



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**DESARROLLO DE UNA GUIA PROCEDIMENTAL PARA
EL PROCESO DE COMPACTACIÓN DEL LLENO
ESTRUCTURAL EN EL INTERIOR DE BODEGAS EN EL
CENTRO LOGISTICO INDUSTRIAL DEL NORTE (CLIN)**

Autor

John Alexander Ochoa López

**Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia
2020**



Desarrollo de una guía procedimental para el proceso de compactación del
lleno estructural en el interior de bodegas en el Centro Logístico Industrial del
Norte (CLIN)

John Alexander Ochoa López

Informe de práctica
como requisito para optar al título de:
Ingeniero Civil.

Asesora Interna
Derly Estefanny Gómez García

Asesor Externo
Yoel Mendoza

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental.
Medellín, Colombia
2020.

INDICE

1. Resumen.....	4
2. Introducción	5
3. Objetivos	6
3.1 Objetivo general.....	6
3.2 Objetivos específicos	6
4. Marco teórico.....	6
5. Metodología.....	10
6. Resultados y análisis	11
6.1 Ensayos de densidad de campo.....	11
6.2 Análisis granulométricos	18
6.3 Estado actual de la maquinaria	19
6.4 Mejoramiento del proceso de compactación	21
6.4.1 La naturaleza del suelo.....	21
6.4.2 Energía específica	21
6.3 Resultados del mejoramiento del proceso	23
6.4 Análisis de resultados	25
7. Conclusiones	29
8. Referencias	30
9. Anexos	32



DESARROLLO DE UNA GUIA PROCEDIMENTAL PARA EL PROCESO DE COMPACTACIÓN DEL LLENO ESTRUCTURAL EN EL INTERIOR DE BODEGAS EN EL CENTRO LOGISTICO INDUSTRIAL DEL NORTE (CLIN)

1. Resumen

El proceso de compactación es una de las actividades con mayor relevancia para cualquier proyecto de construcción de bodegas industriales. Este representa una sumatoria de conocimientos teóricos y prácticos que cuando se ejecutan en obra, pueden ocasionar diferentes contratiempos e inconvenientes para el buen desarrollo de la programación del proyecto.

Después de realizar un seguimiento a las diferentes actividades asignadas al frente de trabajo como practicante, se evidenció una oportunidad de mejorar el proceso de compactación de las diferentes capas al interior de las bodegas industriales que se encuentran en construcción, a partir de una guía metodológica que cumpliera con los estándares exigidos por la empresa y que al mismo tiempo favoreciera la calidad y el costo de este.

Cuando se inició el desarrollo del proyecto se encontraron diferentes variables que incidían directamente en los resultados del proceso de compactación, tales como: variaciones en el grado de compactación obtenido en campo que generaba problemas con el avance normal de la obra, humedades inferiores o superiores a la humedad óptima, mala homogenización de la base y subbase mezclada en obra y el estado actual de la maquinaria utilizada. En estos aspectos se trató de enfocar el proyecto para lograr obtener una guía metodológica de dicho proceso que generara confiabilidad, calidad y economía para la obra. Por lo tanto, se generó una guía con una estructura procedimental y técnica, que secundara a los nuevos practicantes y operadores; esta guía muestra las cantidades de material (limo, subbase y base) necesarias para producir las diferentes capas con espesores variables, las cantidades de pasadas del vibrocompactador recomendadas para las diferentes capas, las cantidades de agua utilizada para el humedecimiento de los materiales y recomendaciones para generar la confiabilidad necesaria en cada uno de los pasos del proceso.

2. Introducción

El Centro Logístico Industrial del Norte (CLIN) es un proyecto que busca mejorar la competitividad, la calidad de vida y el desarrollo sostenible del departamento. Este puerto seco (CLIN) es un centro logístico de 72 bodegas con más de 200.000 metros cuadrados construidos en un lote de 30 hectáreas que contará además en sus instalaciones con hotel, estación de servicios, plataforma cross-docking, báscula, CDA, banco, cafeterías y una guardería infantil (Semana, 2018).

Uno de los mayores retos que genera la construcción de dichas bodegas industriales es gestar resultados óptimos que combinen variables como calidad, tiempo y economía. Un proyecto de esta magnitud posee diferentes frentes de trabajo los cuales deben estar coordinados en función de los tiempos establecidos para sus entregas, de esta manera se puede observar algunos de los frentes que generan retrasos y activar un seguimiento riguroso para mejorar y optimizar estas actividades.

Una vez asignadas las actividades que se debían realizar a lo largo del tiempo contractual, se identificó en una de ellas la oportunidad de mejora en su calidad. Esta actividad correspondía al proceso de compactación de las diferentes capas de material (limo, subbase y base) utilizadas para generar la capacidad portante del suelo necesaria para las cargas de almacenamiento. Debido al hallazgo de factores variables en dicho proceso, se decidió realizar el presente proyecto con la intención de realizar una guía metodológica que pudiera plasmar de manera concreta y normalizada las diferentes fases de la actividad.

En el seguimiento realizado al proceso de compactación se establecieron los puntos en los cuales su variabilidad incidía en resultados superiores a la densidad seca máxima y a la humedad óptima requerida por el diseño geotécnico. Los factores que se encontraron comprendían aspectos como la humedad de los materiales, la energía específica utilizada en la compactación y diferencias en los análisis granulométricos y las relaciones gravimétricas de los materiales.

Para ejecutar el proyecto planteado, primero se realizó una investigación de la forma en que se desarrollaba el proceso de compactación y así identificar los pasos que generaban la variabilidad en los resultados. También se trató de evaluar el estado en el cual se encontraba las máquinas y sus características para ejecutar las actividades. Posteriormente, se elaboró un plan conjuntamente con el operador encargado de la maquinaria, que permitiera mejorar dicho proceso y ayudara a optimizar los tiempos de ejecución. De esta

manera, se logró obtener una serie de resultados que arrojaron progresos positivos para el proyecto y que permitieron la realización de una guía procedimental y técnica, que apoyara el correcto avance del proceso.

La finalidad de la elaboración de una guía metodológica fue entonces, la realización de un proceso normalizado que ayudara a establecer pasos generales con un estándar que genere confiabilidad y a su vez, optimice recursos que puedan ayudar al avance oportuno de la programación de la obra. Así mismo, presentar esta guía bajo lineamientos pertinentes que permitan una fácil interpretación por parte de los operadores e ingenieros que lo precisen.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Desarrollar una guía metodológica con el proceso de compactación optimizado para el interior de bodegas del CLIN (Centro Logístico Industrial del Norte), mediante el conocimiento de las condiciones actuales de la maquinaria empleada y las variables que dicha actividad posee.

3.2 Objetivos específicos

- Investigar y analizar las condiciones actuales de la maquinaria utilizada para el proceso de compactación. En este caso se cuenta con un vibro-compactador Ingersollrand SD70 y un carrotanque Dumper.
- Calcular los rendimientos y eficiencias de la maquinaria y los operadores requeridos para efectuar todas las actividades propias del proceso de compactación, teniendo en cuenta la variabilidad de los materiales.
- Realizar la guía metodológica teniendo en cuenta toda la información obtenida previamente. Esta guía servirá como un modelo estandarizado del proceso de compactación que podrá ser utilizado por futuros practicantes o profesionales.

4. Marco teórico

CLIN: Es un centro logístico de almacenamiento y carga de productos que se encuentra lejos de la costa, a estos centros también se les conoce con el nombre de "puertos secos". El Centro Logístico Industrial del Norte (CLIN) se encuentra ubicado en el municipio de Girardota y ayudará a reducir el tiempo de transporte de carga y las emisiones de partículas y gases contaminantes en toda el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (Semana, 2018)

Guía Metodológica: Es la sistematización y documentación de un proceso, actividad, práctica, metodología o proceso de negocio. La guía describe las distintas operaciones o pasos en su secuencia lógica, señalando generalmente quién, cómo, dónde, cuándo y para qué han de realizarse. (FOMIN, 2017)

Subbase: Una de las principales funciones de esta capa es netamente económica; en efecto, el espesor total que se requiere para que el nivel de esfuerzos en la subrasante sea igual o menor que su propia resistencia, puede ser construido con materiales de calidad; sin embargo, es preferible distribuir capas más calificadas en la parte superior. La subbase debe soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas. (U. C. C., 1997)

Base: La función fundamental de la base granular consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la subbase los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada. (U. C. C., 1997)

Eficiencia: Es la relación que existe entre los recursos empleados en un proyecto y los resultados obtenidos con el mismo. Hace referencia sobre todo a la obtención con el empleo del menor número de recursos o cuando se alcanzan más metas con el mismo número de recursos o menos. (García, 2017)

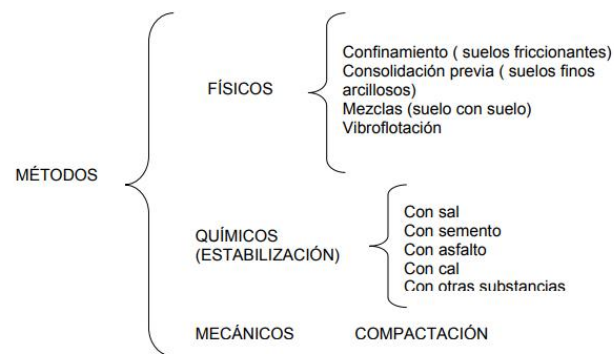
Rendimiento: Proporción entre el producto o el resultado obtenido y los medios utilizados. (RAE, 2019)

Compactación: En general, es la densificación del suelo por medio de la remoción del aire que contiene dicho suelo, lo cual requiere la aplicación de energía mecánica. La compactación incrementa las características de resistencia de los suelos, lo cual incrementa la capacidad de carga de las cimentaciones construidas sobre ellos. (Braja M. Das, 2010)

Densidad Máxima Seca: Esta densidad se determina mediante el ensayo de *Proctor Modificado*, el cual consiste en determinar el valor máximo de compactación de un material bajo condiciones óptimas de humedad. Este ensayo resulta de la necesidad de representar las mayores compactaciones obtenidas en campo. (García, 2017)

Humedad óptima: Es la humedad mediante la cual se alcanza la densidad seca máxima. La humedad óptima se puede obtener mediante la Curva de Compactación. (Duncan, 2014)

Métodos de mejoramiento de los suelos:



Fuente: Rico, 2005

Distribución granulométrica: En cualquier masa de suelo, los tamaños de los granos varían considerablemente. Para clasificar apropiadamente un suelo se debe conocer su distribución granulométrica. Un análisis granulométrico se efectúa tomando una cantidad de suelo seco, bien pulverizado y pasándolo a través de una serie de mallas cada vez más pequeñas y con una charola en el fondo. (Das, 2010)

Curva de compactación: Es la representación gráfica del ensayo *Proctor Estándar o Modificado*, en el cual se puede observar que la densidad aumenta con el aumento de contenido de agua en la muestra pero hasta cierto punto. A partir de este punto con el incremento del contenido de agua, la densidad disminuye. (Duncan, 2019)

Vibro-Compactador: Máquina autopropulsada, de gran peso, dotada de uno o varios rodillos o ruedas cuya función consiste en planificar y dar la compacidad requerida al material sobre el cual se desplaza.

Relaciones gravimétricas y volumétricas de los suelos: En los suelos se distinguen tres fases: la sólida, la líquida y la gaseosa. Entre estas fases es preciso definir un conjunto de relaciones que se refieren a sus pesos y volúmenes, las cuales sirven para establecer la necesaria nomenclatura y para contar con conceptos mensurables. (Del Castillo, 2005)

Peso volumétrico de la masa: Las relaciones entre los pesos y los volúmenes se establecen a través del concepto de peso volumétrico, definido como la relación entre ambas cantidades. (Rico, 2005)

Contenido de humedad: se conoce como cantidad de agua o humedad de un suelo a la relación entre el peso del agua contenida en el mismo y el peso de su fase sólida. (Das, 2010)

Variables que afectan el proceso de compactación: Los resultados de un proceso de compactación dependen de varios factores, tales como: La

naturaleza del suelo, método de compactación, energía específica y contenido de agua del suelo. (Rico, 2005)

La naturaleza del suelo: Es claro que la clase de suelo con que se trababa influye de manera decisiva en el proceso de compactación. Existen gran diferencia entre compactar un suelo fino y un suelo grueso. (Rico, 2005)

Energía específica: Se entiende por energía específica de compactación la que se entrega al suelo por unidad de volumen, durante el proceso mecánico que se trate. (Del Castillo, 2005)

Grado de compactación: En campo se realiza el ensayo de densidad que determinar el grado de compactación con respecto a la densidad seca máxima en el laboratorio. En general, los valores obtenidos deben ser mayores al 90% de la densidad seca máxima. (Rico, 2005)

Amplitud: Se conoce como amplitud a la distancia de una onda con respecto a su posición de equilibrio. (Alzate, 2007)

Frecuencia: La frecuencia equivale a la cantidad de ondas emitidas por segundo. (Alzate, 2007)

Resonancia: Todo cuerpo o sistema tiene una, o varias, frecuencias características, depende mucho de la elasticidad del objeto o sistema en si o de la forma que este tiene. Cuando un sistema es excitado a una de sus frecuencias características, su vibración es la máxima posible. El fenómeno de resonancia se produce cuando la frecuencia angular de la fuerza externa coincide con la frecuencia natural de oscilación del sistema, con un aumento de la amplitud. (Alzate, 2007)

Varianza o desviación estándar: Es una medida de dispersión, o de la variación, de los valores de la variable aleatoria alrededor de la media. (Murray, 2003)

$$\sigma_x = \sqrt{E[(X - \mu)^2]} \quad \text{Ec. (1)}$$

Media aritmética: Es el valor promedio de los datos representativos de una muestra. (Murray, 2003)

$$E(X) = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad \text{Ec. (2)}$$

Esperanza: La esperanza de una muestra se denomina con frecuencia como la media. (Murray, 2003)

$$\mu = E(X) \quad \text{Ec. (3)}$$

5. Metodología

El objetivo general de realizar un proceso de compactación para un suelo es obtener de una manera estructurada un mejoramiento en el comportamiento mecánico del mismo a lo largo de la vida útil del proyecto que se está ejecutando (Rico, 2005). Conocer las variables que afectan el desarrollo normal de esta actividad logra determinar el grado de eficiencia con el cual se están efectuando las fases del proceso.

A partir de la necesidad de conocer el proceso y el estado de la maquinaria con la cual se estaba desarrollando la compactación en el interior de bodegas del proyecto CLIN, se inició con una investigación a cerca de los estudios geotécnicos que debieron haber sido realizados para determinar la conformación que posee el lleno estructural dentro de las bodegas. Posteriormente, se realizó una búsqueda de los análisis granulométricos y ensayos de laboratorio con las relaciones gravimétricas y volumétricas de los materiales empleados para la estructuración del lleno. Por otra parte, se efectuó una investigación para determinar el estado actual de la maquinaria con la cual se estaba ejecutando el proceso de compactación.

Una vez se registraron los datos obtenidos a través de la investigación antes mencionada, se procedió a realizar una consulta bibliográfica que permitiera conocer los estándares y recomendaciones, que con la experiencia y la teoría plasmada en la literatura y en la normatividad para cualquier actividad de compactación, generaran una relación y un cotejo entre los resultados obtenidos en campo y en la consulta. Esta información representaba un paso muy importante para el conocimiento de las características que influyen concretamente en la calidad y la finalidad del proceso de compactación.

De acuerdo a la información obtenida previamente, se elaboró un proceso con las características y recomendaciones encontradas en la literatura para las particularidades de este proyecto, teniendo en cuenta los aspectos con mayor impacto sobre los resultados, las limitaciones encontradas a partir de la investigación y la facilidad ser replicado en cualquier bodega industrial del proyecto. Además, este proceso debía optimizar la cantidad de pasadas del vibrocompactador y la cantidad de agua utilizada para el humedecimiento en la compactación de las diferentes capas, con esto se buscó el aprovechamiento óptimo de los recursos asignados y obtener mejores resultados a los que se producían en los ensayos realizados previos al desarrollo del presente proyecto.

Como resultado de las implementaciones de nuevas directrices en los pasos que constituían el proceso de compactación, se logró diseñar un plan que

mejorara las características antes mencionadas e impactará positivamente en los resultados que se venían obteniendo en los ensayos de densidades de campo – NTC 1667. Partiendo de esta información, se desarrolló una investigación sobre el diseño de un manual/guía que permitiera plasmar de una manera sencilla y técnica, los pasos que se siguieron para la obtención de la mejora procedimental y productiva del proceso de compactación.

6. Resultados y análisis

6.1 Ensayos de densidad de campo

La investigación inició con el análisis de los resultados que se habían obtenido previamente en los ensayos de densidad de campo según la norma NTC 1667, por parte de la empresa Construlab S.A.S, a continuación se presentan los resultados de dichos ensayos con los análisis que se realizaron oportunamente:

Tabla de Resultado CENTRO LOGÍSTICO E INDUSTRIAL DEL NORTE "CLIN" Código: 2395 CL-67928-06-2019											
# pto.	# Mat.	Proctor	Humedad ópt	Proct. dens. seca max kg/m3	Dens seca	% compact.	% humedad	Localización	Proced.	Fecha ensayo	
1	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	1990.89	97.1	8.6	Eje 93-D	Obra	2019-06-06	
2	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	1973.00	96.2	6.8	Eje 95-E	Obra	2019-06-06	
3	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	1996.24	97.4	7.3	Eje 94-G	Obra	2019-06-06	
4	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2059.69	100.5	6.7	Eje 96-I	Obra	2019-06-06	
5	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2090.53	102.0	7.3	Eje 93-J	Obra	2019-06-06	

Tabla 1. Resultados ensayo de densidad de campo – NTC 1667, bodega 121.

Fuente: GOMECO S.A.S, 2019.

A partir de la información mostrada en la Tabla 1, se logra identificar el valor de la humedad óptima y la densidad seca máxima obtenida mediante las normas NTC 1495 y ASTM D698, respectivamente, de los materiales utilizados en la conformación estructural del lleno. Además, presenta el grado de compactación obtenido a partir del ensayo de densidad de campo encontrado en cada uno de los puntos donde se realizó el sondeo al interior de la bodega, el cual debe ser mayor al 95% de la densidad seca máxima según lo exigido por el diseño mencionado por el ingeniero residente; el informe con el diseño realizado para el lleno estructural no fue suministrado por la empresa y por tal motivo no se cuenta con detalles más específicos.

Cabe resaltar que la distribución de los puntos donde se realizaron los ensayos partía de la experiencia del ingeniero residente encargado de este frente y de su

criterio de aleatoriedad para determinar con certeza las características presentes en el lleno estructural.

En la figura 1 se muestra la distribución de los puntos analizados al interior de la bodega 121:

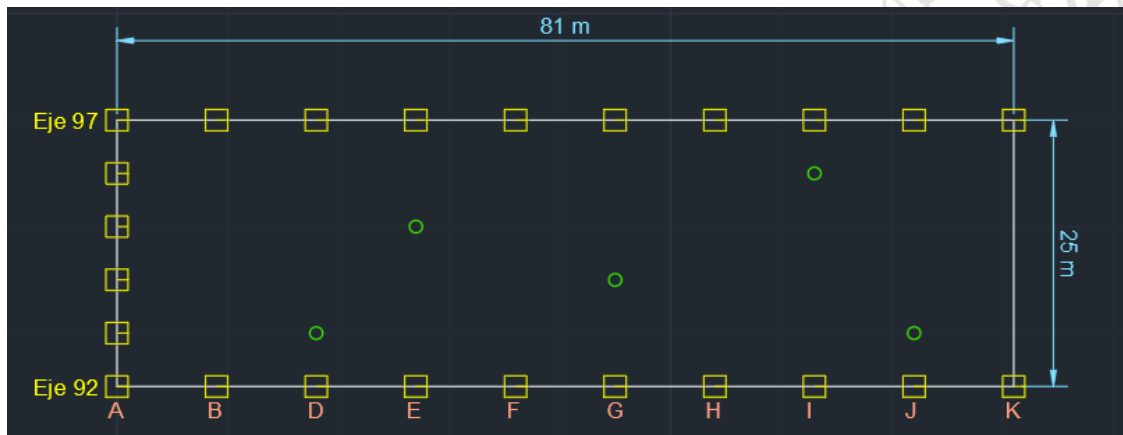


Figura 1. Distribución de los puntos analizados en la bodega 121. Fuente: Propia, 2019.

Para los resultados obtenidos en la bodega 121 se presentó una media aritmética en el grado de compactación igual a 98.6% y para el porcentaje de humedad un valor de 7.3%. Además, se presentó una desviación estándar de 2.2% y 0.7% respectivamente.

A continuación se presenta un ejemplo modelo de los cálculos realizados para determinar los datos estadísticos previamente mostrados y que se utilizaron para el desarrollo del análisis de los demás resultados que se presentaran a lo largo de este ítem:

A partir de las ecuaciones (2), (3) y (1) presentadas en el marco teórico, se calcularon la media aritmética, la esperanza y la desviación estándar de los datos presentados en la tabla 1:

- Para el grado de compactación:

$$E = \frac{97.1 + 96.2 + 97.4 + 100.5 + 102}{5}$$

$$E = 98.6\%$$

$$\mu = 98.6\%$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{(97.1 - 98.6)^2 + (96.2 - 98.6)^2 + (97.4 - 98.6)^2 + (100.5 - 98.6)^2 + (102 - 98.6)^2}{5}}$$

$$\sigma_x = 2.2\%$$

- Para el porcentaje de humedad:

$$E = \frac{8.6 + 6.8 + 7.3 + 6.7 + 7.3}{5}$$

$$E = 7.3\%$$

$$\mu = 7.3\%$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{(8.6 - 7.3)^2 + (6.8 - 7.3)^2 + (6.7 - 7.3)^2}{5}}$$

$$\sigma_x = 0.7\%$$

Después de realizar el análisis de los datos estadísticos antes mencionados, se procedió a realizar un seguimiento a su variabilidad antes y después del presente proyecto, con la finalidad determinar la eficacia de los cambios efectuados en el proceso de compactación. Se presenta a continuación los resultados de los análisis de los demás ensayos de densidades de campo suministrados por la empresa GOMECO S.A.S:

Tabla de Resultado CENTRO LOGÍSTICO E INDUSTRIAL DEL NORTE "CLIN" Código: 2395 CL-68342-07-2019										
# pto.	# Mat.	Proctor	Humedad ópt	Proct. dens. seca max kg/m3	Dens seca	% compact.	% humedad	Localización	Proced.	Fecha ensayo
1	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2015.85	98.3	5.3	Eje 91-R-B-138	Obra	2019-07-09
2	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2043.76	99.7	8.8	Eje 87-Q-B-138	Obra	2019-07-09
3	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	1905.35	92.9	9.5	Eje 89-O-B-138	Obra	2019-07-09
4	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	1861.65	90.8	9.6	Eje 88-M-B-138	Obra	2019-07-09
5	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	1929.08	94.1	9.3	Eje 90-L-B-138	Obra	2019-07-09

Tabla 2. Resultados ensayo de densidad de campo – NTC 1667, bodega 138. Fuente: GOMECO S.A.S, 2019.

Para empezar, se puede apreciar en la tabla 2 que los puntos 3, 4 y 5, presentan insuficiencias para alcanzar el grado de compactación mínimo necesario para lograr la capacidad portante indispensable para cumplir con el diseño del lleno estructural. Esto presentó un problema para el buen desarrollo de la programación ya que se repitió el proceso de compactación

para obtener valores que cumplieran con los estándares pertinentes. Con respecto a los valores obtenidos, se encontró con una media en el porcentaje de humedad de 8,5%, un valor alejado de la humedad óptima y que podría explicar la disminución en el peso volumétrico seco alcanzado en los ensayos (Rico, 2005). No obstante, la energía específica utilizada para la compactación también pudo ser un factor determinante en dichos resultados (Arredondo, 1977), pero de este no se obtuvo ninguna información o registro que pudiera sustentar su impacto.

A continuación, en la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos por el ensayo de densidad de campo después de realizar nuevamente el proceso de compactación al interior de la bodega 138 y los valores obtenidos para la bodega 120. Además, en la figura 2 se presentan en color rojo la ubicación de los puntos analizados que presentaron insuficiencia y en color verde los obtenidos después de la reiteración del proceso. En la figura 3 se expone la ubicación de los puntos examinados en la bodega 120.

Tabla de Resultado CENTRO LOGÍSTICO E INDUSTRIAL DEL NORTE "CLIN" Código: 2395 CL-68476-07-2019										
# pto.	# Mat.	Proctor	Humedad ópt	Proct. dens. seca max kg/m3	Dens seca	% compact.	% humedad	Localización	Proced.	Fecha ensayo
1	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	1963.50	95.8	13.8	Eje 91 J B 120	Obra	2019-07-17
2	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2123.11	103.6	6.4	Eje 90 I B - 120	Obra	2019-07-17
3	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2070.29	101.0	5.7	Eje 87 I B 120	Obra	2019-07-17
4	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2124.28	103.6	6.3	Eje 89 E B120	Obra	2019-07-17
5	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2080.82	101.5	5.1	Eje 91 E B120	Obra	2019-07-17
6	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2096.00	102.2	4.6	Eje 87 D B120	Obra	2019-07-17
7	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2409.66	117.5	-2.5	Eje 91 P - B 138	Obra	2019-07-17
8	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2113.12	103.1	6.9	Eje 8Q - B 138	Obra	2019-07-17
9	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2181.72	106.4	7.9	Eje 91 M - B 138	Obra	2019-07-17
10	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2164.49	105.6	7.9	Eje 87 M - B 138	Obra	2019-07-17

Tabla 3. Resultados ensayo de densidad de campo – NTC 1667, bodega 120 y 138.

Fuente: GOMECO S.A.S, 2019.

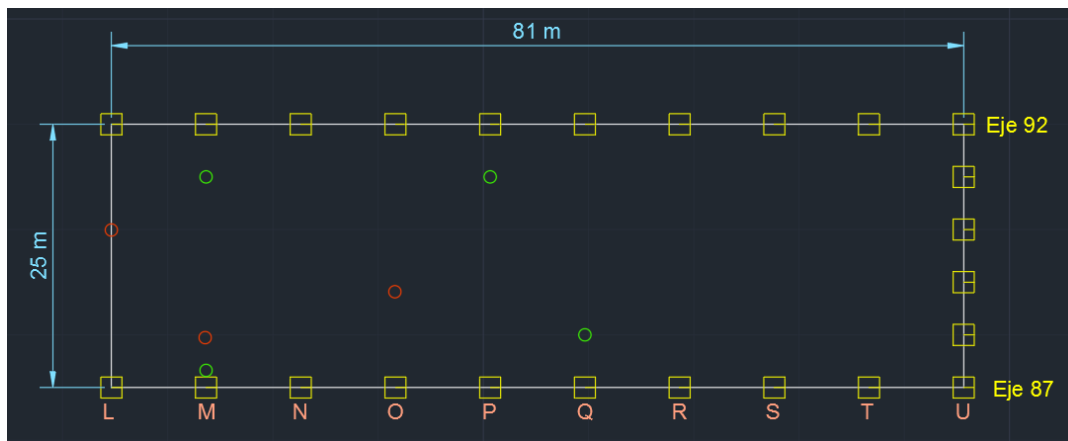


Figura 2. Distribución de los puntos analizados en la bodega 138. Fuente: Propia, 2019.

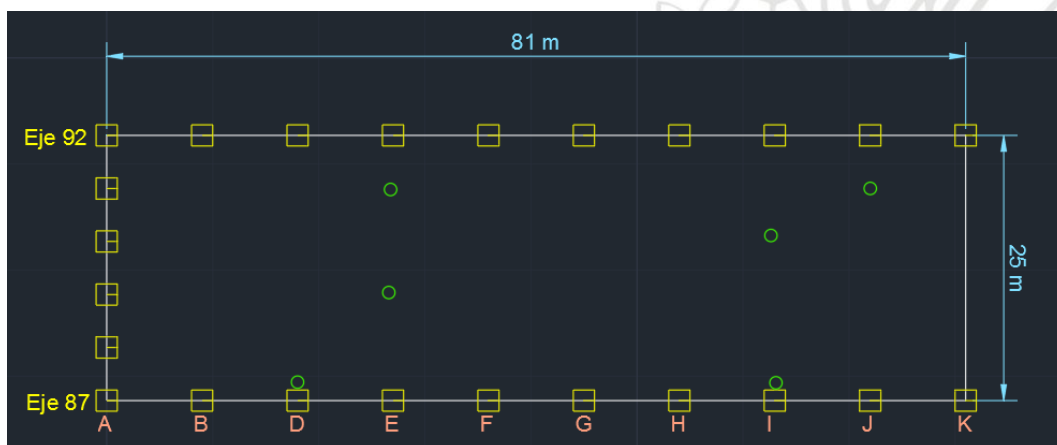


Figura 3. Distribución de los puntos analizados en la bodega 120. Fuente: Propia, 2019.

Como se afirmó anteriormente, el proceso de compactación en la bodega 138 tuvo que ser repetido para lograr los estándares mínimos exigidos por el diseño. Después de realizar dicho procedimiento se obtuvo una media para el grado de compactación de 108,2% y para el porcentaje de humedad de 7,5%. Cabe resaltar que la medición del grado de humedad para el punto 7 arroja un valor negativo, siendo un resultado equivoco ya que el porcentaje de humedad en estado saturado equivale al 100% y en estado seco al 0% (Das, 2001). Por tal motivo, dicho dato se despreció para el desarrollo de los cálculos. Por otra parte, se obtuvo una dispersión en el grado de compactación y en el porcentaje de humedad, medida a través de la desviación estándar, de 5,5% y 0,5% respectivamente.

Se puede apreciar que la disminución de la cantidad de agua presente en el material compactado impactó positivamente en el peso volumétrico seco después del proceso de compactación. Se evidenció entonces la necesidad de controlar las medidas de agua utilizadas para alcanzar el grado de humedad óptimo.

En el análisis realizado para los resultados arrojados en la bodega 120, se puede determinar que en el punto con mayor porcentaje de humedad se presenta el menor grado de compactación, de nuevo se evidencia la influencia de la cantidad de agua sobre los resultados. Para los valores del grado de compactación se obtuvo una media de 101,3% y una desviación estándar de 2,6%, y para el porcentaje de humedad de 7% con una dispersión de 3,11%.

Tabla de Resultado CENTRO LOGÍSTICO E INDUSTRIAL DEL NORTE "CLIN" Código: 2395 CL-68751-08-2019										
# pto.	# Mat.	Proctor	Humedad ópt	Proct. dens. seca max kg/m3	Dens seca	% compact.	% humedad	Localización	Proced.	Fecha ensayo
1	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2062.56	100.6	7.2	Eje 82C - B119	Obra	2019-08-01
2	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2082.29	101.6	6.2	Eje 85C - B119	Obra	2019-08-01
3	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2120.22	103.4	6.0	Eje 83F - B119	Obra	2019-08-01
4	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2052.09	100.1	6.6	Eje 85I - B119	Obra	2019-08-01
5	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2082.81	101.6	7.3	Eje 81I-B119	Obra	2019-08-01

Tabla 4. Resultados ensayo de densidad de campo – NTC 1667, bodega 119.

Fuente: GOMECO S.A.S, 2019.

En la tabla 4 se pueden observar los resultados del sondeo realizado en la bodega 119; en estos se obtuvo una media para el grado de compactación y el porcentaje de humedad de 101,4% y 6,6% respectivamente. Además, una desviación estándar de 1,13% y 0,5%. En la figura 4 se expone la distribución de los puntos analizados en el ensayo de densidad de campo.

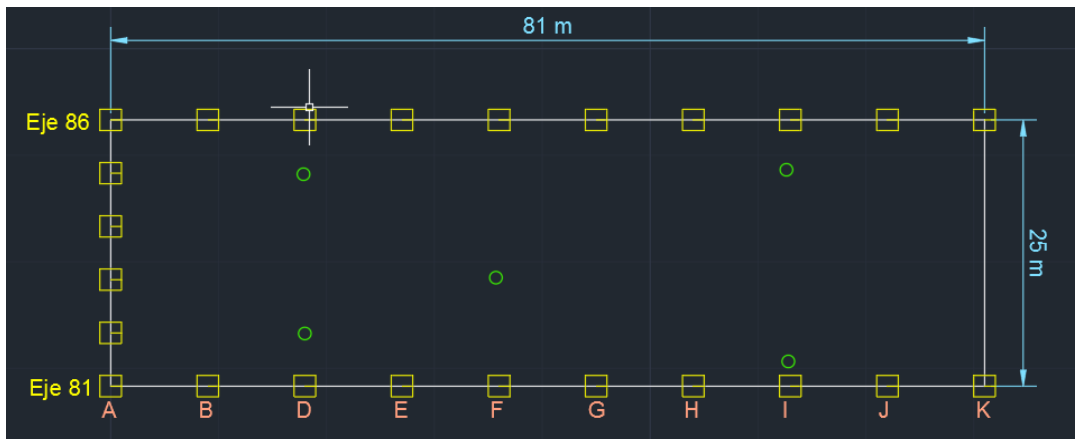


Figura 4. Distribución de los puntos analizados en la bodega 119. Fuente: Propia, 2019.

Los estudios de suelos que se solicitaron al director de obra en los cuales se debía explicar el diseño con el cual se venía estructurando el lleno al interior de la bodegas no fue suministrado, por tal motivo, no se pudo registrar las condiciones que generaron la decisión en la distribución de los espesores que se presentan en la figura 5. No obstante, estas capas era realizadas a partir de los mismos materiales (arenilla y triturado) pero con proporciones diferentes, a excepción de la capa de limo que era suministrada de diferentes lugares ya que la obra tenía permiso para ser utilizada como botadero; el limo que se utilizaba era revisado por el ingeniero residente y de acuerdo a la experiencia y basado en el color y la textura que presentaba, este era descartado o aprobado para su uso.

De acuerdo con lo antes mencionado, las capas base y subbase estaban compuestas por arenilla y triturado, los cuales eran mezclados en obra mediante el uso de un cargador Caterpillar 950, este elaboraba una pila con las cantidades necesarias para la producción de estas en función de los espesores que el ingeniero residente consideraba pertinentes, pero este no garantizaba una homogenización correcta y se podrían generar fácilmente matrices aisladas de material dentro de la mezcla. Las proporciones para las capas están constituidas como se muestran en la tabla 5.

	Arenilla (un)	Triturado (un)
Base	2	1
Subbase	3	1

Tabla 5. Proporciones para el mezclado de base y subbase. Fuente: GOMECA S.A.S, 2019.

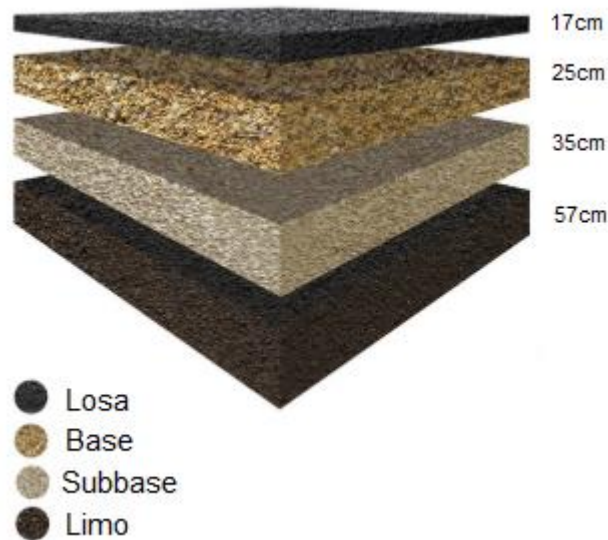


Figura 5. Distribución y espesor de las capas que conforman el lleno estructural al interior de las bodegas en el proyecto CLIN. Fuente: Propia, 2019.

6.2 Análisis granulométricos

El siguiente paso para la determinación de los diversos factores influyentes en la compactación fue conocer los análisis granulométricos de la arenilla y el triturado que se utilizaba para la elaboración de base y subbase. A pesar de la importancia de estos estudios para el desarrollo del presente proyecto, no se logró obtener ningún registro de los resultados de estos ensayos. Sin embargo, el ingeniero residente manifestó que el triturado utilizado para esta mezcla poseía en su gran mayoría un tamaño de partículas de $\frac{3}{4}$ de pulgada.

Después de realizar una investigación con el encargado de la distribución de las volquetas para el acarreo de los materiales comprados para el mezclado de base y subbase, solo se logró obtener una lista de las canteras de las cuales procedían estos materiales, en la tabla 8 se presenta el nombre de estas.

Cantera	Ubicación
Canteras de Colombia	Carrera 42B # 26 – 200 km 2 Autopista Medellín– Bogotá
Renta Soluciones	Antigua vía, Barbosa-Concepción #km 1.5,
Santa Rita	Cl. 28 #87-33, Medellín, Antioquia
MinCivil	Girardota, Antioquia
Pavimentar S.A.	46- Ancón Norte, Cl. 103 #65, Copacabana, Antioquia
Conasfaltos S.A.	Diagonal 51 N° 15 A – 161. Autopista Norte Km 12
Los Lagos	Cl. 46 #54-50, Bello, Antioquia

Tabla 8. Lista de las canteras de las cuales provenían la arenilla y el triturado. Fuente: GOMECS S.A.S, 2019.

6.3 Estado actual de la maquinaria

La maquinaria utilizada para el proceso de compactación estaba conformada por un vibrocompactador IngersollRand SD70D modelo 2006 y un carrotanque con capacidad para $4m^3$ de agua. En las imágenes 1 y 2 se muestra dicha maquinaria:



Imagen 1. Vibrocompactador IngersollRand SD70D modelo 2006. Fuente: Propia, 2019.



Imagen 2. Carrotanque con capacidad para $4m^3$. Fuente: Propia, 2019.

El primer paso para determinar el estado actual de esta maquinaria fue la investigación en el taller de mecánica donde se realizaba el mantenimiento a toda la maquinaria de la obra, esta permitiría conocer la cronología de estos aspectos y sus detalles. No obstante, se encontró con una información incompleta sobre el estado en el cual llegó el vibrocompactador ya que este era usado y solo se tiene registro de los mantenimientos preventivos y correctivos desde el 2016, como se muestra en la tabla 9 (Anexos), suministrada por el ingeniero mecánico encargado del taller.

Al observar detenidamente el registro de estos mantenimientos se pudo determinar que desde la llegada del vibrocompactador a la obra se le han

realizado 11 mantenimientos preventivos, los cuales comprenden cambios de aceite y filtros de aire, combustible y aceite. También, se encontró con el registro de 31 mantenimientos correctivos que abarcan diferentes aspectos de la máquina, tales como: sistema eléctrico, sistema hidráulico, motor y vibrador; en los mantenimientos realizados al vibrador se evidenció una falla constante de la terminal que conecta la energía eléctrica con el rodillo, lo que ocasiona una disminución en la vibración o incluso la nulidad de este.

En todo proceso de compactación existe una eficiencia con la que la energía se aplica; su papel es fundamental, pero su cuantificación muy difícil (Del Castillo, 2005). Por tal motivo, se decidió trabajar con las especificaciones de fábrica de un vibrocompactador IngersollRand SD70D, en la figura 6 se presenta la ficha técnica de dicha máquina.

EQUIPO	PROYECTO	INTERVENSIÓN	F. INGRESO	TIPO MTO.	S. AFECTA	SUBSISTEMA
Carrotanque	CLIN	Técnico	09/08/2019	Correctivo	Motor	Enfriamiento
Carrotanque	CLIN	Técnico	24/08/2019	Correctivo	Freno	Bomba
Carrotanque	CLIN	Técnico	09/09/2019	Correctivo	Transmisión	Troques

Tabla 10. Mantenimientos efectuados al carrotanque. Fuente: GOMECO S.A.S, 2019.

SD-70 PRO-PAC™ Specifications				
	SD-70D PRO-PAC		SD-70F PRO-PAC	
Machine Weights (w/ROPS/FOPS)				
Operating Weight (CECE)	14,035 lb.	(6365 kg)	15,475 lb.	(7020 kg)
Static Weight at Drum	7,440 lb.	(3375 kg)	8,875 lb.	(4025 kg)
Static Weight at Tires	6,595 lb.	(2990 kg)	6,600 lb.	(2995 kg)
Shipping Weight	13,790 lb.	(6255 kg)	15,230 lb.	(6905 kg)
Machine Dimensions				
Overall Length	196 in.	(4975 mm)	196 in.	(4975 mm)
Overall Width	75 in.	(1900 mm)	75 in.	(1900 mm)
Overall Height - top of steering wheel	83 in.	(2110 mm)	85 in.	(2155 mm)
Overall Height - top of ROPS/FOPS	112 in.	(2855 mm)	113 in.	(2870 mm)
Wheelbase	115 in.	(2910 mm)	115 in.	(2910 mm)
Wheel Clearance	15.5 in.	(390 mm)	17.5 in.	(440 mm)
Outside Turning Radius (drum edge)	194 in.	(4925 mm)	194 in.	(4925 mm)
Drum Diameter	48 in.	(1220 mm)	48 in.	(1220 mm)
Drum Diameter Over Pad Feet	-	-	54 in.	(1370 mm)
Drum Width	66 in.	(1675 mm)	66 in.	(1675 mm)
Drum Shell Thickness	0.75 in.	(19 mm)	0.75 in.	(19 mm)
Pad Tip Area	-	-	21 sq. in.	(135 sq cm)
Pad Height	-	-	3 in.	(76 mm)
Number of Pad Feet	-	-		84
Vibration				
Frequency	1100-1900 VPM	(18-32 Hz)	1100-1900 VPM	(18-32 Hz)
Centrifugal Force	30,450 lb.	(135 kN)	30,450 lb.	(135 kN)
Nominal Amplitude	0.071 in.	(1.80 mm)	0.060 in.	(1.53 mm)
Engine				
Make & model	Cummins B3.9-C		Cummins B3.9-C	
Rated power @ 2200 rpm	95 hp	(70.8 kW)	95 hp	(70.8 kW)
Electrical system	12-volt DC, negative ground; 65A alternator, 800 CCA battery			
Propulsion				
Type system	Hydrostatic, two-speed motor on planetary axle/ No-Spin® differential			
Tire size	14.9x24-6 PR R-3		14.9x24-6 PR, R-1	
Travel Speed - high	0-9.3 mph	(0-14.9 km/hr)	0-9.8 mph	(015.8 km/hr)
Travel Speed - low	0-5.1 mph	(0-8.3 km/hr)	0-5.4 mph	(0-8.7 km/hr)
Brakes				
Service	Dynamic hydrostatic through propulsion system			
Parking/Secondary	Spring-Applied, Hydraulically-Released on rear axle			
Miscellaneous Specifications				
Articulation Angle	±40°		±40°	
Oscillation Angle	±17°		±17°	
Fuel Capacity	47 gal.	(178 liters)	47 gal.	(178 liters)
Hydraulic oil capacity	30 gal.	(114 liters)	30 gal.	(114 liters)
Gradeability (theoretical)	67%		52%	

Figura 6. Especificaciones técnicas de un vibrocompactador IngersollRand SD70D.

Fuente: Ingersollrand, 2006.

Por otra parte, se presenta en la tabla 10 los mantenimientos realizados al carrotanque en los cuales se observan 3 correctivos que fueron ejecutados específicamente en el motor, la transmisión y los frenos. Estos mantenimientos no representan cambios significativos en la operación de dicha maquina en el proceso de compactación.

6.4 Mejoramiento del proceso de compactación

La eficiencia de cualquier proceso de compactación depende de varios factores y para poder analizar la influencia particular de cada uno se requiere disponer de procedimientos estandarizados (Del Castillo, 2005). A continuación se enumeran los aspectos más relevantes a la hora de realizar un proceso de compactación (Rico, 2005):

1. La naturaleza del suelo.
2. Método de compactación.
3. Energía específica.
4. El contenido de agua del suelo.
5. El contenido de agua original del suelo.
6. La recompactación.
7. La temperatura.

Una vez realizado el seguimiento a estos aspectos se procedió a determinar en cuales se presentaba una información confiable y se podría realizar un mejoramiento.

6.4.1 La naturaleza del suelo

Como se mencionó anteriormente, la base y subbase eran mezcladas en obra mediante la utilización de arenilla y triturado, pero esta mezcla no garantizaba una homogenización correcta. Por tal motivo, se recomendó realizar un segundo ciclo de mezclado para asegurar un mejoramiento en la composición de estos materiales y que este facilitara su compactación a través del reacomodamiento de las partículas gruesas, suministradas por el triturado, permitiendo una mejor disposición de las partículas finas alrededor del agregado grueso que generara una mejor densificación de los materiales compactados (Rico, 1992).

6.4.2 Energía específica

Una investigación exhaustiva sobre el impacto de la energía aplicada en el proceso de compactación permitió conocer 3 aspectos que incidían en el desarrollo del procedimiento. Se deben definir entonces la resonancia, la

amplitud y la frecuencia emitidas por el rodillo vibrador de acuerdo a las características de los materiales a compactar y de las densidad que se pretenden alcanzar, todo esto en función del espesor de la capa y del número de pasadas (Rico, 1992).

Existe un rango de resonancias suelo-vibrador para las cuales el efecto de ordenación y en consecuencia da mejores resultados (Arredondo, 1977); para el presente proyecto no se logró identificar las características del suelo que se iba a compactar y por tal motivo la determinación de esta relaciones fue imposible.

La amplitud y la frecuencia de la vibración influyen de una manera importante en los rendimientos del proceso de compactación; se tiene que para cada tipo de suelo y el mismo contenido de humedad, existen para la misma máquina unas amplitudes y frecuencias con las que obtienen mejores resultados. Para materiales granulares no cohesivos bien gradados se obtienen mejores resultados con frecuencias altas y amplitudes bajas. Por otro lado, para materiales con altos contenidos de arcilla se evidencia una mejora en la compactación con frecuencias bajas y amplitudes altas (Llamazares, 1977).

Otra de las características que influyen en el proceso de compactación es el peso estático de la máquina, esto se debe a que el efecto vibratorio sobre del suelo se encuentra en función del peso estático y del movimiento del rodillo (Arredondo, 1977). En la figura 6 se muestra un esquema de efecto, donde P representa la carga estática y F la fuerza dinámica generada por la vibración:

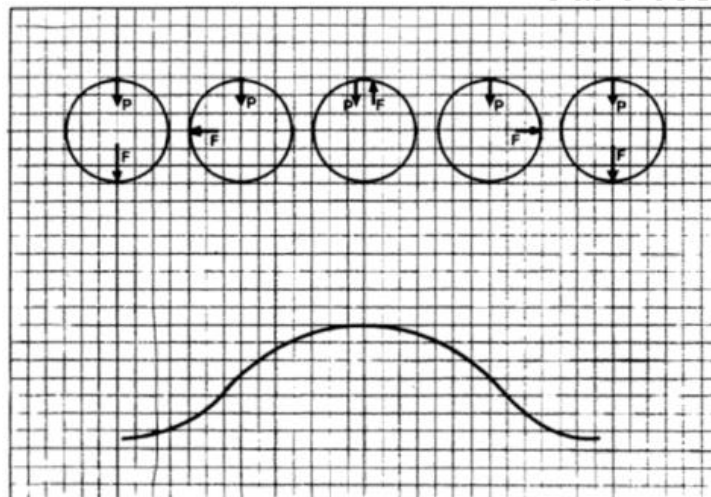


Figura 7. Composición de fuerzas en una compactación vibratoria. Fuente: Arredondo, 1977.

Según la investigación plasmada por un grupo de conferenciantes presentes en uno de los cursillos sobre "Compactación de terrenos, terraplenes y terraplenes. Teoría y práctica", organizado por la organización Materiales, maquinaria y métodos para construcción en la ciudad de Barcelona. Se

identificaron valores a partir de la experiencia de 136 ingenieros para el número de pasadas, en función solo del peso estático del rodillo vibratorio utilizado y del espesor de la capa compactada, siendo estos datos pertinentes para el presente proyecto ya que no se contó con la posibilidad de variar las amplitudes ni las frecuencias del rodillo en el vibrocompactador IngersollRand SD70D.

En el documento previamente mencionado se muestra que para espesores de capa entre 80cm y 100cm, con un peso estático entre 8 y 10 toneladas; es suficiente con un número de pasadas entre 4 y 6 para generar una densificación adecuada en un material bien gradado no cohesivo. Como se mostró en la figura 6, el peso estático de la maquina utilizada equivale a un valor de 6.4 toneladas, por tal motivo el espesor de la capa debía ser menor a la presentada anteriormente (Arredondo, 1977). Sin embargo, los espesores utilizados en el lleno estructural del proyecto permiten ejecutar el proceso de compactación con los valores aquí presentados.

Se realizó una consulta con el operador del vibrocompactador para determinar cómo se venía desarrollando la compactación de las diferentes capas antes de la ejecución de este proyecto y este expresó que se realizaban 6 pasadas en dirección longitudinal de las bodegas y 2 en sentido transversal. No obstante, también argumentó que estas cantidades estaban basadas en su experiencia y no eran exigidas por el ingeniero residente.

6.3 Resultados del mejoramiento del proceso

En el numeral anterior se presentó la justificación en las decisiones tomadas para el mejoramiento y estructuración de un nuevo proceso de compactación que presentara mejoras en los resultados obtenidos en los ensayos de densidad en campo futuros, a continuación se presenta un análisis de dichos resultados:

Tabla de Resultado CENTRO LOGÍSTICO E INDUSTRIAL DEL NORTE "CLIN" Código: 2395 CL-69385-09-2019										
# pto.	# Mat.	Proctor	Humedad ópt	Proct. dens. seca max kg/m3	Dens seca	% compact.	% humedad	Localización	Proced.	Fecha ensayo
1	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	1966.43	95.9	4.8	Bodega 137, eje 85 columna (E)	Obra	2019-09-17
2	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2018.39	98.5	5.9	Bodega 137, eje 82 columna (E)	Obra	2019-09-17
3	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	1936.65	94.5	6.3	Bodega 137, eje 83 columna (G)	Obra	2019-09-17
4	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	1994.17	97.3	5.3	Bodega 137, eje 84 columna (I)	Obra	2019-09-17
5	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	1990.84	97.1	6.1	Bodega 137, eje 82 columna (I)	Obra	2019-09-17

Tabla 11. Resultados ensayo de densidad de campo – NTC 1667, bodega 137.

Fuente: GOMECO S.A.S, 2019.

En la tabla 11 se presentan los resultados obtenidos después de poner en marcha los ajustes efectuados al proceso de compactación. Se encontró con una media en el grado de compactación igual a 96,6% con una desviación estándar de 1,32% y una media en el porcentaje de humedad de 5,7% con una desviación estándar de 0,5%.

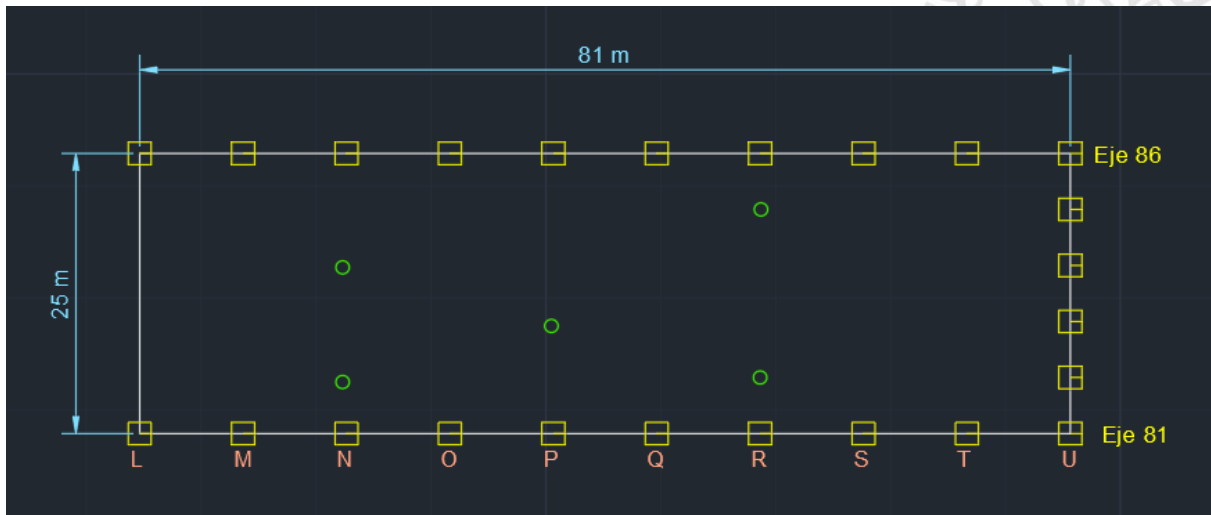


Figura 8. Distribución de los puntos analizados en la bodega 137. Fuente: Propia, 2019.

En la figura 8 se puede apreciar la forma en la cual se distribuyeron los puntos donde se realizaron los ensayos de densidad de campo al interior de la bodega 137.

Tabla de Resultado CENTRO LOGÍSTICO E INDUSTRIAL DEL NORTE "CLIN" Código: 2395 CL-69716-10-2019										
# pto.	# Mat.	Proctor	Humedad ópt	Proct. dens. seca max kg/m3	Dens seca	% compact.	% humedad	Localización	Proced.	Fecha ensayo
1	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2155.33	105.1	5.4	79 D Bodega 136	Obra	2019-10-03
2	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2127.02	103.8	5.6	75 D Bodega 136	Obra	2019-10-03
3	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2117.72	103.3	5.9	77 G Bodega 136	Obra	2019-10-03
4	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	1949.11	95.1	8.1	76 I Bodega 136	Obra	2019-10-03
5	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2019.34	98.5	4.9	78 I Bodega 136	Obra	2019-10-03

Tabla 12. Resultados ensayo de densidad de campo – NTC 1667, bodega 136.

Fuente: GOMECO S.A.S, 2019.

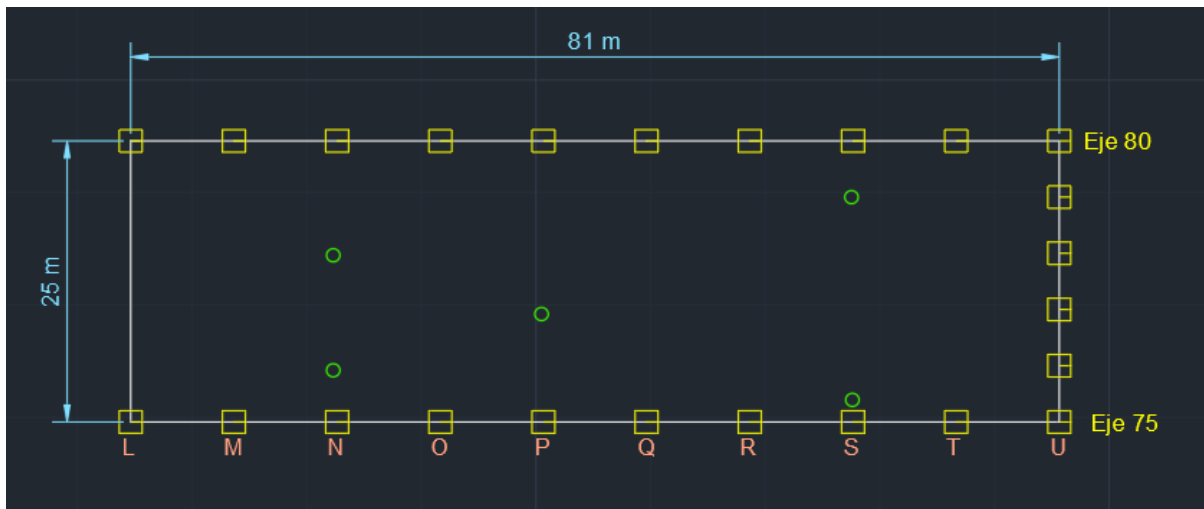
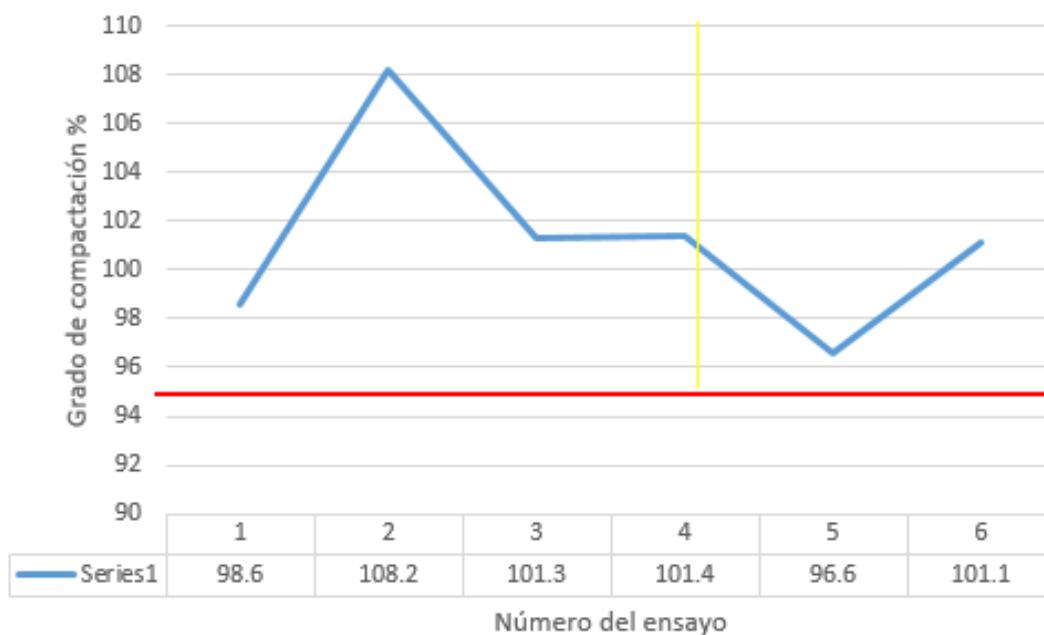


Figura 9. Distribución de los puntos analizados en la bodega 137. Fuente: Propia, 2019.

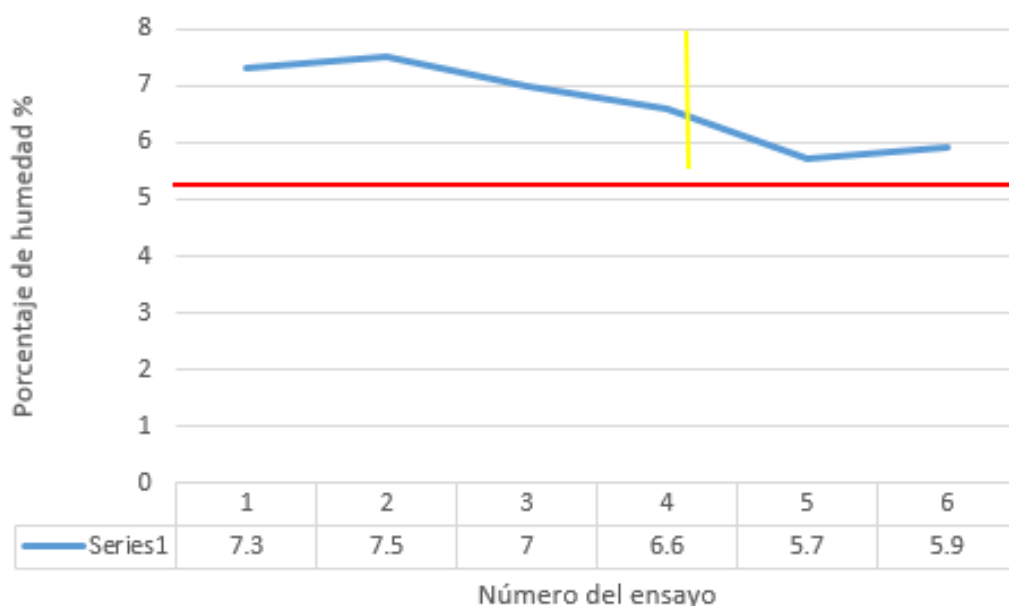
Los resultados que se muestran en la tabla 12 corresponden al segundo y último ensayo de densidad de campo realizado bajo las mejores que se le presentaron al proceso de compactación. En estos resultados se obtuvo una media de 101,1% para el grado de compactación con una desviación estándar de 3,7% y una media para el porcentaje de humedad de 5,9% con una desviación de 1.1%. En los datos presentados se pueden evidenciar que el punto 4 el cual posee un mayor porcentaje de humedad muestra el menor grado de compactación. Esta tendencia fue constante a lo largo de todos los resultados presentados.

6.4 Análisis de resultados

En la gráfica 1 se muestran los promedios obtenidos para el grado de compactación en cada uno de los ensayos presentados en los numerales 6.1 y 6.3, antes (1 al 4) y después (5 y 6) del mejoramiento del proceso de compactación implementado en el proyecto. Se puede observar una mejora importante en el resultado del ensayo de densidad de campo número 5, el cual no se pudo replicar en el ensayo 6. Esta variación se pudo presentar por alguno de los aspectos ya mencionados que inciden sobre los resultados de esta actividad constructiva y que su control para este caso en particular es altamente difícil de obtener. La línea roja representa el grado de compactación mínimo exigido para la construcción del lleno estructural, según lo indicado en el numeral 6.1, y la línea amarilla el momento en el cual se empezaron a aplicar los cambios en el proceso:

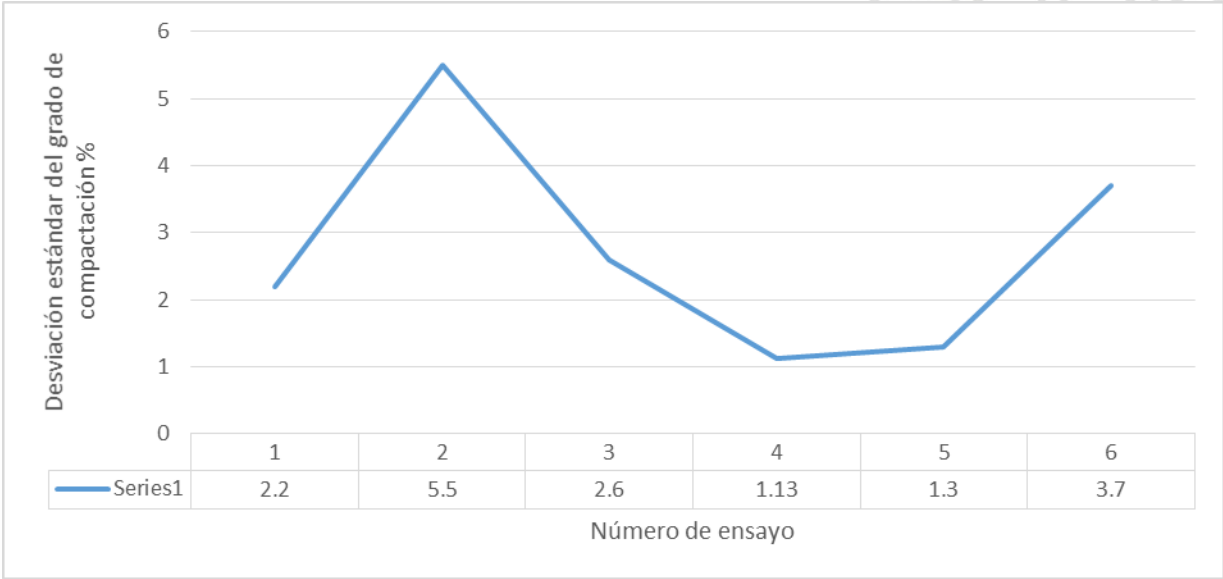


Grafica 1. Promedios del grado de compactación obtenidos en los ensayos de densidad de campo en los numerales 6.1 y 6.3. Fuente: Propia, 2020.

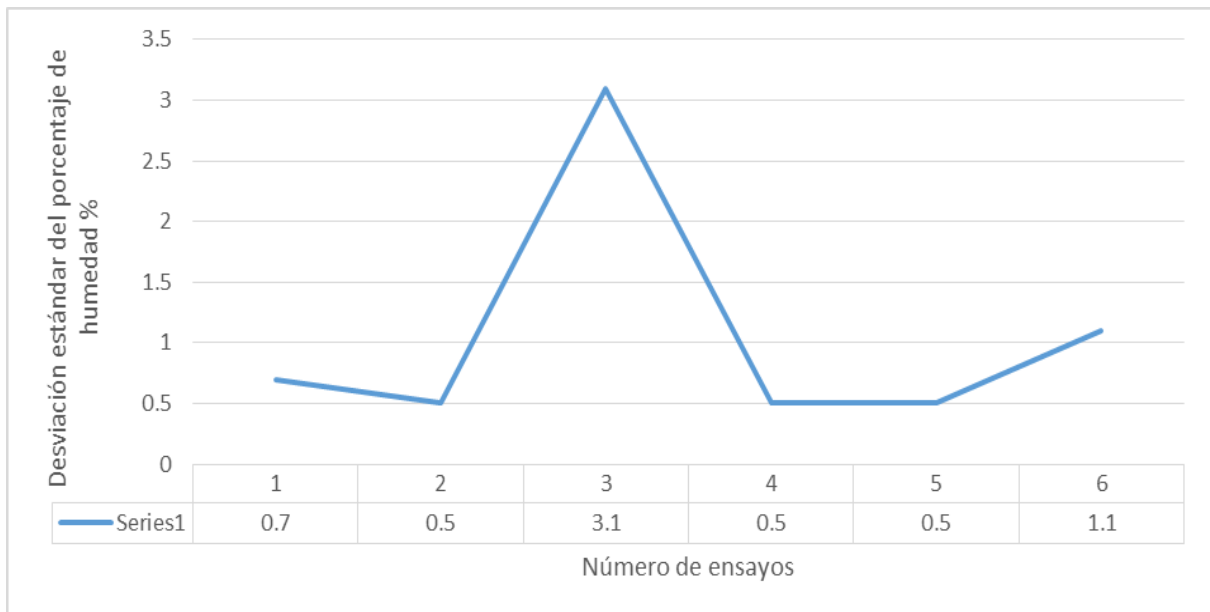


Grafica 2. Promedios del porcentaje de humedad obtenidos en los ensayos de densidad de campo en los numerales 6.1 y 6.3. Fuente: Propia, 2020.

En la gráfica 2 se presentan los resultados obtenidos para el promedio del porcentaje de humedad en los ensayos antes y después (línea amarilla) de la mejora realizada al proceso de compactación; la línea roja representa el porcentaje de humedad óptima en el cual se obtuvo la densidad seca máxima, datos presentados en los análisis de las tablas mostradas en los numerales 6.1 y 6.3. En estos resultados se puede evidenciar el notable mejoramiento que obtuvieron los datos al lograr acercar los valores del promedio del porcentaje de humedad en los puntos examinados a la humedad óptima, ya que estos representan un ahorro en recursos y tiempo para el proyecto. Además, garantizan un grado de compactación mayor al mínimo exigido, lo cual permitirá tener la confiabilidad en el proceso y eliminar la posibilidad de tener que repetir el proceso de compactación, tal y como se registró en el segundo ensayo de densidad de campo analizado.



Grafica 3. Desviación estándar de los grados de compactación obtenidos en los diferentes ensayos. Fuente: Propia, 2020.



Grafica 4. Desviación estándar de los porcentajes de humedad obtenidos en los diferentes ensayos. Fuente: Propia, 2020

En la graficas 3 y 4 se presentan los resultados obtenidos en el cálculo de las desviaciones estándar tanto del grado de compactación como del porcentaje de humedad presentados por los ensayos de densidad de campo. Se puede observar que para la dispersión de los datos en el grado de compactación no se logró un mejoramiento notable. Esto se puede sustentar bajo la variabilidad de los aspectos que influyen directamente en la calidad de la compactación y que fueron definidos con anterioridad. Por último, en las desviaciones estándar presentadas para el porcentaje de humedad de los ensayos se logró continuar con los valores que se obtuvieron previamente y que generaban una buena confiabilidad en el humedecimiento uniforme de las capas antes de su compactación.

En resumen, el mejoramiento del proceso logró obtener resultados positivos que representan una optimización de recursos y tiempo para el proyecto. El aspecto más importante que se pudo mejorar fue el porcentaje de humedad, logrando obtener un acercamiento importante a la humedad óptima definida en el numeral 6.1. Por otro lado, los resultados en el ensayo de densidad de campo número 5 se logró obtener una aproximación importante al grado de compactación exigido. No obstante, no se logró mejorar las desviaciones estándar de los resultados, estos buscaban mejorar la uniformidad entre los datos obtenidos. Posteriormente, se plasmó esta información a través de una guía que replicara los pasos que se realizaron para obtener las mejoras antes mencionadas y que se pudiera consultar con facilidad. En la sección de Anexos se presenta esta guía procedimental que se obtuvo como resultado principal del presente proyecto.

7. Conclusiones

- A lo largo del proceso de compactación se presentaron diversos factores que incidieron directamente sobre los resultados de este, tales como: características de los materiales, contenido de humedad, cambios en el proceso y uso de la maquinaria, y la energía específica aplicada. No obstante, se evidenció una amplia dificultad para controlar estos aspectos en la obra debido a la carencia de información de los mismos.
- El contenido de humedad y la energía específica aplicada son dos de los aspectos con mayor relevancia para el proceso de compactación. Después de realizar los ajustes pertinentes a estos factores se evidenció un mejoramiento en los resultados y un ahorro de recursos y tiempo para el proyecto.
- Para determinar el estado de operación de la maquinaria utilizada para el proceso de compactación, es de vital importancia realizar un registro oportuno y detallado de los mantenimientos preventivos y correctivos desde que esta sale de fábrica. Al no presentarse esta información fue imposible conocer el estado actual de la maquinaria utilizada para el proceso.
- Una vez se inició la elaboración de la guía procedimental se encontró que este tipo de herramientas son muy comunes dentro de las empresas y proyectos, para facilitar las labores y garantizar un proceso estandarizado y optimizado. Esta guía presenta con un orden cronológico los pasos que se deben seguir, con sus respectivas recomendaciones, para generar los resultados que llevaron al mejoramiento en los resultados para el grado de humedad y el grado de compactación.

8. Referencias

- Un puerto en medio de las montañas: así será el centro logístico más grande de Antioquia. (17 de diciembre de 2018). *Revista Semana*. Recuperado de <https://www.semana.com/contenidos-editoriales/>
- Duncan, J., Wright, S., Brandon, T. (2014). *Soil Strength and Slope Stability*. New Jersey, USA: Editorial John Wiley & Sons, Inc.
- Universidad Católica de Colombia. (1997). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*. Bogotá, Colombia: Editorial Alfonso Montejo.
- García, I. (2017). *Definición de Eficiencia*. Recuperado de <https://www.economiasimple.net/glosario/eficiencia>
- Tarbuck, E. J., y Lutgens, F. K. (2005). *Ciencia de la Tierra Octava Edición*. Madrid, España: Editorial Pearson Prentice Hall.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. Nueva York, USA: Editorial John Wiley & Sons, Inc.
- Das, B. M. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica Cuarta Edición*. Santa Fe, México: Editorial Cengage Learning, Inc.
- García, E. (2017). *Diapositivas del curso "Mecánica de Suelos"*.
- Diccionario Real Academia Española. (2019)
- Rico, A., Del Castillo, H. (2005). *La ingeniería de suelos en vías terrestres*. México: Editorial Limusa S.A.
- Rico, A., Del Castillo, H. (1992). *Consideraciones sobre compactación de suelos en obras de infraestructura de transporte*. México: Secretaria de Comunicaciones y Transporte.
- Arredondo, F., Giménez, F., Jiménez, J., Llamazares, O., De Navacerrada, G., Sendin, M. (1977). *Compactación de Terrenos. Terraplenes y pedraplanes. Teoría y práctica*. Barcelona, España: Editorial Editores Técnicos Asociados S.A.
- Murray, R., Schiller, J., Srinivasan, A. (2003). *Probabilidad y Estadística*. México: Editorial McGraw Hill

- Das, B. M. (2015). *Principles of Geotechnical Engineering Septima Edición*. Stamford, USA: Editorial Cengage Learning, Inc.
- Gonzales, A. (2010). *Instructivo para la elaboración de un manual técnico*. Habana, Cuba: Soluciones Informáticas CETA.
- Secretaria de Comunicaciones y Transporte. *Guía técnica para la elaboración de manuales de procedimientos*. México, 2009.
- NTC 1667: 2002 - Método de Ensayo para Determinar la Densidad y el Peso Unitario en el Terreno. Método del Cono de Arena.
- ASTM D698 – Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))
- NTC 1495: 2013 - Método de Ensayo para Determinar en el Laboratorio el Contenido de Humedad de Suelos y Rocas, con Base en la Masa.



9. Anexos



EQUIPO	PROYECTO	F. INGRESO	TIPO MTO.	S. AFECTA	SUBSISTEMA
SD70D	CLIN	11/02/2016	Correctivo	Hidráulico	Motor Vibración
SD70D	CLIN	07/04/2016	Preventivo	Motor	Lubricación
SD70D	CLIN	31/04/2016	Preventivo	Motor	Admisión
SD70D	CLIN	03/03/2016	Preventivo	Motor	Lubricación
SD70D	CLIN	27/04/2016	Correctivo	Eléctrico	Alternador
SD70D	CLIN	08/06/2016	Preventivo	Motor	Lubricación
SD70D	CLIN	09/07/2016	Evaluación	Motor	Admisión
SD70D	CLIN	25/07/2016	Preventivo	Motor	Lubricación
SD70D	CLIN	02/08/2016	Correctivo	Eléctrico	Encendido
SD70D	CLIN	03/08/2016	Correctivo	Motor	Exhosto
SD70D	CLIN	16/08/2016	Correctivo	Motor	Combustible
SD70D	CLIN	16/08/2016	Correctivo	Motor	Eléctrico
SD70D	CLIN	12/09/2016	Correctivo	Motor	Eléctrico
SD70D	CLIN	30/09/2016	Preventivo	Motor	Lubricación
SD70D	CLIN	24/12/2016	Preventivo	Motor	Lubricación
SD70D	CLIN	13/01/2017	Correctivo	Motor	Eléctrico
SD70D	CLIN	13/01/2017	Correctivo	Motor	Distribución
SD70D	CLIN	23/01/2017	Preventivo	Motor	Lubricación
SD70D	CLIN	05/10/2017	Correctivo	Traslación	Reductor
SD70D	CLIN	05/10/2017	Correctivo	Hidráulico	Aceite
SD70D	CLIN	20/01/2018	Preventivo	Motor	Lubricación
SD70D	CLIN	22/02/2018	Correctivo	Motor	Turbo
SD70D	CLIN	25/02/2018	Correctivo	Motor	Motor
SD70D	CLIN	18/02/2019	Correctivo	Hidráulico	Rodillo
SD70D	CLIN	06/03/2019	Correctivo	Distribución	Patín tensor
SD70D	CLIN	10/03/2019	Correctivo	Rodillo	Rodillo
SD70D	CLIN	26/03/2019	Correctivo	Motor	Inyección
SD70D	CLIN	11/04/2019	Preventivo	Motor	Lubricación
SD70D	CLIN	24/04/2019	Correctivo	Chasis	Amortiguador
SD70D	CLIN	11/05/2019	Correctivo	Motor	Escape
SD70D	CLIN	06/06/2019	Correctivo	Enfriamiento	Manguera
SD70D	CLIN	17/06/2019	Correctivo	Motor	Correa
SD70D	CLIN	20/06/2019	Correctivo	Soporte	Mount
SD70D	CLIN	27/06/2019	Correctivo	Amortiguación	
SD70D	CLIN	04/07/2019	Preventivo	Motor	Lubricación
SD70D	CLIN	08/07/2019	Correctivo	Hidráulico	Rodillo
SD70D	CLIN	17/07/2019	Correctivo	Motor	Escape
SD70D	CLIN	18/07/2019	Correctivo	Motor	Escape
SD70D	CLIN	20/08/2019	Correctivo	Rodillo	Mount
SD70D	CLIN	03/09/2019	Correctivo	Eléctrico	Vibrador
SD70D	CLIN	06/09/2019	Correctivo	Eléctrico	Tablero
SD70D	CLIN	09/09/2019	Correctivo	Eléctrico	Alternador
SD70D	CLIN	09/09/2019	Preventivo	Motor	Lubricación
SD70D	CLIN	24/09/2019	Correctivo	Suspensión	Mount
SD70D	CLIN	04/10/2019	Correctivo	Motor	Filtro

Tabla 9. Registro de mantenimientos preventivos y correctivos del vibrocompactador IngersollRand SD70D. Fuente: GOMECO S.A.S, 2019.

***Guía procedimental para el proceso de compactación del lleno
estructural al interior de las bodegas industriales en el proyecto
CLIN (Centro Logístico Industrial del Norte)***

*Centro Logístico Industrial del Norte
Frente de trabajo: lleno estructural al interior de bodegas.
Elaborado por:
John Alexander Ochoa López
Estudiante de Ingeniería Civil
Universidad de Antioquia*

***Guía procedimental para el proceso de compactación del lleno
estructural al interior de las bodegas industriales en el proyecto
CLIN (Centro Logístico Industrial del Norte)***

Enero del 2020

**Guía procedimental para el proceso de compactación del lleno
estructural al interior de las bodegas industriales en el proyecto
CLIN (Centro Logístico Industrial del Norte)**

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	36
2. OBJETIVO	36
3. PROCEDIMIENTO	37
3.1 Propósito del procedimiento	37
3.2 Responsabilidades	37
3.3 Definiciones	37
3.3.1 Compactación	37
3.3.2 Densidad Seca Máxima	37
3.3.3 Humedad Óptima	37
3.3.4 Base	37
3.3.5 Subbase	37
3.3.6 Estructura del lleno	38
3.4 Maquinaria	38
3.4.1 Motoniveladora Caterpillar 950	38
3.4.2 Vibrocompactador IngersollRand SD70D	38
3.4.3 Carrotanque	39
3.4.4 Volqueta	39
3.4.5 Cargador Caterpillar 950	39
3.5 Equipos	40
3.5.1 Nivel laser Leica Rugby 640	40
3.6 Recomendaciones	40
3.7 Proceso de compactación	41
4. REFERENCIAS	43

Guía procedimental para el proceso de compactación del lleno estructural al interior de las bodegas industriales en el proyecto CLIN (Centro Logístico Industrial del Norte)

1. INTRODUCCIÓN

La presente guía muestra el proceso de compactación del lleno estructural al interior de las bodegas industriales presentes en el proyecto CLIN, con el aprovechamiento de los recursos presentes y la estandarización de los pasos requeridos por el proceso, la cual busca la facilidad para ser replicados en las demás bodegas que se van a construir y cuentan con las mismas características en conformación de los llenos estructurales.

Esta guía servirá como consulta para los operadores de la maquinaria utilizada en el proceso de compactación, así como para los ingenieros, tecnólogos y practicantes que requieran conocer dicho proceso o que a su vez busquen una optimización del mismo.

2. OBJETIVO

Presentar una guía procedimental con el proceso de compactación optimizado para el interior de bodegas del CLIN, mediante el conocimiento de las condiciones actuales de la maquinaria empleada y las variables que dicha actividad posee, generando resultados que conjuguen calidad, economía y tiempo, que se vean reflejados en el buen desarrollo de los cronogramas estipulados para el proyecto.

Guía procedimental para el proceso de compactación del lleno estructural al interior de las bodegas industriales en el proyecto CLIN (Centro Logístico Industrial del Norte)

3. PROCEDIMIENTO

3.1 Propósito del procedimiento

Realizar un proceso de compactación estandarizado que cumpla con los estándares exigidos por la empresa y que a su vez secunde a los diferentes empleados que se vean relacionados con el proyecto.

3.2 Responsabilidades

La presente guía no condiciona al ingeniero residente para su seguimiento ni representa un documento legal, esta solo es una recomendación realizada a través de la investigación lograda en el tiempo durante el cual se desarrollaron las practica académicas.

3.3 Definiciones

3.3.1 Compactación

En general, es la densificación del suelo por medio de la remoción del aire que contiene dicho suelo, lo cual requiere la aplicación de energía mecánica. La compactación incrementa las características de resistencia de los suelos, lo cual incrementa la capacidad de carga de las cimentaciones construidas sobre ellos.

3.3.2 Densidad Seca Máxima

Esta densidad se determina mediante el ensayo de *Proctor Modificado*, el cual consiste en determinar el valor máximo de compactación de un material bajo condiciones óptimas de humedad. Este ensayo resulta de la necesidad de representar las mayores compactaciones obtenidas en campo.

3.3.3 Humedad Óptima

Es la humedad mediante la cual se alcanza la densidad seca máxima. La humedad óptima se puede obtener mediante la Curva de Compactación.

3.3.4 Base

La función fundamental de la base granular consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la subbase los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada.

3.3.5 Subbase

La subbase debe soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas a través de la base.

Guía procedimental para el proceso de compactación del lleno estructural al interior de las bodegas industriales en el proyecto CLIN (Centro Logístico Industrial del Norte)

3.3.6 Estructura del lleno

A continuación se presenta en la imagen 1 la distribución de los espesores necesarios de cada capa para conformar el lleno estructural:

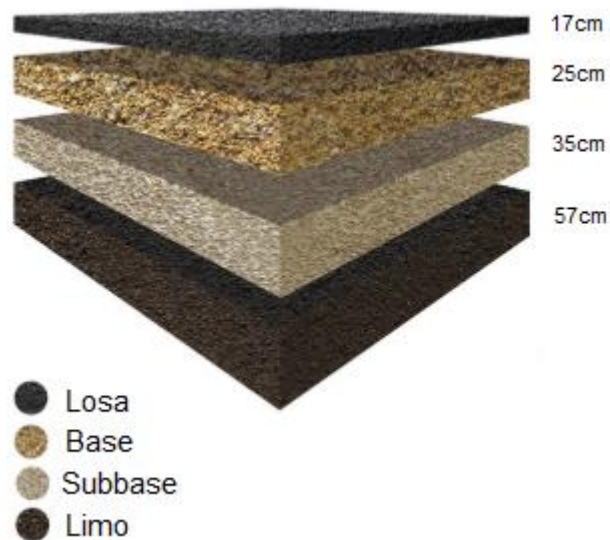


Imagen 1. Estructura del lleno al interior de bodegas.

3.4 Maquinaria

3.4.1 Motoniveladora Caterpillar 950

Esta máquina es utilizada para repartir, nivelar y perfilar el material utilizado en la conformación de las capas a compactar.



3.4.2 Vibrocompactador IngersollRand SD70D

Esta máquina es la encargada de compactar los materiales a través de un rodillo vibratorio.



Guía procedimental para el proceso de compactación del lleno estructural al interior de las bodegas industriales en el proyecto CLIN (Centro Logístico Industrial del Norte)

3.4.3 Carrotanque

Vehículo utilizado para el humedecimiento de los materiales, este posee una capacidad de $4m^3$ de agua.



3.4.4 Volqueta

Estas máquinas son utilizadas para acarrear los materiales con una capacidad de $14m^3$.



3.4.5 Cargador Caterpillar 950

Esta máquina es utilizada para mezclar los materiales (arenilla y triturado) al interior de las bodegas dependiendo de la capa que se necesita producir.



Guía procedimental para el proceso de compactación del lleno estructural al interior de las bodegas industriales en el proyecto CLIN (Centro Logístico Industrial del Norte)

3.5 Equipos

3.5.1 Nivel laser Leica Rugby 640

Este equipo ayuda a realizar la nivelación de las capas a través de un láser giratorio que indica las fluctuaciones de los niveles antes y después de la compactación.



3.6 Recomendaciones

- Para calcular las cantidades de material (limo, arenilla y triturado) necesarios para las diferentes capas, se presenta en la tabla 1 dichas cantidades en función de los espesores requeridos. Esto ayudará a reconocer con mayor agilidad la cuantía de viajes (1 viaje equivale a $14m^3$ de material) que se necesitan ingresar en la bodega por cada tipo de material.
- Se recomienda realizar una escarificación uniforme después de compactar cada capa para mejorar el agarre de la capa que posteriormente será compactada encima de esta.
- Para garantizar una homogenización correcta de los materiales para la producción de base y subbase, se recomienda realizar dos ciclos de mezclado.
- Realizar un seguimiento oportuno a los resultados arrojados por el ensayo de densidad de campo. Esto con el ánimo de mantener un constante mejoramiento del proceso permitiendo conocer las variables representativas y aplicar los protocolos oportunos.
- Se recomienda dejar un espacio amplio para la maniobrabilidad del cargador en el proceso de mezclado, esto aumentará el rendimiento de la actividad.

Guía procedimental para el proceso de compactación del lleno estructural al interior de las bodegas industriales en el proyecto CLIN (Centro Logístico Industrial del Norte)

Base			
Espesor (cm)	Arenilla (Viaje)	Triturado (Viaje)	Limo (Viajes)
10	10	5	-
15	16	8	-
20	20	10	-
25	26	13	-
Subbase			
10	12	4	-
15	18	6	-
20	24	8	-
25	30	10	-
30	36	12	-
35	42	14	-
Limo			
10	-	-	15
20	-	-	29
30	-	-	44
40	-	-	58
50	-	-	73

Tabla 1. Cantidades de materiales para realizar las diferentes capas del lleno estructural en función de diferentes espesores. Fuente: Propia, 2020.

3.7 Proceso de compactación

Paso	Maquinaria	Actividad
1	Volquetas	En este paso se deberá analizar la cantidad de material necesario para la conformación de la capa de limo, de acuerdo al nivel en el que se encuentra dicha capa. Una vez se conozca la cantidad se debe proceder a dirigir las volquetas al lugar indicado
2	Motoniveladora	Después de ubicar los materiales, la motoniveladora procederá a repartir este material.
3	Vibrocompactador	En este proceso el vibrocompactador realizará entre 4 y 6 pasadas, dependiendo del espesor de la capa. Entre 10cm y 30cm se realizaran 4 pasadas, para espesores mayores 6 pasadas. Nota: El contenido de humedad del limo permitirá su compactación sin necesidad de humedecerlo.
4	Volquetas	Después de compactar, nivelar y escarificar la capa de limo, se procederá a ingresar el material necesario para realizar la capa de subbase. Para esta capa se recomienda

Guía procedimental para el proceso de compactación del lleno estructural al interior de las bodegas industriales en el proyecto CLIN (Centro Logístico Industrial del Norte)

		realizar dos ciclos, primero para una capa con un espesor de 20cm y otra con un espesor de 15cm.
5	Cargador	El cargador procederá a mezclar los materiales ingresados en el paso anterior
6	Motoniveladora	Se debe repartir el material mezclado en el paso anterior.
7	Carrotanque	Una vez se obtenga la primera capa de subbase se procederá a humedecerla con 4m ³ de agua y con una velocidad del carrotanque de 5 km/h.
8	Vibrocompactador	En este paso el vibrocompactador debe realizar 4 pasadas.
9	Volquetas	Se debe ingresar el material faltante para culminar con la capa de 35cm de subbase. Pero antes, se debe realizar una escarificación y nivelación de la capa.
10	Cargador	El cargador procederá a mezclar los materiales ingresados en el paso anterior
11	Motoniveladora	Se debe repartir el material mezclado en el paso anterior.
12	Carrotanque	Una vez se obtenga la segunda capa de subbase nivelada se procederá a humedecerla con una velocidad del carrotanque de 7 km/h. Nota: con esta velocidad se agregará menos cantidad de agua que en el paso 7.
13	Vibrocompactador	En este paso el vibrocompactador debe realizar 4 pasadas.
13	Volquetas	Después de nivelar y escarificar la capa de subbase se debe ingresar el material necesario para producir una capa de 15cm de base.
14	Cargador	El cargador procederá a mezclar los materiales ingresados en el paso anterior
15	Motoniveladora	Se debe repartir el material mezclado en el paso anterior.
16	Carrotanque	Una vez se obtenga la primera capa de base se procederá a humedecerla con 4m ³ de agua y con una velocidad del carrotanque de 5 km/h.
17	Vibrocompactador	En este paso el vibrocompactador debe realizar 4 pasadas.
18	Volquetas	Se debe ingresar el material faltante para culminar con la capa de 25cm de base. Pero antes, se debe realizar una escarificación y nivelación de la capa.
19	Cargador	El cargador procederá a mezclar los materiales ingresados en el paso anterior
20	Motoniveladora	Se debe repartir el material mezclado en el paso anterior.
21	Carrotanque	Una vez se obtenga la segunda capa de base nivelada se procederá a humedecerla con una velocidad del carrotanque de 7 km/h. Nota: con esta velocidad se agregará menos cantidad de agua que en el paso 16.
22	Vibrocompactador	En este paso el vibrocompactador debe realizar 4

Guía procedimental para el proceso de compactación del lleno estructural al interior de las bodegas industriales en el proyecto CLIN (Centro Logístico Industrial del Norte)

		pasadas.
23	Motoniveladora	Este es el paso final, se debe realizar una nivelación con la motoniveladora que presente un error máximo de 1cm, bien sea por arriba o por debajo del nivel de la base.

4. REFERENCIAS

- Gonzales, A. (2010). *Instructivo para la elaboración de un manual técnico*. Habana, Cuba: Soluciones Informáticas CETA.
- Secretaria de Comunicaciones y Transporte. *Guía técnica para la elaboración de manuales de procedimientos*. México, 2009.
- Rico, A., Del Castillo, H. (1992). *Consideraciones sobre compactación de suelos en obras de infraestructura de transporte*. México: Secretaria de Comunicaciones y Transporte.
- Arredondo, F., Giménez, F., Jiménez, J., Llamazares, O., De Navacerrada, G., Sendin, M. (1977). *Compactación de Terrenos. Terraplenes y pedraplanes. Teoría y práctica*. Barcelona, España: Editorial Editores Técnicos Asociados S.A.