



NIVELACIÓN DE TERRENOS POR REGRESIÓN TRIDIMENSIONAL

JOSEP MARIA FRANQUET BERNIS
ANTONIO QUEROL GÓMEZ

8. ESPONJAMIENTO, COMPACTACIÓN Y COMPENSACIÓN DE TIERRAS

Esponjamiento

Prácticamente todos los terrenos, al ser excavados para efectuar su explanación, sufren un cierto aumento de su volumen. Este incremento de volumen, expresado en porcentaje del volumen *in situ*, se llama *esponjamiento*. Si el material se emplea como relleno puede, en general, recuperar su volumen e incluso puede reducirse (volumen compactado). Para la cubicación del material de la excavación, se considera su volumen antes de ser excavado (en banco); en ningún caso debe ser tenido en cuenta el volumen transportado de las tierras, que es mayor debido precisamente al esponjamiento referido.

Cuando se realiza la medición del movimiento de tierras de un solar o terreno de cultivo, debe tenerse muy en cuenta dicho esponjamiento que sufren las tierras, ya que puede existir una variación volumétrica del 10 % en terrenos sueltos, un 25 % en terrenos muy duros y hasta de un 40 % en suelo rocoso, como se comprobará en la tabla y consideraciones subsiguientes. Estos porcentajes pueden llegar a variar y ser ajustados con mayor especificidad en caso de realizarse ensayos y determinar el grado de esponjamiento, cuando el volumen de la unidad a valorar fuese muy alto y se requiriese la consecución de una mayor precisión. Es por ello que debemos considerar que cuando se deja material de acopio en obra para efectuar rellenos posteriores, o bien al realizar la explanación de un terreno, debemos tomar buena cuenta del esponjamiento del mismo, puesto que de lo contrario podríamos encontrarnos con falta de material o bien con un exceso de él que obligara a afrontar costes complementarios de transporte a vertedero o terreno de cultivo.

Al realizar un desmonte provocamos que las partículas de tierra pierdan cohesión, existiendo entre ellas un mayor porcentaje de huecos en la parcela definitiva donde se depositan que en la original de la cual se extrajeron, de tal forma que la tierra extraída de una zanja o desmonte ocupará normalmente un volumen mayor al hueco estricto dejado por la excavación.

El coeficiente de esponjamiento del terreno viene dado por la expresión:

$$C = [(V - V_h) \times 100] / V_h$$

donde V es el volumen de las tierras ya esponjadas y V_h es el volumen de la excavación o desmonte realizados. Según los diferentes tipos de terrenos, dicho coeficiente varía aproximadamente de acuerdo a la tabla siguiente:

Tabla 1. Tabla de esponjamiento según el tipo de terreno.

TIPO DE TERRENO	(C) GRADO DE ESPONJAMIENTO
Terrenos sueltos sin cohesión (vegetal)	10%
Terrenos flojos	20%
Terrenos compactos o de tránsito	30%
Terrenos rocosos	40%
Escombros	Varía entre 40% y 80%

Por consiguiente, la partida pertinente de obra definirá detalladamente los tipos de terreno de que se trate, de acuerdo a la clasificación detallada a continuación:

Tierra

Vegetal

Capa superficial de un terreno donde ha crecido la vegetación y que contiene una cantidad apreciable de materia orgánica y restos vegetales (*humus*).

Terreno

Flojo

Son tierras de cultivo, con arcillas, limos, arenas, gravas u otro árido cualquiera, y contenido variable de materia orgánica.

Terreno

Compacto

Tierras con arcillas duras, rocas sueltas, materiales granulares gruesos.
Sistema de Excavación:

Mediante excavadora, retroexcavadora de orugas o ruedas neumáticas o bien pala cargadora (cargador frontal).

Al respecto de este tipo de maquinaria, pueden verse las fotografías siguientes:

Terreno

de

Tránsito

Areniscas en finas capas, roca desmoronada.
Sistema de Excavación:
Excavadora, retroexcavadora, bulldozer.

Terreno

de

Roca

Areniscas compactas, granitos, calcáreas, margas duras.
Sistema de Excavación:
Excavadora o retroexcavadora con martillo hidráulico y explosivos.

8. 2. Compactación

La “compactación” es el procedimiento resultante de aplicar energía al suelo suelto para eliminar espacios vacíos, aumentando así su densidad y, en consecuencia, su capacidad de soporte y estabilidad, entre otras propiedades. Su objetivo estriba en el mejoramiento de las propiedades geotécnicas o de ingeniería del suelo.

Luego de efectuar la ejecución de los rellenos con todos los procedimientos propios del mismo, debe procederse a la **compactación** del terreno. Para realizar esta operación, deberá controlarse previamente el contenido de humedad del suelo, que debe corresponder a la humedad óptima que determine el laboratorio especializado. El material deberá ser compactado con el grado que fije el laboratorio, de acuerdo al ensayo Próctor modificado y para cumplir con este requisito deben tenerse en consideración los siguientes factores:

- a) Espesor de la capa de material suelto que se compacta.
- b) Presión ejercida por el rodillo o martillo pisón sobre el terreno.
- c) Número de pasadas del rodillo o golpes de pisón necesarios para obtener el grado de compactación establecido.
- d) Humedad existente en el momento de realizar la operación.

La experiencia de muchos años y trabajos realizados ha demostrado que se precisa un mayor volumen de desmonte que de terraplén para que exista la compensación de tierras necesaria en la construcción del bancale para una parcela de cultivo agrícola, a fin de lograr el plano definitivo del mismo mediante el procedimiento optimizado que es objeto fundamental del presente libro. Ello parece contradictorio con la consideración de los coeficientes de esponjamiento que, como acabamos de ver, tienden a aumentar los volúmenes de terraplén frente a los de desmonte. Este curioso fenómeno, admitido por muchos autores tratadistas de estos temas sobre movimientos de tierras, se ha venido explicando con diferentes razonamientos que veremos a continuación.

Una opinión muy extendida, sobre esta curiosa desigualdad de volúmenes, se fundamenta en la utilización de los modernos equipos mecánicos, empleados en la actualidad con carácter general para el movimiento de tierras, que dan lugar a que los terraplenes sean comprimidos en mayor grado que aquel que tenían las tierras en su estado natural, por lo que para completar el terraplén definitivo hace falta agregar un cierto volumen adicional de desmontes.

No parece definitiva esta explicación, o al menos no es única, ya que, lógicamente debería producirse, asimismo, un apelmazamiento general del suelo, en especial de las zonas de desmonte, puesto que soportan igualmente el peso de los equipos de trabajo, experimentando mayores presiones, por otra parte, debidas a la potencia adicional usada en la operación de carga. No obstante, el hecho de que los terraplenes se vayan formando por tongadas delgadas sucesivas, comprimiéndose cada una de ellas aisladamente por el paso de las máquinas, puede explicar, en parte, el mayor apelmazamiento de los terraplenes frente a los desmontes.

Aquí se plantea la cuestión del grado de **compactación posterior de las tierras una vez realizadas las tareas de nivelación y/o explanación de la parcela o solar. En efecto, según que la tierra se compacte más o menos, débense también considerar los siguientes coeficientes correctores:**

VERTIDA: si la tierra es simplemente vertida ocupa de un 10% a un 20% más de volumen de lo que ocupaban las tierras en origen **(1'10 a 1'20).**

PISADA: si las tierras son pisadas, ocupan lo mismo o bien un 10% más que esas mismas tierras en origen **(1'00 a 1'10).**

COMPACTADA: si son compactadas ocupan de un 95% a un 100% del volumen que ocupaban las tierras en origen **(0'95 a 1'00).**

Por algunos autores (LAGUNA, 1968), se considera como más probable, y quizá más importante, la explicación de que la desigualdad observada de volúmenes puede ser debida a la tendencia de los tractoristas a colmatar exageradamente la superficie del terreno comprendido entre estacas de nivel, a consecuencia de un efecto óptico por el que parecen hundirse las zonas centrales de estas superficies, comprendidas entre las referencias de nivel generalmente malladas o reticulares proporcionadas por el topógrafo. Por tanto, sería éste un factor que dependería del grado subjetivo en que los tractoristas se dejan influir por este efecto óptico, variando, por tanto, de unos equipos a otros. Lo cierto es que, según una serie de comprobaciones efectuadas, se ha encontrado que un porcentaje muy elevado de puntos medios, situados entre las estacas, aparecen con niveles superiores a los debidos, en cantidades próximas a los 2 ó 3 cm. que, por su reducida cuantía, son generalmente admitidos por quedar dentro de los límites de tolerancia establecidos cuando se trata de abancalamientos para terrenos de cultivo. Evidentemente, tratándose de parcelas o solares urbanos o industriales de menores dimensiones superficiales y mayores exigencias geométricas, dicho margen de tolerancia también sería menor.

Así mismo, se señala como posible causa de esta falta de tierra, las pérdidas originadas en el transporte, por el viento u otros motivos, explicación que, a nuestro juicio, no resulta demasiado

convinciente, dadas las dimensiones relativamente reducidas del bancal, que diferencia notablemente a estas obras de tierra de aquellas otras que tienen por objeto la excavación y transporte de tierras a las áreas de terraplén muy alejadas de la zona de desmonte, en las que sí pudieran ser admisibles las razones aquí apuntadas.

Pero sea una u otra la causa del expresado fenómeno, o la acción conjunta de todas ellas, **el hecho cierto es que con frecuencia se precisa mayor volumen de desmonte que de terraplén** y, en consecuencia, ello es preciso tenerlo en cuenta al formular el proyecto y el presupuesto de la obra, ya que el volumen de tierra a excavar y transportar puede ser superior al que se obtiene directamente por el cálculo del desmonte una vez efectuada la compensación teórica. Salvando circunstancias extremas, dicho coeficiente de aumento debe variar entre el 5-10%. Así pues, una vez calculado el volumen de la compensación de tierras, resulta preciso efectuar un reajuste del mismo.

Es difícil precisar exactamente el volumen de desmonte necesario para la compensación que se pretende realizar, ya que son muy variados los factores que influyen en el mismo. Es evidente que si el desmonte es muy reducido, por quedar sus cotas limitadas a escasos centímetros, el porcentaje de aumento en relación con el terraplén puede ser muy elevado, por la influencia relativamente grande que pueden tener las causas indicadas en un volumen tan reducido. Para unas mismas características de suelo, este volumen adicional sería mucho menor, en proporción, con un volumen de excavación que se aproximara a los 1.000 m³/Ha. En suelos con una gran proporción de materia orgánica, la experiencia ha demostrado, como era lógico suponer, que es preciso un elevado incremento del volumen de desmonte, ya que el factor de apelmazamiento ejerce en este caso una gran influencia.

En bancales con un desmonte medio normal, del orden de 1.000 a 1.200 m³/Ha., y bajo contenido de humedad, en suelos constituidos por margas arcillosas, se podría precisar de un 10-15% más de desmonte que de terraplén. En cambio, para suelos sueltos de textura ligera o arenosa, el porcentaje de aumento podría ser inferior al 5% para una excavación profunda, pudiendo elevarse para excavaciones superficiales.

En la mayor parte de los casos será necesario, para ejecutar la compactación del suelo posterior a su explanación, el empleo de maquinaria especializada, que puede ser la siguiente:

(1) Rodillo “pata de cabra”. Consta de los siguientes elementos: un tambor al cual van soldadas una serie de patas, un marco que lleva los descansos del tambor y una barra de tiro para acoplar el rodillo al tractor de remolque. Este tipo de rodillo se usa cuando se requiere una alta presión aplicada al material de relleno, comprendida entre 9 y 20 kp/cm², que puede aumentar considerablemente si el tambor se rellena con agua o arena.

(2) Rodillo con ruedas neumáticas. Consiste en un cajón metálico apoyado sobre ruedas neumáticas. Este cajón, al ser llenado con agua, arena seca o arena mojada, ejerce una mayor presión de compactación, con valores que pueden variar entre 3 y 8 kp/cm².

(3) Rodillo vibratorio. En este caso al rodillo, formado por un tambor de acero, se le ha agregado un mecanismo de vibración, haciendo girar un contrapeso colocado excéntricamente en el eje de giro, con frecuencias resultantes de una velocidad angular de 1.000 a 4.000 revoluciones por minuto.

(4) Placa compactadora. Ésta corresponde a una placa apisonadora que golpea y se separa del suelo a alta velocidad, logrando con ello la densificación deseada del suelo.

La compactación debe efectuarse comenzando en los bordes y avanzando hacia la línea central en pasadas paralelas traslapadas en, por lo menos, una mitad del ancho de la unidad compactadora. Se requiere efectuar un número de pasadas suficiente como para obtener el grado de compactación exigido.

Con independencia de los equipos específicos de compactación anteriormente descritos, veamos que en igualdad de condiciones de suelo, humedad, profundidad de excavación, etc., deben considerarse los tipos y características de los equipos mecánicos de movimiento de tierras que han de ser utilizados, dada

la distinta influencia de los mismos en la “compactación involuntaria” de las mismas. A este respecto, haremos seguidamente unas indicaciones a título simplemente orientativo.

Los efectos de la compactación del suelo por los tractores de cadenas son mucho menores que los provistos de ruedas de neumáticos, aunque parezca lo contrario a primera vista, por el mayor peso de los primeros para una potencia dada. Esto es debido a la mayor superficie de apoyo, o huella del tractor, por cuyo motivo el peso queda más repartido, originando una menor presión sobre el terreno. Así, se tiene que la presión de un tractor de cadenas es de un valor medio de 0'5 kp/cm² (0'05 N/mm²), mientras que la de los tractores de ruedas neumáticas, en general, es superior a 2'5 kp/cm² (0'25 N/mm²), frecuentemente superior también al coeficiente de fatiga o trabajo del terreno, lo que provoca el hundimiento de la huella.

En los tractores, traíllas y remolques equipados con ruedas de neumáticos, ha de tenerse en cuenta también la presión de inflado en el interior de los mismos, ya que se admite que la compresión del suelo es equivalente a ella, con un ligero aumento que se cifra en un 10 por 100 aproximadamente, y resulta independiente de la carga para una presión de hinchado dada y por ello la presión sobre el suelo permanece constante cuando varía la carga, ya que la huella del neumático aumenta o disminuye correlativamente, según el caso.

En general, las ruedas motrices de los tractores están equipadas con neumáticos de baja presión, del orden de 2'0 a 2'5 kp/cm² (0'20-0'25 N/mm²), mientras que las ruedas delanteras son de presión mucho más elevada.

En las traíllas de gran capacidad, de 6 a 12 m³, los neumáticos son de baja presión semejante a los indicados para las ruedas motrices de los tractores. Por el contrario, son de presión más elevada las ruedas correspondientes a las traíllas agrícolas de reducida capacidad, de 1 a 2 m³.

Todo ello hace, en definitiva, que resulte harto difícil fijar el porcentaje de aumento del desmonte respecto del terraplén necesario, puesto que depende de factores tan variables como los distintos tipos de suelos, la mayor o menor profundidad de las excavaciones, las condiciones de humedad de las tierras, su textura y estructura, su contenido en materia orgánica, la mayor o menor aptitud de los tractoristas y las características propias de los equipos mecánicos utilizados en este tipo de trabajos (LAGUNA, 1968).

8.3. Próctor estándar y modificado

El término *compactación*, que hemos visto *in extenso* en el epígrafe anterior, se utiliza también en la descripción del proceso de densificación de un material mediante medios mecánicos. El incremento de la densidad se obtiene por medio de la disminución de la cantidad de aire que se encuentra en los intersticios o espacios vacíos que se encuentra en el material, manteniendo el contenido de humedad del mismo relativamente constante. En la vida real, la compactación se realiza sobre materiales que serán utilizados para relleno en la construcción de terraplenes, pero también puede ser empleado el material *in situ* en proyectos de mejoramiento del terreno.

El principal objetivo de la compactación es mejorar las propiedades ingenieriles, edafológicas, pedológicas o geotécnicas del material en algunos aspectos importantes del mismo, a saber:

- Aumentar la resistencia al corte, y por consiguiente, mejorar la estabilidad, de terraplenes y la capacidad de carga de cimentaciones y pavimentos.
- Disminuir la compresibilidad y, por consiguiente, reducir los asentamientos.
- Disminuir la relación de espacios vacíos y, por consiguiente, reducir la permeabilidad.
- Reducir el potencial de expansión, contracción o expansión por congelamiento.
- Para medir el grado de compactación de material de un suelo o de un relleno se debe establecer la densidad seca del material. En la obtención de la densidad seca se deben tener en cuenta los parámetros de la energía utilizada durante la compactación y también depende del contenido de humedad durante el mismo. Las relaciones existentes entre la humedad seca, el contenido de humedad y la energía de compactación se obtienen a partir de ensayos de compactación efectuados en laboratorio.

- La compactación en laboratorio consiste en comprimir una muestra que corresponda a la masa de suelo que se desea compactar, con la humedad calculada y en un molde cilíndrico de volumen conocido y con una energía de compactación especificada. En la actualidad, se presentan diferentes tipos de ensayos los cuales determinan el grado de compactación del material; entre otros se pueden encontrar los ensayos de: a) Método del martillo de 2'5 Kg, b) Método del martillo de 4'5 Kg, c) Proctor (estándar), d) Proctor modificado y e) Método del martillo vibratorio. Los primeros cuatro citados están basados en la compactación dinámica creada por el impacto de un martillo metálico de una masa específica que se deja caer libremente desde una altura determinada; como resultado del choque el suelo se compacta en un número de capas iguales y cada capa recibe el mismo número de golpes. Alternativamente, la compactación en el quinto ensayo está basada en la combinación de la presión estática y la vibración. El suelo se compacta en tres capas iguales, presionando fuertemente hacia abajo el compactador vibratorio durante un periodo de 60 segundos en cada capa.
- Los resultados obtenidos a partir del ensayo proporcionan una curva, en la cual el pico más alto dicta el contenido de humedad óptima a la cual el suelo llega a la densidad seca máxima. Por medio de los ensayos se ha podido determinar que, por lo general, la compactación resulta más eficaz en los materiales bien gradados -que contienen una cantidad notoria de elementos finos, como las arcillas o ciertos limos- que en los materiales de gradación uniforme que carecen de finos (arenas o gravas).

Los materiales o instrumentos más relevantes que se emplean para ello son los siguientes:

- **MOLDE DE COMPACTACIÓN:** Los moldes deberán ser cilíndricos de paredes sólidas, fabricados con metal y con las dimensiones y capacidades mostradas más adelante. Deberán tener un conjunto de collar ajustable aproximadamente de 60 mm. (2 3/8") de altura, que permita la preparación de muestras compactadas de mezclas de suelo con agua de la altura y volumen deseado. El conjunto de molde y collar deberá estar construido de tal manera que pueda ajustarse libremente a una placa hecha del mismo material.
- **MARTILLO DE COMPACTACIÓN:** Consiste en un martillo metálico que tenga una cara plana circular de 50.8 ± 0.127 mm. (2 ± 0.005 ") de diámetro, una tolerancia por el uso de 0.13 mm. (0.005"), y que pese 2.495 ± 0.009 kg. (5.50 ± 0.02 lb.). El martillo deberá estar provisto de una guía apropiada que controle la altura de la caída del golpe desde una altura libre de 304.8 ± 1.524 mm. (12.0 ± 0.06 " ó 1/16") por encima de la altura del suelo. La guía deberá tener al menos 4 agujeros de ventilación, no menores de 9.5 mm. (3/8") de diámetro espaciados aproximadamente a 90° y 19 mm. (3/4") de cada extremo, y deberá tener suficiente luz libre, de tal manera que la caída del martillo y la cabeza no tengan restricciones.
- **HORNO DE ROTACIÓN:** Es de 110 grados centígrados con tolerancia de +/- 5 grados centígrados. Sirve para secar el material.
- **BALANZA CON ERROR DE 1 GR.:** Sirve para pesar el material y los diferentes tipos de recipientes empleados en la operatoria.
- **RECIPIENTES:** Es allí donde se deposita, precisamente, el material a analizar.
- **TAMICES:** Consiste en un serie de tamices de malla cuadrada para realizar la clasificación No 4 y ¾.