# Control de compactación en obras viales: más allá del porcentaje de densidad

**Ivonne Estela Reyes Gutiérrez**
*Área de especialización: Laboratorio Vial y Control de Calidad de Materiales*

## Resumen ejecutivo



*La compactación de suelos constituye una de las operaciones fundamentales en la construcción de infraestructura vial. Su correcta ejecución condiciona directamente el comportamiento estructural de terraplenes, subrasantes, subbases y bases granulares, influyendo en la capacidad de soporte, estabilidad y durabilidad del pavimento.*

*Sin embargo, en la práctica constructiva, el control de compactación suele concentrarse en la verificación del porcentaje de densidad alcanzado respecto de una densidad máxima de referencia, sin considerar siempre la importancia que tienen las características del material, su contenido de humedad, la energía de compactación y las condiciones de ejecución en terreno.*

*Este artículo analiza la importancia de comprender la compactación como un proceso integral, en el que los resultados de laboratorio deben relacionarse con las condiciones reales de colocación y compactación del material.*

*Se examinan los fundamentos del ensayo Proctor, la relación humedad-densidad, la determinación de densidad en terreno, la influencia de la granulometría y la utilización complementaria del ensayo CBR para evaluar la capacidad de soporte de los materiales.*

*Finalmente, se propone un enfoque de control de calidad preventivo, en el que el laboratorio no se limite a informar resultados, sino que contribuya activamente a identificar desviaciones, anticipar problemas y respaldar técnicamente las decisiones adoptadas durante la ejecución de las obras.*

## 1. Introducción

En la construcción de caminos y carreteras, la calidad de las capas que conforman la estructura del pavimento depende, en gran medida, de las características de los materiales empleados y de las condiciones en que estos son colocados y compactados.

Un terraplén deficientemente compactado puede experimentar asentamientos posteriores, mientras que una subbase o base granular que no alcance las condiciones exigidas puede presentar deformaciones bajo las cargas del tránsito, afectando el comportamiento de las capas superiores.

La compactación tiene por finalidad aumentar la densidad del material mediante la reducción de los vacíos existentes entre sus partículas, principalmente a través de la expulsión de aire. Este proceso permite mejorar determinadas propiedades mecánicas del suelo, tales como su resistencia, estabilidad y comportamiento frente a las solicitaciones.

No obstante, alcanzar una determinada densidad no garantiza, por sí solo, que el material presente todas las condiciones necesarias para cumplir satisfactoriamente su función estructural.

Por esta razón, el control de calidad debe considerar tanto los resultados de los ensayos como la naturaleza del material, su humedad, la energía aplicada y las condiciones de ejecución en terreno.

## 2. Fundamentos de la relación humedad-densidad

El comportamiento de un suelo durante la compactación depende de diferentes factores, entre los cuales destacan:

- Distribución granulométrica.
- Forma y características superficiales de las partículas.
- Contenido de humedad.
- Energía de compactación aplicada.
- Espesor de las capas.
- Tipo de equipo utilizado.
- Número de pasadas y procedimiento constructivo.

La incorporación de agua modifica las condiciones de interacción entre las partículas, facilitando inicialmente su reordenamiento y permitiendo alcanzar mayores densidades secas.

Sin embargo, este comportamiento tiene un límite. Cuando el contenido de humedad supera determinadas condiciones, el agua comienza a ocupar una proporción importante de los vacíos, dificultando la reducción adicional de estos mediante la compactación.

De esta relación se obtienen dos parámetros fundamentales:

**Densidad seca máxima:** corresponde al valor máximo de densidad seca que puede alcanzarse para una energía de compactación determinada.

**Humedad óptima:** corresponde al contenido de humedad asociado a esa densidad seca máxima.

Ambos parámetros se determinan mediante los ensayos Proctor Normal o Modificado, según corresponda a las especificaciones técnicas del material y de la obra.

Es importante comprender que estos resultados son referencias de laboratorio y no valores universales aplicables a cualquier material. Cada cambio significativo en la procedencia o características del suelo puede justificar una nueva caracterización.

## 3. La importancia del ensayo Proctor en el control de obra

El ensayo Proctor constituye una herramienta fundamental para establecer la relación entre humedad y densidad seca de un material sometido a una energía de compactación normalizada.

Su aplicación permite obtener una curva que representa el comportamiento del material frente a distintos contenidos de humedad.

A partir de esta curva se determina la densidad seca máxima de referencia y la humedad óptima.

En terreno, estos parámetros se utilizan para evaluar el grado de compactación alcanzado. La relación porcentual se expresa de la siguiente manera:

$$GC = ( \rho_{d,\ terreno} / \rho_{d,\ máxima} ) \times 100$$

Donde:

- GC: grado de compactación.
- $\rho_{d,\ terreno}$: densidad seca determinada en terreno.
- $\rho_{d,\ máxima}$: densidad seca máxima obtenida en laboratorio.

La interpretación del resultado debe realizarse considerando el porcentaje mínimo exigido por las especificaciones técnicas particulares de la capa y del contrato.

Un aspecto especialmente relevante es que el valor de referencia debe corresponder al material efectivamente utilizado. Comparar una densidad de terreno con un Proctor que no representa adecuadamente el material colocado puede conducir a conclusiones equivocadas.

## 4. El contenido de humedad como variable determinante

Uno de los problemas recurrentes en terreno corresponde a la ejecución de trabajos de compactación sin un control adecuado de la humedad.

Cuando el material presenta una humedad inferior a la óptima, puede resultar difícil alcanzar la densidad requerida, debido a que las partículas no disponen de condiciones favorables para su reordenamiento.

Por otra parte, un exceso de humedad puede generar deformaciones, bombeo, pérdida de estabilidad y dificultades durante el tránsito de los equipos de compactación.

Por ello, el control de humedad no debe entenderse como una verificación secundaria, sino como una actividad integrada al proceso constructivo.

El laboratorio debe contribuir a establecer las condiciones apropiadas de trabajo, informando oportunamente cuando los materiales se encuentran fuera de los rangos que permiten una compactación eficiente.

La observación directa del comportamiento del material durante la ejecución también resulta relevante, especialmente cuando existen cambios climáticos, precipitaciones o variaciones en las condiciones de drenaje.

## 5. Densidad en terreno y representatividad de los controles

La determinación de densidad en terreno permite verificar si el procedimiento de compactación ha conseguido alcanzar las condiciones especificadas.

Sin embargo, la confiabilidad de esta verificación depende de una correcta ejecución del ensayo y de la representatividad del punto seleccionado.

El control debe considerar:

1. Identificación del sector y capa sometida a evaluación.
2. Registro de la procedencia del material.
3. Identificación del equipo y procedimiento de compactación.
4. Determinación de la humedad del material.
5. Ejecución del método de densidad en terreno aplicable.
6. Comparación con la referencia de laboratorio correspondiente.

7. Registro e interpretación del resultado.

La selección de puntos de control debe responder al plan de inspección y ensayo, considerando la extensión de la obra, los lotes de producción y las frecuencias establecidas.

No resulta técnicamente apropiado considerar que unos pocos resultados favorables representan necesariamente la totalidad de una capa.

La calidad debe evaluarse sobre la base de controles representativos y criterios de aceptación establecidos.

## 6. El CBR y su relación con la capacidad de soporte

El ensayo CBR permite evaluar la resistencia relativa de un material frente a la penetración de un pistón normalizado, bajo condiciones de ensayo definidas.

Su importancia en las obras viales radica en que proporciona información sobre la capacidad de soporte de determinados materiales utilizados en la estructura del camino.

Sin embargo, es necesario distinguir entre el grado de compactación y el CBR.

El primero representa una relación entre la densidad seca alcanzada y la densidad seca máxima de referencia.

El segundo constituye un indicador de resistencia relativa bajo condiciones específicas de preparación y ensayo.

Ambos parámetros entregan información diferente y complementaria.

Un material puede cumplir el requisito de compactación y, sin embargo, no alcanzar el CBR requerido si sus características intrínsecas no son adecuadas.

De igual manera, un material con buenas características de resistencia potencial puede presentar un comportamiento deficiente si su colocación y compactación no se ejecutan correctamente.

Por esta razón, la caracterización previa del material y el control de su ejecución deben considerarse actividades inseparables.

## 7. El laboratorio como herramienta de prevención

El trabajo del laboratorio vial no debería limitarse a la ejecución de ensayos y emisión de informes.

Su participación debe comenzar antes de la colocación de los materiales, mediante la revisión de antecedentes, identificación de fuentes de abastecimiento y verificación de las características de los materiales propuestos.

Durante la ejecución, debe mantener una comunicación permanente con los responsables de terreno, informando desviaciones y aportando antecedentes técnicos que permitan adoptar medidas correctivas.

Cuando un resultado no cumple las exigencias, la respuesta no debe limitarse a registrar el rechazo.

Es necesario identificar las posibles causas, revisar las condiciones de humedad, verificar la correspondencia del Proctor utilizado y evaluar el procedimiento constructivo.

Esta metodología permite evitar la repetición de errores y contribuye a mejorar la eficiencia de los recursos disponibles.

## 8. Conclusiones

La compactación constituye una operación esencial para garantizar el comportamiento de las capas que conforman la estructura de un pavimento.

Sin embargo, su control debe ir más allá de la obtención de un porcentaje de densidad.

La correcta interpretación de los ensayos Proctor, humedad, densidad en terreno y CBR permite comprender las condiciones reales del material y evaluar su comportamiento frente a las exigencias de la obra.

El laboratorio vial cumple, por tanto, una función técnica estratégica: transformar los resultados de los ensayos en información útil para prevenir deficiencias y respaldar decisiones constructivas.

La calidad de una carretera no se consigue únicamente mediante la utilización de buenos materiales, sino también mediante procedimientos adecuados, controles oportunos y una gestión responsable de la información técnica.

La compactación debe controlarse como un proceso constructivo integral, no simplemente como un resultado porcentual.

## Referencias técnicas


- Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad. Manual de Carreteras, Volumen N.º 5: Especificaciones Técnicas Generales de Construcción.
- Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad. Manual de Carreteras, Volumen N.º 8: Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control.
- Métodos de ensayo correspondientes a caracterización de suelos, relación humedad-densidad, densidad en terreno y capacidad de soporte CBR.