1° sondeo: Se obtiene ($\rho_{1a} = 326 \Omega\text{-m}$) para una distancia ($a=1,0$ m)
- 2° sondeo: se obtiene ($\rho_{2a} = 288 \Omega\text{-m}$) para una distancia ($a=2,0$ m)
- La resistividad de diseño a (1,5 m) de profundidad se estima en:

$$\rho = \frac{\rho_1^a + \rho_2^a}{2} = \frac{326 + 288}{2} = 307 \Omega - m$$

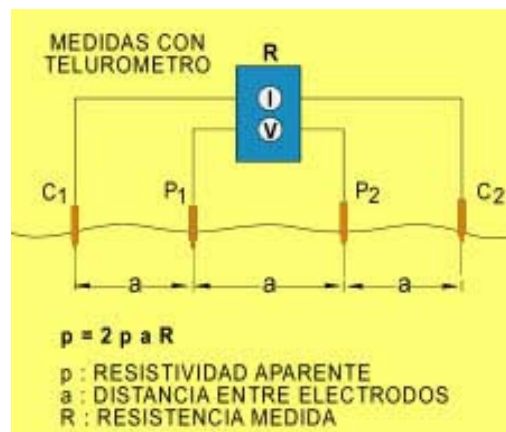


Fig. 2.13 Esquema de medidas de Wenner

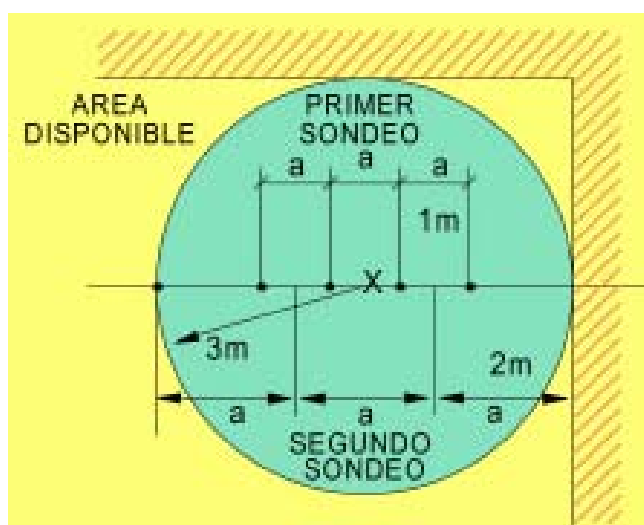


Fig. 2.14 Sondeos de medida Wenner en reducido espacio útil

3.5.3.2 Parámetros de Diseño – Medida Indirecta

Considerando idénticas restricciones de espacio útil, se puede aplicar la medida de la resistencia de dispersión (R) de un electrodo ($l = 1,2 \text{ m}$; $d = 0,013 \text{ m}$)

Explorador de fierro clavado a $1,0 \text{ m}$ de profundidad para evaluar la resistividad de diseño en valor equivalente. Esta alternativa muchas veces no se posibilita por la dificultad del clavado. (Fig. 2.15)

Aplicando el método de caída de potencial (Fig. 2.16) se harán dos medidas (R_i) al electrodo explorador (C_1) con dos despliegues de electrodos (P_2 , C_2) clavados en suelo firme (a $0,15 \text{ m}$ de profundidad) ambos en línea recta radial con la que se calcula finalmente:

$$\rho_i = 1,10 R_i$$

Procedimiento y Ejemplo

Tomando el mismo caso anterior:

- El espacio útil para medidas deberá tener al menos ($6,0 \text{ m}$) de largo. (Fig. 2.17)
- 1a. Medida: se calcula ($\rho_a = 295 \Omega \cdot \text{m}$) para ($d = 5,0 \text{ m}$, $p = 3,0 \text{ m}$ y $R_a = 236 \Omega$)

- 2da. Medida: se calcula ($\rho_b = 305 \, \Omega \cdot m$) para ($d = 6,0 \, m$, $p = 3,7 \, m$ y $R_b = 244 \, \Omega$)
- La resistividad de diseño a (1,5 m) de profundidad resultará:

$$\rho = \frac{\rho_a + \rho_b}{2} = \frac{295 + 305}{2} = 300 \, \Omega \cdot m$$

Para las medidas, el suelo tendrá que presentar su sequedad usual; el grass o las hierbas menudas serán retirados en la base de los electrodos; en suelos totalmente secos, se vertirá un poco de agua en el hueco de dichos electrodos clavados, en caso de no poder medir, asumir: $\rho = 300 \, \Omega \cdot m$

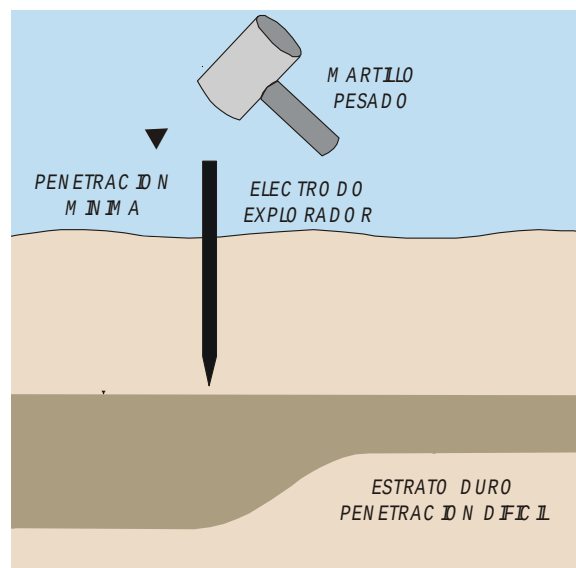


Fig. 2.15 Clavado del electrodo explorador

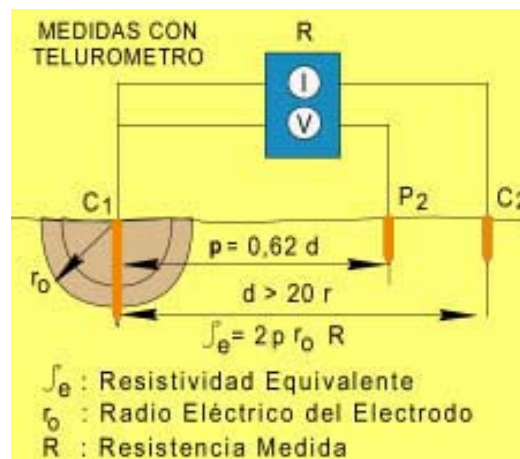


Fig. 2.16 Esquema de medida indirecta

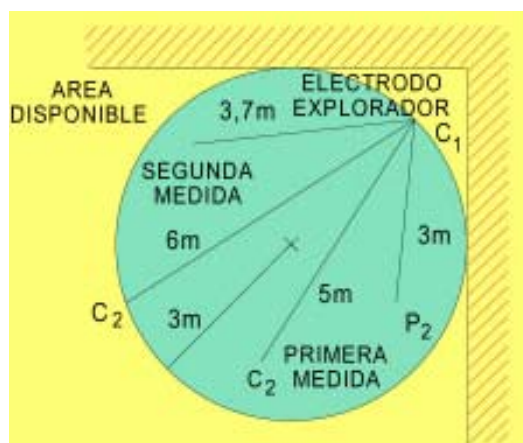


Fig. 2.17 Despliegue de medidas indirectas

3.9. RESISTIVIDADES TÍPICAS

El código nacional de electricidad Tomo I **prescripciones generales**, detalla las resistividades de los diferentes terrenos y en todo caso son valores referenciales durante el desarrollo de este curso:

NATURALEZA DEL TERRENO	RESISTIVIDAD Ohmios-m
Terreno pantanoso	Hasta 30
Limo	20 A 100
Humos	10 A 150
Turba Húmeda	5 A 100
Arcilla Plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 A 200
Margas de jurásico	30 A 40
Arena arcillosa	50 A 500
Arena silíceas	200 A 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 A 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 A 3000
Caliza blanda	100 A 300
Caliza compacta	1000 A 5000
Caliza agrietada	500 A 1000
Pizarra	50 A 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granito y gres procedentes de alteración	1500 A 10000
Granito y gres muy alterados	100 A 600

Los valores medios de resistividad de terrenos se muestran en el siguiente cuadro:

NATURALEZA DEL TERRENO	VALOR MEDIO DE LA RESISTIVIDAD Ohm - m
Terrenos cultivables y fértiles, terraplenes compactos y húmedos	50
Terreno cultivables poco fértiles, terraplenes en general	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables	3000

4. RESUMEN

Es muy importante conocer la resistividad del terreno ya que depende de ello para que la resistencia de puesta a tierra se conserve dentro del valor deseado.

Los diferentes factores que influyen en el comportamiento del suelo desde el punto de vista de su resistividad son: La naturaleza del terreno, la humedad, la temperatura del terreno, la concentración de sales disueltas, la compactación del terreno y la estratificación del mismo.

Entre los otros factores que pueden influenciar la resistividad del terreno esta la corriente que circula por el electrodo de puesta a tierra durante la falla que depende del contacto entre el electrodo y el terreno, una pobre unión entre terreno y electrodo frente al paso de la corriente de falla que generan potenciales que pueden acelerar el deterioro del electrodo.

El otro factor es la cantidad de calor que se genera, dado que toma dos trayectorias el que es absorbido por el volumen de terreo y las capas circundantes mas frías, circulando a través del terreno; este calentamiento puede alcanzar hasta 100° C, haciendo que la toma de tierra pierda su poder de evacuación y tienda a subir su potencial, obviamente esto se puede evitar haciendo que la causante de este calentamiento sea eliminado en el menor tiempo posible por los dispositivos de protección.

Las resistividades típicas de los terrenos se presentan en las normas y por ello se han tomado como valores referenciales para el desarrollo del presente curso.

Si se desea conocer la resistividad del terreno, es preciso diferenciar que existen dos tipos de estratos: Estrato superficial y estrato subyacente. Por lo tanto es necesario conocer la resistividad de cada estrato y su espesor respectivo, ello nos permite ubicar adecuadamente la instalación de puesta a tierra, o en algunos casos solo bastara con una inspección del terreno y por tablas conocer la resistividad.

La selección del equipo para la medición implica conocer las partes, es decir, si es a manivela, analógico o digital, si cuenta con microprocesador y si, sus resultados se pueden imprimir, además debe cumplir con los ensayos tipos y tener las certificaciones respectivas. Debe tenerse en cuenta las precauciones y no efectuar estas en situaciones no recomendados ya que ello influirá en los resultados.

Para la medición de la resistividad se puede utilizar el método voltímetro y amperímetro, o un instrumento de propósito específico, los que se pueden usar con el uso de tres electrodos o cuatro electrodos, el método mas común y de aplicación practica es el de cuatro electrodos configuración de Wenner.

5. PREGUNTAS DE AUTOCOMPROBACIÓN

1. ¿Por qué es necesario conocer los factores que influyen en la resistividad del terreno?
2. ¿Qué es resistividad del terreno?
3. ¿En que unidades se expresa la resistividad?
4. ¿Cómo influye la naturaleza de los suelos en la resistividad del terreno?
5. ¿Qué ocurre con la resistividad a 0 °C ?
6. ¿Cómo influyen la cantidad de sales en la resistividad del terreno?
7. ¿Es recomendable compactar el terreno y por que?
8. ¿Por qué es necesario conocer los diferentes estratos del terreno?
9. ¿Por qué es necesario conocer la resistividad y su espesor del terreno?
10. ¿Cómo se puede saber la resistividad del terreno?
11. ¿Qué característica tiene el estrato subyacente en un terreno?
12. ¿Cómo se elimina las corrientes parásitas en un instrumento que utiliza batería?
13. ¿Qué ensayos debe tener los instrumentos de medida?
14. ¿Cuál es la diferencia entre el método de tres electrodos y cuatro electrodos?

6. RESPUESTAS A LAS PREGUNTAS DE AUTOCOMPROBACIÓN

1. El terreno está compuesto por diferentes elementos químicos, por lo tanto, presenta diferentes valores de resistividad a diversas profundidades, y si se desea utilizar el terreno como medio para disipar las corrientes de falla, es necesario un buen conocimiento de su comportamiento ante estos eventos.
2. Es la característica del terreno de comportarse ante el paso de la corriente eléctrica y se mide en $\Omega\cdot m$, y se representa en " ρ ".
3. Se expresa en $\Omega\cdot m$, $\Omega\cdot cm$, $\Omega\cdot mm$, siendo el mas utilizado el $\Omega\cdot m$.
4. Tiene una influencia inversa al contenido de agua.
5. A partir de cero grados la resistividad se incrementa notablemente y antes de este valor también es mayor pero es mas amortiguado a medida que se incrementa la temperatura.
6. El comportamiento de la resistividad está en función directa a la concentración de sales en el terreno.
7. Si, cuanto mas compacto es el terreno, la resistividad es menor.
8. Porque el terreno está formado de diversos estratos y éstos tienen resistividades diferentes según su profundidad.
9. Para la ubicación técnica y económica del electrodo de puesta a tierra.
10. De dos formas: mediante tablas y por mediciones.
11. Esta constituido por conglomeraciones finos y pedregosos en la costa, así como rocosos y pedregosos en la sierra y selva alta.
12. Mediante el rectificador estático que rechaza las corrientes de frecuencia diferente al de corriente de prueba.
13. Los ensayos son: aislamiento, compatibilidad electromagnética, climáticos, mecánicos, clase de precisión y fabricación.
14. El método de cuatro electrodos utiliza menor espacio y es de aplicación practica.