

## Capítulo 6

---

# Aspectos geomecánicos fundamentales de las construcciones hidráulicas

### 6.1. Definición y clasificación de los macizos naturales de cimentación de las construcciones hidráulicas

Por base de cimentación de una construcción hidráulica se entiende, al espacio del macizo natural rocoso o no rocoso que interactúa con ella en el trabajo mecánico conjunto.

Base de cimentación apta para implantar una obra hidráulica se considera aquella que permite lograr magnitudes aceptables para la construcción cimentada, de los asentamientos diferenciales y de los desplazamientos horizontales, así como preservar la resistencia y estabilidad del conjunto estructura-base de cimentación.

En caso de que la no uniformidad de la base natural de cimentación sea tan alta que no permita adoptar el macizo para implantar una construcción hidráulica, en caso de que económicamente se justifique, deben ser tomadas las correspondientes medidas ingenieriles que ayuden a lograr la uniformización de los asentamientos y de los desplazamientos horizontales, la resistencia, estabilidad y durabilidad de la construcción, así como su operación confiable al menor costo.

Por el tipo de estructuras geológicas, las bases naturales de cimentación de una obra hidráulica pueden ser rocas, semirocas y suelos.

A las *rocas* pertenecen los macizos naturales constituidos por especies resistentes que tienen uniones rígidas cristalinas y cementadas

entre partículas y que se caracterizan por una deformabilidad débil. Su masa volumétrica generalmente se encuentra entre 2500 y 3100 kg/m<sup>3</sup>, en tanto que la porosidad no supera el 1 %; en estado saturado la resistencia a la compresión y tracción axial supera 5 a 1 MPa respectivamente.

Por su origen las bases de cimentación rocosa se clasifican en magmáticas (basaltos, granitos, dioritas, doleritas, porfiritas y otras rocas intrusivas); metamórficas (gneis, cuarcitas, esquistos cristalinos, mármoles y una serie de otras rocas que se modifican debido a los procesos metamórficos en los macizos naturales) y sedimentarias (calizas, dolomitas, areniscas).

A las *semiropas* pertenecen los macizos naturales constituidos por especies con uniones cristalinas rígidas o plástico coloidales, menos resistentes que en las rocas, así como las rocas meteorizadas y fragmentadas, determinadas rocas sedimentarias como margas, algunas calizas y dolomitas, tobas y yesos. Las semiropas se caracterizan por tener masa volumétrica entre 2200 y 2650 kg/m<sup>3</sup>, porosidad de hasta 20 %, en estado saturado resistencia a la compresión y tracción axial, respectivamente, menor a 5 y 1 MPa.

Las bases naturales de cimentación *no rocosas o suelos* pueden ser cohesionados y no cohesionados, dependiendo de si son capaces de generar, respectivamente, fuerzas internas de fricción y cohesión o únicamente fuerzas internas de fricción. En la gran mayoría de casos la capacidad portante de los suelos está predeterminada por la densidad y el grado de saturación. A los suelos cohesionados pertenecen las arcillas, margas arcillosas, limos arcillosos, limos arenosos, loess. A los suelos no cohesionados pertenecen las arenas, gravas, cantos rodados, piedra. En comparación con las rocas y semiropas los suelos son más deformables y tienen menor resistencia mecánica. A los suelos no cohesionados y cohesionados corresponden, respectivamente, los siguientes valores promediados de las características físico-mecánicas: número plástico menor a 0,01 y mayor a 0,01; peso volumétrico 1400-2100 KN/m<sup>3</sup> y 1100-2100 KN/m<sup>3</sup>; porosidad 20-50 % y 26-80 %; coeficiente de fricción interna ( $\text{tg}\phi$ ) 0,4-0,7 y 0,15-0,4; cohesión específica 0 y 0,005-0,05 MPa. La resistencia al

corte de los suelos cohesionados y no cohesionados, en gran medida depende de su densidad- humedad y de la forma de sus partículas.

## 6.2. Bases naturales de cimentación rocosas

Para una evaluación preliminar, a los macizos rocosos de cimentación de las construcciones hidráulicas se los puede clasificar por los siguientes indicadores.

### 6.2.1. Por el grado de meteorización

Se clasifican a través del *coeficiente de meteorización*  $K_{met}$  que es la relación de la masa volumétrica (densidad) de la roca meteorizada a la masa volumétrica de la misma roca no meteorizada. Por este indicador, las rocas se clasifican en fuertemente meteorizadas, meteorizadas, débilmente meteorizadas y prácticamente no meteorizadas. Para rocas fuertemente meteorizadas ( $K_{met} < 0,8$ ), se recomienda desalojar del área de implantación de la construcción hidráulica, por cuanto ellas presentan indicadores geomecánicos bastante bajos y alta anisotropía de sus propiedades. Las rocas meteorizadas ( $0,8 \leq K_{met} < 0,9$ ) generalmente tienen capacidad portante disminuida, alta deformabilidad y bajos indicadores de corte; en consecuencia, este tipo de roca debe ser desalojado del área de implantación de las obras hidráulicas con funciones de riesgo, particularmente de las presas de hormigón y de elementos impermeabilizantes de las presas de material del lugar. Las rocas débilmente meteorizadas ( $0,9 \leq K_{met} < 1,0$ ) normalmente están afectadas por procesos locales de meteorización, a lo largo de las fisuras grandes y en las zonas debilitadas; en caso de que la roca débilmente meteorizada se preste al mejoramiento con ayuda de inyecciones de solución de cemento o de otra solución y si esta intervención se justifica desde el punto de vista económico, puede no ser desalojada de la base de cimentación de presas de hormigón y de los elementos impermeabilizantes de presas de material del lugar; en algunos casos, estas rocas requieren ser desalojadas a lo largo de determinadas fisuras o desde el contacto de los estratos del macizo; los espacios que se forman por estos desalojos deben ser sella-

dos con hormigón. Las rocas prácticamente no meteorizadas ( $K_{met} = 1$ ) se caracterizan por no tener signos de modificaciones químicas y fragmentación adicional; sobre estas rocas pueden ser implantadas las construcciones hidráulicas de cualquier nivel de importancia, sin necesidad de ninguna medida de mejoramiento geomecánico.

### 6.2.2. Por el grado de alteración de la continuidad

Las bases de cimentación rocosas se clasifican en: muy fuertemente fisuradas, fuertemente fisuradas, medianamente fisuradas y débilmente fisuradas. Rocas no fisuradas prácticamente no existen.

El grado de alteración de la continuidad de la roca se puede valorar a través del *módulo de fisuramiento*  $M_{fis}$  que representa el número de fisuras por metro de corte de la exposición rocosa y por el Rock Quality Designation (RQD). Cuando:  $M_{fis} < 1,5$  (RQD > 90 %) a la roca se considera muy débilmente fisurada;  $1,5 \leq M_{fis} \leq 5$  ( $75 \% \leq \text{RQD} \leq 90 \%$ ) débilmente fisurada;  $5 < M_{fis} \leq 10$  ( $50 \% < \text{RQD} \leq 75 \%$ ) medianamente fisurada; cuando  $10 < M_{fis} \leq 30$  ( $25 \% \leq \text{RQD} \leq 50 \%$ ) fuertemente fisurada;  $M_{fis} > 30$  (RQD < 25 %) muy fuertemente fisurada.

Las rocas débil y medianamente fisuradas con frecuencia requieren de inyecciones de consolidación, bajo las presas de hormigón y los elementos impermeabilizantes de las presas de material del lugar, en tanto que las rocas fuertemente fisuradas y muy fuertemente fisuradas, a más de las inyecciones de consolidación requieren su desalajo parcial.

Se pueden establecer algunas categorías de alteración de la continuidad de las rocas. En la siguiente Tabla 6.1 se identifican siete categorías de alteración de la continuidad de las rocas.

Tabla 6.1  
Categorías de alteración de la continuidad de los macizos rocosos  
de cimentación de las obras hidráulicas

Categoría de alteración de la continuidad	Carácter de la alteración de la continuidad	Espesor de la zona de fractura de las fallas y grosor de las fisuras	Extensión de la zona de fractura
I	Fallas de grado 1: profundas y sísmicas	Miles y cientos de metros	Miles y cientos de kilómetros
II	Fallas de grado 2: profundas, no sísmicas y parcialmente sísmicas.	Decenas de metros y metros	Cientos y decenas de kilómetros
III	Fallas de grado 3	Igual	Decenas de kilómetros y kilómetros
IV	Fallas de grado 4	Cientos y decenas de centímetros	Miles y centenas de metros
V	Fallas pequeñas y fisuras grandes	Decenas de centímetros	Cientos y decenas de metros
VI	Fisuras medianas	Centímetros y milímetros	Decenas de metros y metros
VII	Fisuras pequeñas	Milímetros y fracciones de milímetro	Metros y centímetros

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: Presas ciegas. Rusia. AGROPROMIZDAT.

No deben implantarse importantes construcciones hidráulicas de contención, en macizos con alteración de la continuidad de categoría I; no es deseable, aun cuando es posible, implantar dichas construcciones en macizos con alteración de la continuidad de categorías II, III y IV. En este último caso, las alteraciones bajo el área de implantación de presas de hormigón y de los elementos impermeabilizantes de presas de material del lugar, deben ser selladas.

Las alteraciones de continuidad de categoría V también deben ser selladas, por ejemplo, con inyecciones de cemento. Los macizos con alteración de la continuidad de categorías VI y VII, bajo presas de hormigón y bajo los elementos impermeabilizantes de presas de material del lugar,

con frecuencia son sometidos a tratamiento de consolidación con inyecciones de cemento o parcialmente desalojados.

### 6.2.3. Por el grado de deformabilidad y por su dureza

Las rocas de cimentación pueden ser clasificadas a través del *módulo de deformación*  $E$ , la *velocidad de difusión* de ondas elásticas longitudinales  $V_L$  y el *coeficiente de corte* o dureza (coeficiente de Protod-yakonov)  $f_{dur}$ , como se indica en la siguiente Tabla 6.2.

Tabla 6.2  
Clasificación de las rocas por el grado de deformabilidad y por su dureza

Tipo de roca por deformabilidad y dureza	Indicadores		
	$E$ , GPa	$V_L$ , m/s	$f_{dur}$
Muy débilmente deformable.	> 20	> 4800	> 18
Débilmente deformable.	10 – 20	4200 ÷ 4800	12 – 18
Medianamente deformable.	5 – 10	3500 ÷ 4200	8 – 12
Fuertemente deformable.	2 – 5	2000 ÷ 3500	5 – 8
Muy fuertemente deformable.	< 2	1500 ÷ 2000	2 – 5

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: Presas ciegas. Rusia. AGROPROMIZDAT.

En la naturaleza prácticamente no existen macizos rocosos homogéneos por deformabilidad y dureza, por esta razón uno de los objetivos de las investigaciones geológico-geotécnicas es la determinación del grado de heterogeneidad de la deformabilidad de la base natural de cimentación y la delimitación, dentro de los límites de su capa activa, de las zonas que presentan aproximadamente similares características de deformabilidad, a fin de que sean consideradas en el diseño.

Cabe tomar en cuenta que con ayuda de inyecciones de consolidación (inyecciones de cemento) puede ser incrementado el valor del módulo de deformación del macizo rocoso en 1,5-2 veces en el caso de las rocas fuertemente deformables, en 1,3-1,5 veces en el caso de las ro-

cas medianamente deformables y en 1,1-1,3 veces en el caso de las rocas débilmente deformables; estos incrementos del módulo de deformación conllevan también algún incremento de la resistencia de la roca al corte.

#### 6.2.4. Por la permeabilidad

Las bases de cimentación rocosa se clasifican en muy fuertemente permeables, fuertemente permeables, permeables, débilmente permeables y prácticamente impermeables. La asignación de las rocas a uno u otro grupo dependen de los valores promediados del *coeficiente de filtración*  $K_f$  y de la *absorción específica*  $q$ ; este último indicador se determina mediante inyecciones o extracciones experimentales de agua, desarrolladas por procedimientos especiales. En la siguiente Tabla 6.3 se presenta la clasificación de las rocas por su permeabilidad.

Tabla 6.3  
Clasificación de las rocas por su permeabilidad

Tipo de roca por permeabilidad	Coficiente de filtración $K_f$ , m/día	Absorción específica, $q$ l/min. m <sup>2</sup>
Prácticamente impermeable	< 0,005	< 0,01
Débilmente permeable	0,005 – 0,3	0,01 – 0,1
Permeable	0,3 – 3	0,1 – 1
Fuertemente permeable	3 – 30	1 – 10
Muy fuertemente permeable	> 30	> 10

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: Presas ciegas. Rusia. AGROPROMIZDAT.

El grado de permeabilidad depende del macizo de cimentación por lo que se recomienda adoptar en calidad de elementos impermeabilizantes que formen parte del contorno subterráneo de una construcción hidráulica de contención, sea una cortina, sea drenaje vertical o sea lo uno y lo otro. En efecto, en caso de macizos muy fuertemente permeables y fuertemente permeables, generalmente es suficiente una cortina de impermeabilización; en caso de bases de cimentación permeables

con frecuencia se recomienda adoptar tanto cortina de impermeabilización como también drenaje vertical; en caso de bases de cimentación débilmente permeables la medida más efectiva es adoptar drenaje en tanto que, la cortina de impermeabilización se construye únicamente en determinados tramos donde se evidencie alta permeabilidad del macizo. En caso de bases de cimentación prácticamente impermeables cabe adoptar drenaje intenso.

#### **6.2.5. Por el grado de isotropía (uniformidad espacial de las propiedades físico-mecánicas)**

Las rocas de cimentación se clasifican en anisotrópicas e isotrópicas. En la naturaleza, las bases de cimentación isotrópicas son poco frecuentes. El grado de variación en diferentes direcciones de las propiedades físico-mecánicas de un macizo rocoso se caracteriza con el *coeficiente de anisotropía*; este coeficiente es igual a la relación del valor del parámetro considerado (por ejemplo, del coeficiente de filtración) en la dirección dada, a su valor mínimo determinado en todo el macizo, es decir en cualquier dirección. Como criterio para asignar al macizo rocoso la categoría de isotrópico o anisotrópico se asume el valor del coeficiente de anisotropía igual a 1,5; en consecuencia, el macizo será anisotrópico respecto a determinado indicador, cuando su coeficiente de anisotropía para este indicador sea  $> 1,5$ .

#### **6.2.6. Por el grado de homogeneidad o uniformidad los macizos rocosos**

Se clasifican en homogéneos, no homogéneos (heterogéneos) y muy heterogéneos. Se considera que un macizo es homogéneo cuando está constituido por una sola especie rocosa; las propiedades de esta especie rocosa en los diferentes puntos del macizo se diferencian poco y, por consiguiente, pueden ser asignados a un grupo. Heterogéneos son los macizos rocosos constituidos por varias especies o que incluyen tramos donde todas las propiedades físico-mecánicas o la mayoría de ellas varían dentro de dos grupos. Muy heterogéneos son los macizos rocosos constituidos por varias especies y que incluyen espacios don-

de todas las propiedades físico-mecánicas o la mayoría de ellas varían dentro de tres grupos.

La heterogeneidad y la anisotropía de los macizos de cimentación deben ser consideradas para definir las medidas de consolidación, para los análisis de estabilidad y del estado tensión-deformación, así como para diseñar las medidas de impermeabilización y drenaje.

### **6.3. Bases de cimentación semirocosas**

Las bases de cimentación semirocosas son caracterizadas con los mismos indicadores que las rocas. Además, se las clasifica por su resistencia a la acción del agua en: deleznable, soluble, débilmente soluble e insoluble.

#### **6.3.1. Deleznable**

Son las semirocas constituidas por algunos tipos de aleurolitas, areniscas, argilitas y esquistos arcillosos que, por efecto de la humedad, pierden su capacidad portante y disminuyen los indicadores de corte. En los taludes, este tipo de material es inestable y al ser expuesto (por excavación) rápidamente se destruye desde la superficie. Estas bases de cimentación no son aceptables para sobre ellas implantar una construcción hidráulica.

#### **6.3.2. Soluble**

Son los macizos constituidos por anhídridos, yesos, sales de potasio y una serie de otras especies fácilmente lixiviables por el agua. No se debe cimentar construcciones hidráulicas de retención sobre estos macizos.

#### **6.2.3. Débilmente soluble**

Son los macizos constituidos por dolomitas, calizas kársticas, conglomerados con cementante soluble en el agua. En caso de ser necesario cimentar una construcción hidráulica en estas bases de cimenta-

ción, es necesario incluir en el proyecto medidas de impermeabilización y sellado minucioso de los espacios kársticos.

#### 6.2.4. Insolubles

En caso de semirocas insolubles se recomienda adoptar un conjunto de medidas semejantes a las previstas para el caso de las rocas.

A diferencia de las rocas, las semirocas se clasifican por su deformabilidad en dos grupos: *fuertemente deformables* y *débilmente deformables*. Las semirocas fuertemente deformables se caracterizan por tener un coeficiente de dureza o de corte  $f_{dur}$  que varía entre 1 y 2, el módulo de deformación  $E < 1 \text{ GPa}$  y la velocidad de difusión de las ondas elásticas longitudinales  $V_L < 1500 \text{ m/s}$ ; en las semirocas débilmente deformables,  $2 < f_{dur} < 4$ ,  $1 < E \leq 2 \text{ GPa}$ ,  $1500 \leq v_L \leq 2000 \text{ m/s}$ .

Cuando se requiere implantar construcciones hidráulicas de contención en semirocas fuertemente deformables, en el proyecto debe ser considerada la deformabilidad de la base de cimentación y previstas las correspondientes medidas constructivas, como por ejemplo juntas de deformación.

### 6.3. Bases de cimentación no rocosas (suelos)

Los suelos constituyen el tipo más difundido de base natural de cimentación de las construcciones hidráulicas. Sus particularidades características son: estructura estratificada, no uniformidad de la constitución granulométrica y anisotropía de muchas propiedades e indicadores (coeficiente de filtración, módulo de deformación, indicadores de corte) que dependen en alto grado de la densidad-humedad.

Por el tamaño de las partículas en la zona activa del macizo de cimentación se distinguen:

- Suelos de granulometría gruesa (con tamaño de las partículas superior a 2 mm).

- Suelos arenosos (con tamaño de las partículas de 2 a 0,05 mm), que a su vez se dividen *en gravosos* (con contenido no menor al 25 % de partículas de tamaño mayor a 2 mm), *gruesos* (con contenido no menor al 50 % de partículas de tamaño superior a 0,5 mm), de *tamaño medio* (con contenido no menor al 50 % de partículas de tamaño superior a 0,25 mm) y *finos* (con contenido no menor al 75 % de partículas de tamaño mayor a 0,1 mm).
- Limos arenosos (con partículas de tamaño de 0,05 mm a 0,005 mm y número plástico  $0,01 \leq l_p \leq 0,07$ ).
- Suelos arcillosos (con partículas de tamaño menor a 0,005 mm) que pueden ser *limos arcillosos* cuando el número plástico es  $0,07 \leq l_p \leq 0,17$  y *arcillas* cuando el número plástico es  $l_p > 0,17$ .

Los suelos de granulometría gruesa y las arenas pertenecen al grupo de *suelos no cohesionados*, en los cuales no están presentes las fuerzas de cohesión entre las partículas y la resistencia al corte obedece exclusivamente a la fricción interna. Los limos arcillosos y, en particular, las arcillas pertenecen al grupo de suelos cohesionados que, para resistir a las sollicitaciones de corte, son capaces de generar a más de fuerzas de fricción, también fuerzas de cohesión, condicionadas a una serie de factores, particularmente al grado de dispersión de las partículas, densidad y humedad. Los limos arenosos, pueden presentar propiedades de suelos cohesionados o no cohesionados, dependiendo a que grupo se aproximan por su estructura granulométrica: a los limos arcillosos o a las arenas finas.

Los suelos de granulometría gruesa y las arenas, por el grado de humedad  $G$  se clasifican en:

- Poco húmedas:  $0 < G \leq 0,5$ ;
- Húmedas:  $0,5 < G \leq 0,8$ ;
- Saturadas:  $0,8 < G \leq 1$ .

El grado de humedad se determina con la ecuación:

$$G = \left( \frac{w}{e} \right) \left( \frac{\gamma_{sol}}{\gamma_o} \right) \quad (6.1)$$

Donde:

$w$ : humedad natural del suelo (por peso) en fracción de la unidad.

$e$ : relación de poros del suelo en estado natural:  $e = \frac{n}{(1-n)}$ , donde  $n$ : porosidad del suelo.

$Y_{sol}$ ,  $Y_o$ : peso específico, respectivamente, de los sólidos o esqueleto del suelo y del agua;  $\text{kN/m}^3$ .

A los suelos arenosos se los caracteriza no solo por el tamaño de sus partículas sino también por su densidad natural y por su uniformidad granulométrica; de esta última característica el indicador es el coeficiente de uniformidad granulométrica  $\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ ; tanto mayor sea el valor de este coeficiente cuanto, menos uniforme es el suelo respecto a su granulometría y, en consecuencia, cuanto más sensible al desarrollo de procesos de erosión interna por acción del flujo de filtración (tubificación)

Por la densidad natural las arenas se clasifican en sueltas, semi-compactas y compactas. Para esta clasificación, se utiliza sea la densidad relativa  $D$  o la relación de poros  $e$  (Tabla 6.4), como también los resultados de sondeos dinámicos y estáticos de los suelos ubicados a profundidades mayores a 2 m, desde la superficie de cimentación.

De acuerdo con Terzaghi:

$$D = \frac{(e_{max} - e)}{(e_{max} - e_{min})} \quad (6.2)$$

Donde:

$e_{max}$ ,  $e$  y  $e_{min}$ : relación de poros de la arena, respectivamente, menos densa, en estado natural y más densa.

Tabla 6.4  
Relación de poros y densidad relativa para las arenas

Arenas	Valor de $e$ para las arenas			Valor de $D$ para las arenas de todo tamaño
	Gravosas, gruesas y medias	Finas	Muy finas	
Compactas	< 0,55	< 0,6	< 0,6	1 - 2/3
Semicompactas	0,55 - 0,7	0,6 - 0,75	0,6 - 0,8	2/3 - 1/3
Sueltas	> 0,7	> 0,75	> 0,8	< 1/3

Entre los suelos arcillosos es importante identificar a los suelos expansivos y a los colapsables.

Expansivos son aquellos suelos arcillosos que al ser saturados con agua o con una solución química incrementan su volumen (se expanden) en tal magnitud que:

$$\delta_{ex} = \frac{(h_{EL} - h)}{h} \geq 0,04 \quad (6.3)$$

Donde:

$\delta_{ex}$ : coeficiente de expansión relativa en condiciones de expansión libre (sin carga).

$h_{EL}$ : alto de la muestra de suelo, luego de su expansión libre, en condiciones de imposibilidad de dilatación lateral, como resultado de su humedecimiento hasta saturación total.

$h$ : alto inicial de la muestra de suelo con humedad natural.

En caso de que  $0,04 < \delta_{ex} < 0,08$ , se considera al suelo débilmente expansible; en caso de que  $0,08 < \delta_{ex} < 0,12$ , medianamente expansible; y cuando  $\delta_{ex} > 0,12$ , fuertemente expansible.

Es posible también determinar si un suelo arcilloso pertenece a la categoría de expansible a través del parámetro  $\pi$  (pi)

$$\Pi = \frac{(e_L - e)}{(1 + e)} \quad (6.4)$$

Donde:

$e_L$  y  $e$ : relación de poros, respectivamente, para humedad en límite líquido  $W_L$  y humedad natural  $W$ .

El valor obtenido del parámetro  $\pi$  se compara con los valores de la siguiente Tabla 6.5. Si el valor calculado de  $\pi$  es menor al valor consignado en la tabla, para el correspondiente intervalo del número plástico, el suelo dado puede ser considerado expansivo; si el valor del parámetro  $\pi$  resulta ser mayor al de la tabla, entonces no hay base para suponer que el suelo considerado sea expansivo.

Tabla 6.5

Parámetro  $\pi$  para determinar si un suelo arcilloso es expansivo

Índice plástico del suelo $I_p$	0,01-0,1	0,1-0,14	0,14-0,22
Parámetro $\pi$	0,1	0,17	0,24

A los *suelos colapsables* pertenecen las arcillas tipo loess y algunas macroporosas (con porosidad no menor al 50 %) cuando al ser humedecidas originan, debido a la carga externa o a su peso propio, un asentamiento tal que:

$$\delta_{col} = \frac{(h' - h_{col})}{h_o} \geq 0,01 \quad (6.5)$$

Donde:

$h'$ : alto de la muestra de suelo con humedad natural, comprimida, sin posibilidad de dilación lateral, con una carga igual a la suma de las presiones originadas en el peso de la construcción a implantarse y en el peso propio del suelo o a la presión únicamente del propio peso del suelo.

$h_{col}$ : alto de la muestra luego de ser saturada, conservando la misma presión.

$h_o$ : alto de la muestra considerada, con humedad natural, comprimida, sin posibilidad de dilatación lateral, con una presión igual a la del peso propio del suelo.

La capacidad portante de los macizos de cimentación formados por limos arenosos y suelos arcillosos (no expansivos y no colapsables), en gran medida depende de su consistencia o índice de liquidez

$$I_L = \frac{(W - W_P)}{(W_L - W_P)} = \frac{(W - W_P)}{I_p} \quad (6.6)$$

Donde:

$W$ ,  $W_P$  y  $W_L$ : humedad en masa, expresada como fracción de la unidad, respectivamente para estado natural, para el límite plástico y líquido.  
 $I_p$ : número o índice plástico.

En función de valor de la consistencia  $I_L$ , los limos arenosos se encuentran en estado duro ( $I_L < 0$ ), plástico ( $0 \leq I_L \leq 1$ ) o fluido ( $I_L > 1$ ).

Los limos arcillosos y las arcillas por su consistencia se clasifican en seis estados:

Duro ( $I_L < 0$ ); semiduro ( $0 \leq I_L \leq 0,25$ ); plástico-duro ( $0,25 < I_L \leq 0,5$ ); plástico suave ( $0,5 < I_L \leq 0,75$ ); plástico fluido ( $0,75 < I_L \leq 1$ ); y fluido ( $I_L > 1$ ).