



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

Revisión del estado del arte en la optimización de los procesos de llenos estructurales. Caso de estudio lleno bodegas centro logístico industrial del norte (CLIN).

Autor(es)

Jose Alberto Rodríguez Londoño

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela ambiental, Ingeniería Civil

Medellín, Colombia

2020



Revisión del estado del arte en la optimización de los procesos de llenos estructurales. Caso de estudio lleno bodegas centro logístico industrial del norte (CLIN).

Autor:

Jose Alberto Rodríguez Londoño

Informe de práctica como requisito para optar al título de:

Ingeniero Civil

Asesora:

Isabel Kristina Cardona Giraldo

Ingeniera Civil - Msc. Ingeniería Geotecnia

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental, Ingeniería civil

Medellín, Antioquia

2020

Tabla de contenido

Resumen.....	6
1 Introducción.....	7
2 Objetivos.....	8
2.1 Objetivo general.....	8
2.2 Objetivos específicos.....	8
3 Justificación.....	8
4 Marco Teórico.....	9
4.1 Sitio de estudio.....	9
4.2 Definiciones.....	9
5 Antecedentes.....	19
5.1 Guía procedimental para el proceso de compactación del lleno estructural en el interior de bodegas en el centro logístico industrial del norte (CLIN).....	19
6 Estado del arte.....	22
6.1 Escondida Bioleach Pad Extension III (EBPEIII).....	22
6.2 Compactación inteligente.....	25
6.3 Mejoramiento del suelo empleando relleno fluido.....	30
7 Metodología.....	34
7.1 Consulta y revisión del estado del arte de las metodologías empleadas para el llenado de bodegas industriales.....	34
7.2 Búsqueda de los ensayos realizados a los materiales empleados para el lleno estructural en el proyecto.....	34
7.3 Comparación de los resultados de los ensayos de densidad de campo para el lleno estructural del CLIN con los requeridos por la normativa y en las especificaciones del proyecto.....	35
7.4 Toma de registros fotográficos de los procesos de llenado en el interior de las bodegas.....	35
7.5 Registro de los tiempos de duración del lleno de cada una de las capas que componen la estructura.....	35
7.6 Identificación de las variables que afectan el rendimiento de la ejecución del lleno estructural.....	36

7.7	Elaboración de propuestas y recomendaciones para la optimización de los tiempos de ejecución del lleno estructural y viabilidad de estas.....	36
8	Resultados y análisis	36
8.1	Revisión del estado del arte	36
8.2	Caso de estudio: Centro Logístico Industrial del Norte (CLIN)	37
8.2.1	Ensayos de laboratorio	37
8.2.2	Proceso de conformación del lleno estructural.....	40
8.2.3	Rendimientos del proceso de lleno estructural.....	41
8.2.4	Identificación de variables que afectan el proceso de llenado..	44
9	Recomendaciones y propuestas de mejora.....	50
10	Conclusiones.....	52
11	Referencias Bibliográficas	54
Anexos.....		57

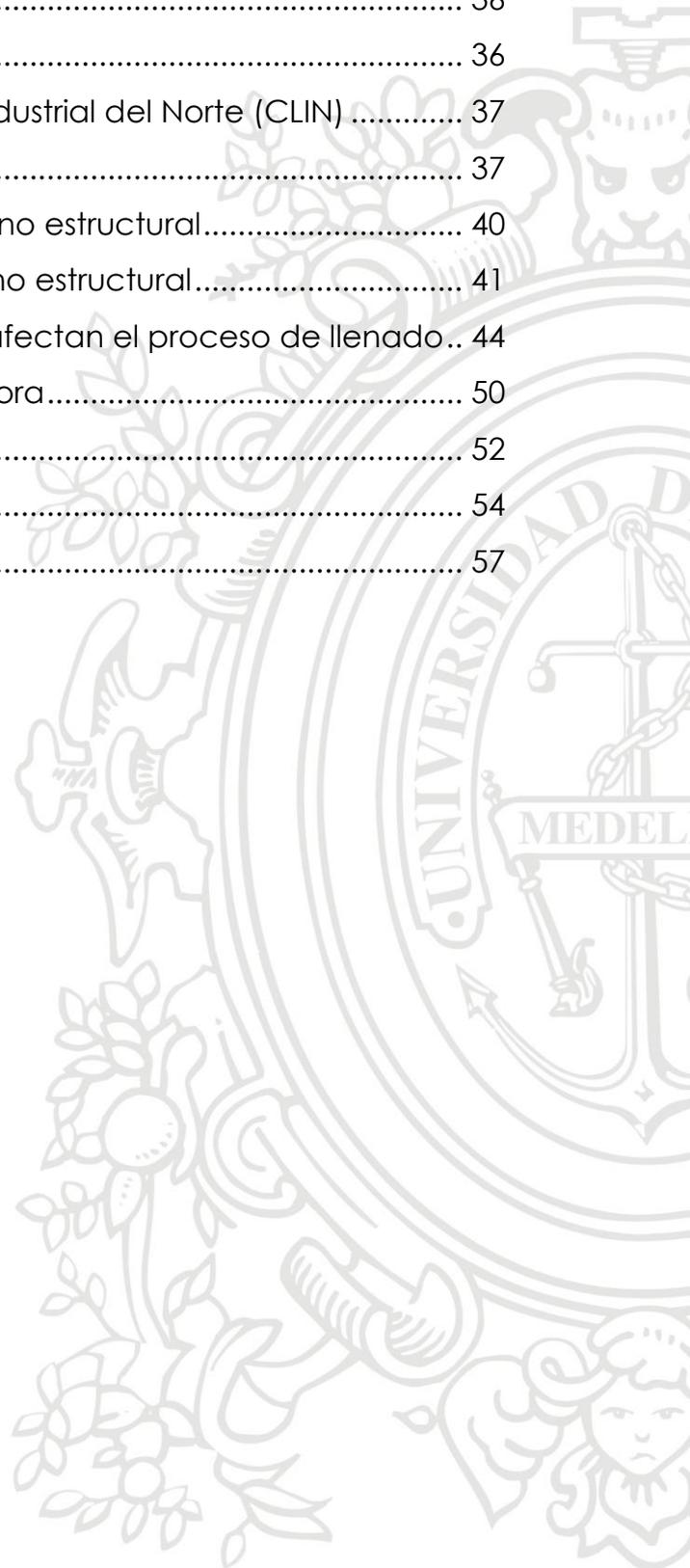


Tabla de figuras

Figura 1. Centro Logístico Industrial del Norte (CLIN).....	9
Figura 2. Estructura de pavimento rígido de bodegas.....	10
Figura 3. Limo y arenilla para capa de subrasante.....	10
Figura 4. Triturado y arenilla para Subbase granular.....	12
Figura 5. Base granular.	12
Figura 6. Martillo y molde para Proctor modificado.	14
Figura 7. Ensayo de densidad de campo con cono de arena.....	15
Figura 8. Ensayo de CBR.....	15
Figura 9. Compactación de suelo mediante vibrocompactador.....	16
Figura 10. Motoniveladora.	17
Figura 11. Carrotanque.	17
Figura 12. Cargador.....	18
Figura 13. Minicargador.....	18
Figura 14. Nivel laser.....	18
Figura 15. Sistema de bombeo Minera Escondida.....	23
Figura 16. Sistema de Compactación Inteligente de BOMAG.....	25
Figura 17. Tramo de prueba.....	26
Figura 18. Conocimiento de compactación inteligente.....	29
Figura 19. Percepción sobre compactación inteligente.....	29
Figura 21. Presupuesto método tradicional.	31
Figura 22. Presupuesto relleno fluido.....	32
Figura 23. Comparativo de costos.....	33
Figura 24. Comparativo días.....	33
Figura 25. Resultado ensayos de Proctor modificado subbase y base granular.	38
Figura 26. Resultado ensayos de CBR subbase y base granular.	38
Figura 27. Proceso de lleno estructural en bodegas industriales.	41
Figura 28. Presencia de otros frentes de trabajo.....	45
Figura 29. Altura libre reducida.....	45
Figura 30. Maquinaria con fallas mecánicas.....	46
Figura 31. Cambio de prioridades recurrentes.	46
Figura 32. Poco flujo de material para lleno.	47
Figura 33. Retrasos en la construcción de las cubiertas.	47
Figura 34. Colocación de tubería de aguas lluvia.....	48
Figura 35. Ruptura de bajante durante nivelación.....	48
Figura 36. Fallos en las capas del lleno.....	48
Figura 37. Regado de subbase.....	49
Figura 38. Cambio de nivel de subbase.....	49

Figura 39. Registro de mantenimientos preventivos y correctivos del
vibrocompactador. 57

Figura 40. Cantidades de materiales para realizar las diferentes capas del
lleno estructural en función de diferentes espesores..... 58

Figura 41. Ensayos de densidad de campo..... 59



Tablas

Tabla 1. Requisitos de los suelos para rellenos de estructuras.....	11
Tabla 2. Requisitos para materiales granulares tipo SBG o BG.	13
Tabla 3. Franjas granulométricas para materiales granulares tipo SBG o BG.	13
Tabla 4. Ficha técnica vibrocompactador.....	16
Tabla 5. Resultados ensayo de densidad de campo, bodega 121.....	19
Tabla 6. Resultados ensayo de densidad de campo, bodega 119.....	20
Tabla 7. Descripción del proceso de compactación.....	21
Tabla 8. Características generales del lleno.	23
Tabla 9. Granulometría de material de lleno estructural.....	24
Tabla 10. Tiempos de compactación sistema tradicional o convencional. ...	27
Tabla 11. Tiempos de compactación con el sistema inteligente (IC).....	27
Tabla 12. Costos sistema de compactación inteligente.	28
Tabla 13. Resultados de densidad de campo en bodegas industriales.....	39
Tabla 14. Cantidad de material y viajes.....	42
Tabla 15. Ingreso de material para la subrasante.....	42
Tabla 16. Ingreso de material para la subbase y base.....	43
Tabla 17. Rendimiento de ingreso de material.....	43
Tabla 18. Rendimiento de actividades.....	44
Tabla 19. Mantenimientos efectuados al carrotanque.....	46
Tabla 20. Revisión del estado del arte.....	60

Revisión del estado del arte en la optimización de los procesos de llenos estructurales. Caso de estudio lleno bodegas centro logístico industrial del norte (CLIN).

Resumen

El proceso de conformación de llenos estructurales es uno de los pilares fundamentales para aquellos proyectos en los cuales el suelo natural no tiene las capacidades físico-mecánicas adecuadas para soportar las cargas a las cuales será sometido. Por tal motivo, la calidad, seguridad y control del proceso de ejecución de esta actividad debe ser óptima. Sin embargo, durante el desarrollo del lleno se pueden presentar problemas que afectan el rendimiento y con ello generar retrasos que incrementan los costos y disminuyen la viabilidad financiera de los proyectos.

A raíz de esta variabilidad en los procesos de ejecución de los llenos estructurales, se realizó una revisión del estado del arte sobre esta actividad, en la cual se encontraron avances tanto tecnológicos (compactación inteligente) como de materiales que permiten mayores resistencias y con tiempos de ejecución menores (relleno fluido), en los cuales se evidenció que siempre el costo-beneficio debe ser analizado con el fin de tomar la decisión adecuada dependiendo de las necesidades de cada proyecto. Además, con la revisión mencionada anteriormente, se realizó un estudio de caso sobre el lleno de las bodegas industriales en el Centro Logístico Industrial del Norte (CLIN) realizado por la empresa Gomeco S.A.S, en el cual se analizaron las calidades de los materiales por medio de los resultados de los ensayos de CBR y Proctor modificado, los rendimientos en los ingresos de materiales y de las actividades involucradas en los procesos de conformación de los llenos, como lo son el mezclado de material para subbase y base, el regado, humectación y compactación de las capas. En esta revisión se lograron presenciar varias variables que afectan los tiempos de la actividad, siendo el desabastecimiento de material una de las principales.

Con base a las variables encontradas y tomando como referencia la revisión del estado del arte sobre la conformación de llenos, se realizaron propuestas de mejora que abarcan desde un cronograma adecuado de cada fase de la actividad, hasta el análisis de la viabilidad de optar por metodologías modernas como el uso de vibrocompactadores inteligentes y/o materiales autocompactantes como lo es el relleno fluido. Todo esto tomando en consideración la capacidad financiera, material y humana de la empresa.

1 Introducción

La apertura del país a nuevos mercados ha generado que grandes y numerosas empresas quieran empezar a operar en él, principalmente en las ciudades capitales. Sin embargo, el limitado espacio para la construcción de centros de almacenaje de mercancía o plantas de producción, y el cumplimiento de los planes de ordenamiento territorial de cada localidad, se han convertido en el mayor obstáculo respecto a la viabilidad operativa de las nuevas compañías. Por tal razón, las periferias de estas grandes ciudades han tomado un alto atractivo para la construcción de naves o bodegas industriales, debido a la gran área disponible y a la baja tasa poblacional que se puede presentar en determinadas zonas, además de la facilidad para el transporte y la reducción de los fletes de viaje.

El Centro Logístico Industrial del Norte se presenta como una solución a dicha problemática y es considerado uno de los proyectos más grandes y cuyo grado de innovación es alto, a raíz del sistema estructural empleado.

Dentro de la ejecución de las naves o bodegas industriales del proyecto, el lleno estructural de estas se convierte en un pilar fundamental, ya que de este depende la operatividad y funcionalidad de la bodega, así como de la adecuada transferencia de las elevadas cargas que se pueden presentar durante su operación. Sin embargo, el proceso de llenado de las capas que conforman el lleno estructural puede presentar un bajo rendimiento en el tiempo de ejecución y con ello aumentar la probabilidad de retrasos que incrementan los costos.

En el presente informe se estudiará y analizará la metodología implementada para el llenado estructural en las bodegas industriales del Centro Logístico Industrial del Norte, con el fin de generar recomendaciones que permitan mejorar los tiempos de ejecución, con base en la revisión del estado del arte de diferentes métodos para la ejecución de llenos. Igualmente se tomarán datos referentes a la duración del lleno para cada capa, de los ensayos referentes a los materiales utilizados, así como de los ensayos que se le realizan al suelo conformado para verificar el cumplimiento de la normativa vigente y de las indicaciones planteadas durante el diseño del proyecto.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Realizar la revisión del estado del arte sobre los procesos de conformación de llenos estructurales y de acuerdo con este, recomendar mejoras en el procedimiento de ejecución de llenos en las bodegas CLIN.

2.2 Objetivos específicos

- Revisar el estado del arte sobre los procesos de conformación de llenos estructurales, así como las metodologías y mejoras implementadas en estos.
- Analizar los tiempos y el procedimiento constructivo existente de lo llenos estructurales en las bodegas industriales.
- Revisar los resultados obtenidos en los ensayos de materiales y del lleno estructural.
- Identificar las variables que pueden afectar la ejecución del lleno estructural.
- Proponer alternativas en pro de la optimización de los tiempos de ejecución de los llenos estructurales de las naves industriales.

3 Justificación

Dentro de la conformación de los llenos estructurales la calidad de los materiales, el control de los procesos de regado, compactación y humectación juegan un papel fundamental en la calidad final de la estructura.

Sin embargo, durante este proceso de construcción se suelen presentar retrasos o reprocesos que afectan el rendimiento de la actividad y con ellos posibles sobrecostos en los proyectos. Por tal motivo, en el presente informe se busca realizar una revisión del estado del arte de los procesos de conformación de los llenos estructurales, para revisar las metodologías existentes y los avances técnicos y tecnológicos en pro de la optimización de los tiempos de ejecución. Además, se presenta un caso de estudio de esta actividad realizado en las bodegas del Centro Logístico Industrial del Norte (CLIN), con la finalidad de realizar un análisis del proceso realizado allí y proponer mejoras con base a la revisión mencionada anteriormente.

4 Marco Teórico

4.1 Sitio de estudio

El Centro Logístico Industrial del Norte (CLIN), denominado como un “puerto seco”, se encuentra ubicado en la vereda La Matica parte baja del municipio de Girardota, Antioquia. Éste limita por el norte con los municipios de San Pedro de los Milagros y Don Matías, por el este con los municipios de Barbosa y San Vicente, por el sur con los municipios de Barbosa y Guarne, y por el oeste con el municipio de Copacabana. Además, cuenta con un área de 82.56 km² que se dividen en 3.07 km² de suelo urbano y 79.49 km² de suelo rural, cuenta con una temperatura de 22 °C y una altura promedio de 1425 msnm.

Este centro logístico está compuesto por 72 bodegas, un hotel, una estación de servicios, plataforma cross-docking, báscula y un CDA.



Figura 1. Centro Logístico Industrial del Norte (CLIN).

Fuente: Gomeco s.a.s.

4.2 Definiciones

- Nave o bodega industrial: Es una construcción propia para resolver problemas de alojamiento y operación de la industria, se puede definir también como una instalación física o edificación diseñada y construida para realizar actividades industriales de producción, transformación, manufactura, ensamble, procesos industriales, almacenaje y distribución. (Berbeo).

Dentro de la ejecución de la obra se presentan varios frentes de trabajo, uno de los principales es el de lleno estructural al interior de las bodegas industriales. Para el comportamiento de las losas de las naves industriales, se trabaja bajo el concepto de un pavimento rígido con una capacidad de carga de 7 ton/m², el cual se rige bajo la normativa del INVIAS en el capítulo 6 y cuya estructura se presenta en la figura 2.



Figura 2. Estructura de pavimento rígido de bodegas.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los conceptos de los elementos que componen el lleno estructural, mostrados en la figura 2, y de las especificaciones dadas por el INVIAS en el artículo 610 para suelos de relleno estructural, base y subbase granular.

- Subrasante: La subrasante es el mismo terreno natural, graduado y compactado que servirá de soporte para la colocación del piso. En ocasiones para mejorar sus características de drenaje y de compactación puede ser mejorada buscando un mejor comportamiento de la estructura de soporte. (CEMEX, 2017). Para las bodegas del Centro Logístico Industrial del Norte, el material para la capa de la subrasante se compone por limo y arenilla que no contenga ramas, basura o materia orgánica. La normativa presenta unos requisitos para este tipo de suelo de lleno, los cuales se muestran en la tabla 1.



Figura 3. Limo y arenilla para capa de subrasante.
Fuente: Fotografía propia.

Tabla 1. Requisitos de los suelos para rellenos de estructuras.

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	SUELOS SELECCIONADOS	SUELOS ADECUADOS	SUELOS TOLERABLES
Tamaño máximo, mm	E-123	75	100	150
Porcentaje que pasa el tamiz de 2 mm (No. 10) en masa, máximo	E-123	80	80	-
Porcentaje que pasa el tamiz de 75 µm (No. 200) en masa, máximo	E-123	25	35	35
Contenido de materia orgánica, máximo (%)	E-121	0	1	1
Límite líquido, máximo (%)	E-125	30	40	40
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-126	10	15	-
CBR de laboratorio, mínimo (%)	E-148	10	5	3
Expansión en prueba CBR, máximo (%)	E-148	0	2	2
Índice de colapso, máximo (%)	E-157	2	2	2
Contenido de sales solubles, máximo (%)	E-158	0.2	0.2	-

Fuente: INVIAS, 2012.

- Subbase granular (SBG): Es un material granular grueso compuesto por triturados, arena y material grueso. Se emplea como capa en la instalación de pavimentos asfálticos y de concreto, es altamente resistente a la erosión y permite el libre drenaje con el fin de prevenir el bombeo. Se somete a menores presiones que la base granular. (CEMEX, 2017).
Para el proyecto del CLIN, la subbase se realiza en la obra empleando un triturado de 3/4" y arenilla, esta última con un porcentaje máximo de pasante para el tamiz n°200 de 15% y sin presencia de material orgánico. La relación arenilla/triturado empleada para la subbase es de 3/1.



Figura 4. Triturado y arenilla para Subbase granular.
Fuente: Fotografía propia.

- Base granular (BG): Es un material granular grueso compuesto por triturados, arena y material fino. Se emplea en la conformación de estructuras de pavimento, posee alta resistencia a la deformación lo que hace que soporte presiones altas. (CEMEX, 2017).
Dentro de la obra, se emplea el mismo material con el cual se conforma la subbase, pero con una relación arenilla/triturado de 2/1.



Figura 5. Base granular.
Fuente: Fotografía propia.

De acuerdo con la normativa del INVIAS, se presentan unas especificaciones para los materiales tipo subbase granular y base granular, las cuales se presentan en las tablas 2 y 3 obtenidas del manual de especificaciones generales de construcción de carreteras.

Tabla 2. Requisitos para materiales granulares tipo SBG o BG.

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	REQUISITO	
		TIPO SBG	TIPO BG
DUREZA (O)			
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), máximo (%) -500 revoluciones	E-218	50	40
DURABILIDAD (O)			
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) -Sulfato de sodio -Sulfato de magnesio	E-220	12 18	12 18
LIMPIEZA (F)			
Límite líquido, máximo (%)	E-125	25	25
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	6	3
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	25	30
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable, máximo (%)	E-211	2	2
GEOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS (F)			
Índices de alargamiento y aplanamiento, máximo (%)	E-230	-	35
Caras fracturadas (una cara), mínimo (%)	E-227	-	50

Fuente: INVIAS, 2012.

Tabla 3. Franjas granulométricas para materiales granulares tipo SBG o BG.

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm / U.S. Standard)									
	50.0	37.5	25.0	20.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.075
	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No.200
% PASA										
SBG-50	100	70-95	60-90	-	45-75	40-70	25-55	15-40	6-25	2-15
SBG-38	-	100	75-95	-	55-85	45-75	30-60	20-45	8-30	2-15

SBG-20	-	-	-	100	60-87	50-80	35-65	24-49	8-30	2-15
BG-38	-	100	70-100	-	60-90	45-75	30-60	20-45	10-30	5-15
BG-25	-	-	100	-	70-100	50-80	35-65	20-45	10-30	5-15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0%	7%					6%			3%

Fuente: INVIAS, 2012.

Para lograr el cumplimiento de las especificaciones planteadas en los diseños del proyecto, se deben realizar ensayos que permitan conocer la densidad, humedad y porcentaje de compactación de las capas que conforman el lleno estructural. Entre estos se tiene:

- Ensayo de Proctor modificado: Regido bajo la normativa INV E-142-7, es un ensayo que busca determinar la relación entre la humedad y la densidad de los suelos compactados en un molde de un tamaño dado con un martillo de 4.54 Kg. (10 lb) que cae desde una altura de 457 mm (18"). (INVIAS, 2012).



Figura 6. Martillo y molde para Proctor modificado.

Fuente: Aulacarreteras.

- Ensayo de densidad de campo: Regido bajo la normativa INV E-161-7, es un ensayo que se usa para determinar en el sitio, la densidad o la masa unitaria de los suelos con el equipo de cono de arena. (INVIAS, 2012).



Figura 7. Ensayo de densidad de campo con cono de arena.
Fuente: Ingenieriareal.

- Ensayo de CBR: Regido bajo la normativa INV E-148-07, este método de prueba se emplea para evaluar la resistencia potencial de materiales de subrasante, subbase y base, incluyendo materiales reciclados para empleo en pavimentos de carreteras y pistas de aterrizaje. El valor de CBR obtenido en esta prueba forma parte integral de varios métodos de diseño de pavimentos flexibles. (INVIAS, 2012).



Figura 8. Ensayo de CBR.
Fuente: JH-soluciones integrales.

Para lograr la densidad obtenida durante el ensayo de Proctor modificado, se debe realizar una adecuada compactación de cada una de las capas que conforman la estructura de lleno. A continuación, se presentan algunos conceptos propios de este proceso y de la maquinaria y equipos empleados en la ejecución del lleno estructural:

- Compactación: 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).



Figura 9. Compactación de suelo mediante vibrocompactador.
Fuente: Fotografía propia.

- Vibrocompactador: 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. (ANTER, 2010). Para el desarrollo de la obra del CLIN se emplea un vibrocompactador con referencia CAT CS533. Algunas de sus especificaciones se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Ficha técnica vibrocompactador.

FICHA TÉCNICA VIBROCOMPACTADOR CAT CS533			
PESOS		SISTEMA VIBRATORIO	
Peso en orden de trabajo: con cabina	10840 kg	Fuerza centrífuga: máxima	234 kN
Peso: tambor con ROPS/FOPS	5570 kg	Fuerza centrífuga: mínima	133 kN
Peso: tambor con cabina	5760 kg	Amplitud nominal: alta	1.8 mm
Peso en orden de trabajo: con ROPS/FOPS	10485 kg	Amplitud nominal: baja	0.85 mm
ESPECIFICACIONES DE OPERACIÓN		Frecuencia vibratoria: estándar	31/34 Hz (1860/2040 vpm)
Ancho de compactación	2134 mm	NEUMÁTICOS	
Carga lineal estática: con cabina	27 kg/m	Neumáticos	8 lonas para flotación de 23.1 x 26
Velocidad de desplazamiento: máxima	12 km/h		
Carga lineal estática: con ROPS/FOPS	26.1 kg/cm	CAPACIDAD DE LLENADO DE SERVICIO	

Espacio libre sobre el suelo	543 mm	Capacidad del tanque de combustible	200 L
Radio de giro: dentro del borde del tambor	3.68 m		

Fuente: CAT, 2020.

- Motoniveladora: Maquinaria empleada para repartir, nivelar y perfilar el material utilizado para conformación de las diferentes capas del lleno estructural.



Figura 10. Motoniveladora.
Fuente: Fotografía propia.

- Carrotanque: Maquinaria empleada para realizar el regado de agua en las diferentes capas del lleno, con capacidad para almacenar 4m³ de agua.



Figura 11. Carrotanque.
Fuente: Fotografía propia.

- Cargador: Maquinaria empleada para el cargue de material y para la mezcla del material usado para la conformación de las capas de subbase y base.



Figura 12. Cargador.
Fuente: Ochoa.

- Minicargador: Maquinaria empleada para el cargue y regado de material en lugares con poco espacio y para nivelación de estos.



Figura 13. Minicargador.
Fuente: Fotografía propia.

- Nivel laser: Equipo utilizado para la nivelación de las capas a través de un láser giratorio que indica las fluctuaciones de los niveles antes y después de la compactación.



Figura 14. Nivel laser.
Fuente: Ochoa.

5 Antecedentes

5.1 Guía procedimental para el proceso de compactación del lleno estructural en el interior de bodegas en el centro logístico industrial del norte (CLIN)

Durante la práctica académica realizada en el proyecto del CLIN por el Ingeniero civil John Alexander Ochoa López en el año 2019, se encontraron problemas con la compactación y la humedad en cada una de las capas, por lo tanto, se desarrolló una guía mediante la cual se pudieran dar las recomendaciones y el paso a paso para lograr un lleno correcto.

Dentro del análisis realizado, se evidenció que en varios de los ensayos de densidad de campo con cono de arena el porcentaje de compactación era cercano al 95% de la densidad máxima del ensayo de Proctor modificado, pero con porcentajes de humedad muy dispersos. En la tabla 5 y 6 se muestran algunos de los resultados.

Tabla 5. Resultados ensayo de densidad de campo, bodega 121.

Tabla de resultado CENTRO LOGÍSTICO E INDUSTRIAL DEL NORTE "CLIN" Código: 2395 CL-67928-06-2019										
# Punto	# Material	Proctor	Humedad óptima	Proctor Densidad Seca max kg/m ³	Densidad seca	% compactación	% humedad	Localización	Procedimiento	Fecha ensayo
1	Base granular	Modificado	5.1	2050	1990.89	97.1	8.6	Eje 93-D	Obra	2019-06-06
2	Base granular	Modificado	5.1	2050	1973.0	96.2	6.8	Eje 95-E	Obra	2019-06-06
3	Base granular	Modificado	5.1	2050	1996.24	97.4	7.3	Eje 94-G	Obra	2019-06-06
4	Base granular	Modificado	5.1	2050	2059.09	100.5	6.7	Eje 96-I	Obra	2019-06-06
5	Base granular	Modificado	5.1	2050	2090.53	102.0	7.3	Eje 93-J	Obra	2019-06-06

Fuente: Ochoa, 2020.

Tabla 6. Resultados ensayo de densidad de campo, bodega 119

Tabla de resultado CENTRO LOGÍSTICO E INDUSTRIAL DEL NORTE "CLIN" Código: 2395 CL-68751-08-2019										
# Punto	# Material	Proctor	Humedad óptima	Proctor Densidad Seca max kg/m3	Densidad seca	% compactación	% humedad	Localización	Procedimiento	Fecha ensayo
1	Base granular	Modificado	5.1	2050	2062.56	100.6	7.2	Eje 82C-B119	Obra	2019-08-01
2	Base granular	Modificado	5.1	2050	2082.29	101.6	6.2	Eje 85C-B119	Obra	2019-08-01
3	Base granular	Modificado	5.1	2050	2120.22	103.4	6.0	Eje 83F-B119	Obra	2019-08-01
4	Base granular	Modificado	5.1	2050	2052.09	100.1	6.6	Eje 85I-B119	Obra	2019-08-01
5	Base granular	Modificado	5.1	2050	2082.81	101.6	7.3	Eje 81I-B119	Obra	2019-08-01

Fuente: Ochoa, 2020.

En la tabla 5 se muestran los resultados obtenidos antes de realizar los ajustes en el proceso de compactación, mientras que en la tabla 6 se presentan los resultados arrojados posterior a la mejora. Se logra evidenciar que la corrección realizada permitió que se alcanzara una densidad mayor a la obtenida en el ensayo de Proctor modificado con porcentajes de humedad no tan dispersos como los observados en la tabla 5.

Entre las recomendaciones y ayudas presentadas en la guía procedimental, se tienen:

- Una tabla para cuantificar la cantidad de material y viajes necesarios de acuerdo con el espesor de la capa.
- Escarificar la capa antes de comenzar con una nueva capa para garantizar un mejor agarre.
- Realizar un remezclado del material para garantizar una adecuada homogenización y evitar segregación del material grueso.

En la tabla 7 se presenta la descripción del proceso de compactación.

Tabla 7. Descripción del proceso de compactación.

PROCESO DE COMPACTACIÓN EN BODEGAS DEL CLIN		
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 con el nivel en el que se encuentra dicha capa. Una vez se conoce la cantidad, se procederá 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 realizarán 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 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.
14	Volquetas	Después de nivelar y escarificar la capa de subbase, se debe ingresar el material necesario para producir una capa de 15cm de base.
15	Cargador	El cargador procederá a mezclar los materiales ingresados en el paso anterior.
16	Motoniveladora	Se debe repartir el material mezclado en el paso anterior.
17	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.
18	Vibrocompactador	En este paso el vibrocompactador debe realizar 4 pasadas.
19	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.
20	Cargador	El cargador procederá a mezclar los materiales ingresados en el paso anterior.
21	Motoniveladora	Se debe repartir el material mezclado en el paso anterior.
22	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 17.
23	Vibrocompactador	En este paso el vibrocompactador debe realizar 4 pasadas.
24	Motoniveladora	En este 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.

Fuente: Ochoa, 2020.

6 Estado del arte

6.1 Escondida Bioleach Pad Extension III (EBPEIII)

En el documento llamado "ESPECIFICACIÓN TÉCNICA EXCAVACIONES Y RELLENOS ESTRUCTURALES M40035-1-SPEC-002", realizado por la empresa AMEC en el año 2010, se realiza la descripción del proceso de ejecución de llenos y excavaciones, así como las características de los materiales empleados para los llenos estructurales. Se desarrolló en la ciudad de Antofagasta, Chile, en la ampliación de un proyecto minero.



Figura 15. Sistema de bombeo Minera Escondida.
Fuente: AMEC.

En la tabla 8 se presentan las características propias del material empleado para la realización de esta actividad, las cuales presentan gran similitud respecto a las estipuladas por la normativa colombiana.

Tabla 8. Características generales del lleno.

CARACTERÍSTICAS DEL LLENO	
Origen del material	Material seleccionado proveniente de empréstitos, excavaciones o estériles de minas.
Normativa	LNV 71, LNV 76
Composición	Material granular libre de desperdicios, conglomerados, materia orgánica, escombros e impurezas.
Equivalente de arena	$\geq 20\%$
Contenido sulfatos	$< 3\%$ en peso
Contenidos solubles	$> 3\%$ en peso

Fuente: AMEC, 2010.

Los materiales también deben cumplir con las siguientes características:

- Tamaño máximo de 2 1/2"
- Porcentaje de finos bajo malla #200 deberá estar entre 5 -20%
- La fracción bajo tamiz #40 deberá tener un índice de plasticidad $IP \leq 9\%$, según Método LNV 90, y un límite líquido $LL \leq 25\%$, según Método LNV 89.

Además, debe cumplir con la granulometría presentada en la tabla 9.

Tabla 9. Granulometría de material de lleno estructural.

TAMIZ	PORCENTAJE QUE PASA EN PESO
3"	100
2"	85 – 100
1 ½"	70 – 95
1"	55 – 85
¾"	50 – 80
#4	35 – 60
#40	15 – 35
#200	5 – 20

Fuente: AMEC, 2010.

Para la ejecución del lleno estructural se presenta el siguiente paso a paso:

- 1) Definir el nivel 0 del área de lleno.
- 2) Instalar las niveletas o bastones correspondientes, que permitan materializar la ubicación del borde y altura de las capas.
- 3) Limpieza del terreno, deberá estar exento de materiales inadecuados como materias orgánicas, barro, agua o elementos ajenos a los materiales especificados.
- 4) Preparar el área para su recepción del material, el lugar deberá estar limpio, perfilado y compactado antes de colocar la primera capa del lleno.
- 5) Vigilar que los materiales para llenos presenten características de homogeneidad y que estén exentos de segregación provocada por los movimientos de explotación, selección, transporte y colocación.
- 6) Los materiales acopiados para ser utilizados en llenos serán muestreados cada 1.000 m³ y cada vez que se detecte un cambio en la composición del material.
- 7) Recepción de los sellos en suelos donde se apoyen rellenos compactados, garantizando una Densidad Relativa $\geq 85\%$, o una densidad $\geq 95\%$ de la densidad máxima compactada seca del ensayo de Proctor Modificado.
- 8) Verificar el cumplimiento de los alineamientos, rasantes, cotas, pendientes, taludes y secciones transversales indicadas en los planos aprobados para construcción.

- 9) Si el material a compactar presenta un déficit de humedad, deberá agregarse agua. A continuación, se deberá proceder a su revoltura con arado, motoniveladora u otro procedimiento, hasta conseguir la humedad y homogeneidad.
- 10) Después de extendida la capa de material, se inicia la compactación, usando rodillo liso vibratorio o placa vibratoria de peso estático no superior a 0.5 ton, en capas de 25 cm de espesor suelto. El paso del equipo compactador será paralelo al perímetro de la estructura.
- 11) Se ejecutan los pasos 8, 9 y 10 para cada una de las capas, hasta lograr el nivel final de acuerdo con las especificaciones del proyecto.
- 12) Se verifican los niveles finales de la capa de base granular con una tolerancia de ± 1 cm.

Al tener un proceso descriptivo de la conformación de los llenos estructurales, se puede realizar un comparativo entre la metodología presentada en este documento y las realizadas en proyectos similares en el país.

6.2 Compactación inteligente

Antes de presentar la información referente a esta metodología, es ideal definir en qué consiste. El término Compactación Inteligente (IC, Intelligent Compaction) se refiere a la compactación de materiales de carreteras como suelos, bases de agregados o materiales de pavimento asfáltico, utilizando rodillos vibratorios modernos equipados con un sistema de medición integrado, un sistema de reportes informáticos a bordo, un mapeo basado en el sistema de posicionamiento global (GPS) y un control de retroalimentación opcional. (Peña, 2018). Este sistema permite recolectar, procesar y analizar las mediciones en tiempo real.

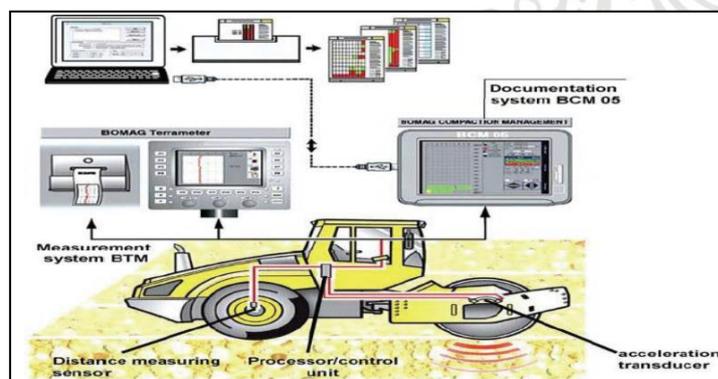


Figura 16. Sistema de Compactación Inteligente de BOMAG.

Fuente: Peña.

La pantalla en el rodillo de Compactación Inteligente alerta al operador cuando se obtiene la compactación deseada, eliminando pasadas innecesarias. Si se detectan áreas problemáticas, el sistema notificará al operador cuantas pasadas de rodillos adicionales dan como resultado la compactación deseada. (Peña, 2018)

Dentro del estudio del estado del arte sobre los procesos de conformación de llenos estructurales, se encontraron dos documentos en los cuales se analiza y estudia el sistema de compactación inteligente.

El primero de ellos, está titulado como “ANÁLISIS DE LA TECNOLOGÍA DE COMPACTACIÓN INTELIGENTE” realizado como trabajo de grado por la ingeniera Nadia Liliana Peña Rincón en el año 2018. En este, se busca realizar una comparación respecto a los tiempos de ejecución de la metodología de compactación inteligente y el sistema tradicional.

Para llevar a cabo el objetivo del estudio, se implementó una metodología de revisión bibliográfica sobre la compactación inteligente y un estudio de caso de la empresa Consorcio Vial Oriente 1, que se encuentra reconstruyendo la vía denominada “Concesión del Sisga” que inicia desde la Represa del Sisga y va hasta Aguaclara, Casanare.

En el caso de estudio, se realizó una comparación de las metodologías, mencionadas anteriormente, bajo las siguientes condiciones: un día normal de trabajo donde la lluvia no interrumpa y el material no se retrase, suponiendo que ya se realizó toda la excavación, se colocó y compactó la capa de rajón y se extendió la primera capa de subbase y un tramo de 110 metros.

A continuación, en las tablas 10 y 11, se muestran los tiempos de duración de cada una de las actividades realizadas durante el proceso de compactación, tanto para el sistema tradicional como para el IC.



Figura 17. Tramo de prueba.
Fuente: Peña.

Tabla 10. Tiempos de compactación sistema tradicional o convencional.

ACTIVIDAD	TIEMPO (MINUTOS)	OBSERVACIÓN
Primera pasada con el vibrocompactador.	20 – 30	Se pasa la máquina antes de humedecer.
Humectación.	10 – 15	Pasa el carrotanque humedeciendo el suelo.
Tiempo de humectación.	30 – 45	Tiempo de espera para que el agua descienda y la capa tenga el mismo porcentaje de humedad en todo su espesor.
Primera compactación.	60	Se pasa el vibrocompactador varias veces por el terreno.
Revisión de la compactación.	10 – 15	Se revisa que superficialmente se observe bien compactado, para llamar al encargado de tomar densidades.
Llegada del laboratorista encargado del ensayo.	15 – 60	Es el tiempo que transcurre mientras baja la persona a hacer el ensayo.
Toma de densidades.	20 – 40	El tiempo que se tarda en hacer el ensayo de densidad y los respectivos cálculos.
TOTAL	165 - 265	En caso de que se acepte la capa con la primera compactación.

Fuente: Peña, 2018.

Tabla 11. Tiempos de compactación con el sistema inteligente (IC).

ACTIVIDAD	TIEMPO (MINUTOS)	OBSERVACIÓN
Primera pasada con el vibrocompactador.	20	Se pasa la máquina antes de humedecer.
Humectación.	10 – 15	Pasa el carrotanque humedeciendo el suelo.
Tiempo de humectación.	30 – 45	Tiempo de espera para que el agua descienda y la capa tenga el mismo porcentaje de humedad en todo su espesor.
Compactación inteligente.	60	El vibrocompactador pasa varias veces por el terreno y se va midiendo la rigidez en toda el área. Si alguna zona tiene menor grado de compactación se hacen más pasadas hasta que cumpla.

TOTAL	120 - 140	Sólo en caso de que una zona no compacte debería levantarse esta área que ya está identificada y delimitada.
--------------	-----------	--

Fuente: Peña, 2018.

Al observar los datos obtenidos en este estudio comparativo, se puede evidenciar que al utilizar el sistema de compactación inteligente se logró reducir el tiempo total entre un 27% y un 47% respecto al tiempo con sistema tradicional, lo cual se presenta como una alternativa que permitiría optimizar el tiempo de ejecución de los llenos estructurales.

El segundo documento referente a los sistemas de compactación inteligente llamado "COMPACTACIÓN INTELIGENTE DE SUELOS, BASES Y SUB-BASES EN COLOMBIA" fue elaborado por la ingeniera Rita Esquivel Carranza en el año 2011 como parte de su trabajo de grado. En este, se busca conocer la variabilidad de costos entre el sistema tradicional de compactación y la compactación inteligente, además de consultar sobre la percepción de esta nueva metodología dentro de los operarios e ingenieros en el país. Se desarrolló en la ciudad de Bogotá, Colombia.

Para llevar a cabo la finalidad del estudio, se realiza una revisión bibliográfica sobre los antecedentes de la compactación inteligente en otros países y las reglamentaciones que se han realizado sobre esto. Además, se realiza una encuesta a un grupo de 15 ingenieros y 9 operarios en la ciudad de Bogotá con el fin de saber su percepción respecto a esta metodología de compactación.

Dentro del análisis de costos, se presentan dos opciones, la primera de ellas hace referencia a la adquisición del vibrocompactador inteligente y la segunda al instrumental necesario para equipar a los vibrocompactadores tradicionales. En la tabla 12 se presentan los rangos de precios (en pesos colombianos) para dichas alternativas.

Tabla 12. Costos sistema de compactación inteligente.

SISTEMA DE COMPACTACIÓN INTELIGENTE	
Vibrocompactador inteligente.	\$200.000.000 – 280.000.000
Instrumental para equipar vibrocompactadores tradicionales.	\$80.000.000 – 90.000.000

Fuente: Esquivel, 2011.

Cabe resaltar que los costos que se presentan para este tipo de maquinaria son referentes al año 2011, sin embargo, dicho precio ha aumentado por la fluctuación en el mercado y la economía del país. Antes de proponer una migración a este sistema inteligente de compactación, es importante realizar un análisis de costo-beneficio con el fin de evaluar la viabilidad económica de la empresa.

Respecto a la encuesta realizada en el presente estudio, se presentan los siguientes gráficos.

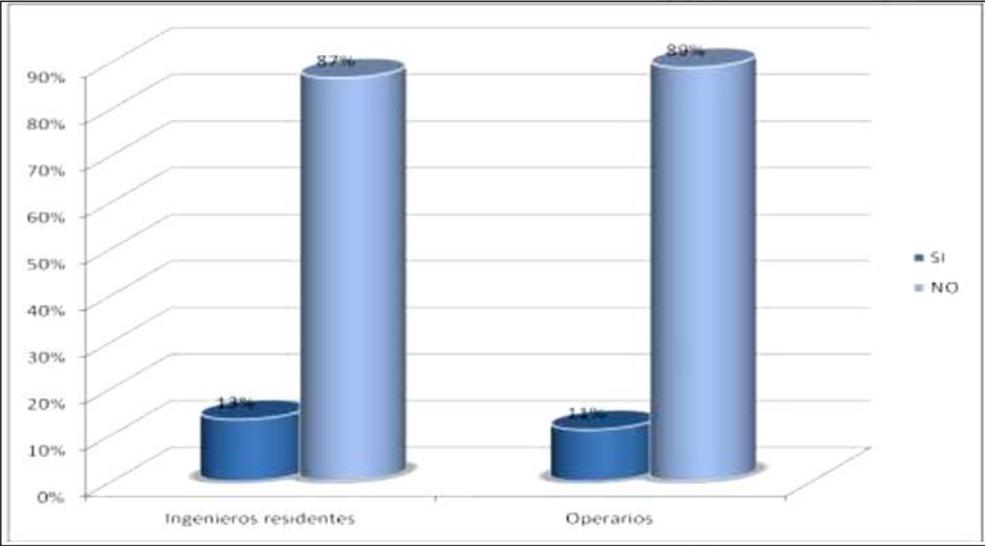


Figura 18. Conocimiento de compactación inteligente.
Fuente: Esquivel.

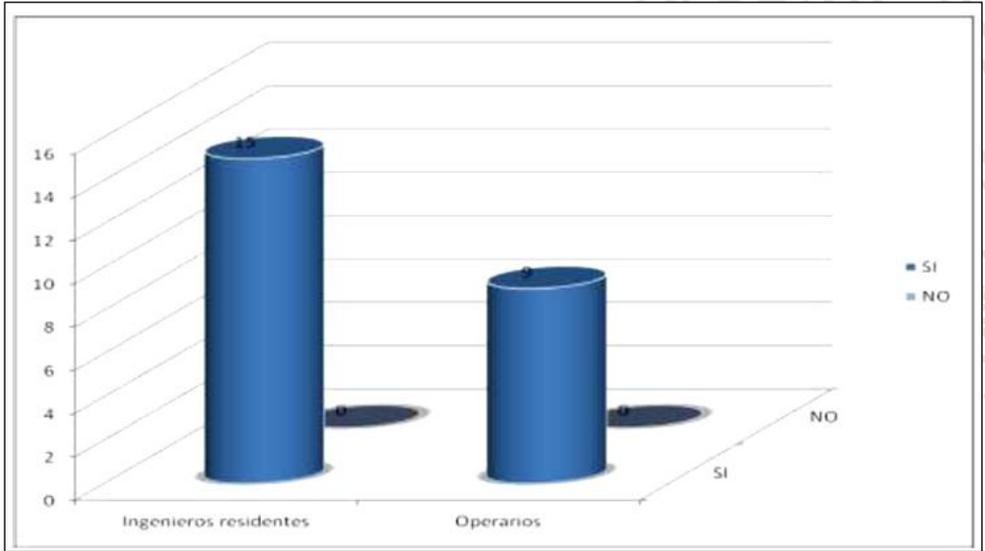


Figura 19. Percepción sobre compactación inteligente.
Fuente: Esquivel.

En la figura 18, se presentan los resultados obtenidos al realizar la pregunta sobre si conoce o ha implementado el sistema de compactación inteligente, tanto para residentes como operarios. Se puede observar que esta metodología es muy poco usada en el país, en parte se debe a la poca claridad respecto a los criterios de uso por parte de la normativa colombiana.

En la figura 19, se muestra que el 100% de los encuestados, están abiertos a migrar a la implementación de este sistema de compactación.

6.3 Mejoramiento del suelo empleando relleno fluido

Se define como rellenos fluidos (Flowable Fills) o materiales de baja resistencia controlada (MBRC) son fluidos, autonivelantes y autocompactantes a base de cemento, usando principalmente para rellenar en lugar de terraplén compactado, conformados por una mezcla de suelo, agua, cemento y aditivo.

Este tipo de relleno se auto compacta bajo su propio peso, no se sedimenta, es de fácil nivelación, mínima retracción de fraguado tiene una densidad controlada (con lo cual se puede disminuir su peso propio) y al ser fluido puede llegar a áreas de difícil acceso. Basado en la norma ACI 229R-99. (Vilcas, 2018).

Durante la revisión del estado del arte sobre los procesos de conformación de llenos, se encontró un estudio sobre este sistema de conformación y mejoramiento de suelo realizado por el ingeniero Eduardo Martín Rivera Pérez en el documento llamado "USO DE RELLENOS FLUIDOS EN LA CONSTRUCCIÓN" en el año 2008, en el cual se busca realizar una comparación de costos y tiempo del sistema de relleno de fluidos y los llenos por medio de material granular.

Para cumplir el objetivo del estudio se presenta un ejemplo de aplicación, en cual se realiza una zanja en una calle de alto tráfico vehicular para la colocación de una tubería de drenaje y posteriormente su llenado mediante el método tradicional y el uso de relleno fluido.

A continuación, se presentan los presupuestos para llevar a cabo el lleno de la zanja mediante el método tradicional y con el uso de relleno fluido, en este se presenta el ancho, largo y profundidad de la zanja. Además, se muestran gráficamente las comparaciones entre ambos métodos en días y costos.

Los precios presentados están en quetzal, moneda de Guatemala, que equivale a 493.99 pesos colombianos actualmente.

INTRODUCCIÓN DE DRENAJES EN VILLA NUEVA

Método Tradicional

ALCANCE

Introducción de drenaje de 75 cm. de diámetro para aguas negras para un tramo de 100 metros lineales la calle actualmente posee tráfico alto en horas pico y tiene un pavimento de concreto de 15 cm. de espesor

DIMENSIONES			
Ancho de Zanja	3.00	m	Dato de diseño
Profundidad de Zanja	1.10	m	Dato fijo
Longitud de zanja	100.00	m	Dato fijo

DEMOLICIÓN DE PAVIMENTO						
ACTIVIDAD	CANTIDAD	UNIDAD	DETALLES	TIEMPO EN DÍAS	COSTO UNITARIO	COSTO
Trazo	100	m	1 albañil 2 ayudantes	0.25	Q 1.70	Q 170.00
Corte para demolición	400.00	m	1 corte de 3 m cada 0.75	1	Q 6.00	Q 2,400.00
Volumen de demolición	45	m ³	3 albañiles y 6 ayudantes	4	Q 107.56	Q 4,840.00
Acarreo de ripio	58.5	m ³	1.3 factor de inchamiento	4	Q 69.00	Q 4,036.50
Cargador Frontal	4	días	Jornada de 8 horas	4	Q 250.00	Q 8,000.00
Banderilleros	2	Ayudante	1 por entrada de calle	5	Q 225.00	Q 450.00
						Q 19,856.50

EXCAVACIÓN DE ZANJA						
ACTIVIDAD	CANTIDAD	UNIDAD	DETALLES	TIEMPO EN DÍAS	COSTO UNITARIO	COSTO
Mano de Obra	330	m ³	3 albañiles y 6 ayudantes	14	Q 21.64	Q 7,140.00
Herramientas varias	14	días	Palas, carretas, etc.	14	Q 100.00	Q 1,400.00
Piomero	14	días	Para cubrir emergencias	14	Q 100.00	Q 1,400.00
Acarreo de ripio	429	m ³	1.3 factor de inchamiento	14	Q 69.00	Q 29,601.00
Cargador Frontal	14	días	Jornada de 8 horas	14	Q 250.00	Q 28,000.00
Banderilleros	2	Ayudante	1 por entrada de calle	14	Q 630.00	Q 1,260.00
						Q 68,801.00

COLOCACION DE DRENAJE
SE OMITE ESTE PASO POR SER EL MISMO EN AMBOS CASOS

RELLENO Y COMPACTACION DE ZANJA						
ACTIVIDAD	CANTIDAD	UNIDAD	DETALLES	TIEMPO EN DÍAS	COSTO UNITARIO	COSTO
Selecto para relleno	371.8	m ³	1.3 factor de inchamiento	14	Q 45.00	Q 16,731.00
Mano de Obra	14	días	3 albañiles y 6 ayudantes	14	Q 510.00	Q 7,140.00
Alquiler ballaninas	3	Unidad	1 por cada grupo	14	Q 125.00	Q 5,250.00
Banderilleros	2	Ayudante	1 por entrada de calle	14	Q 630.00	Q 1,260.00
						Q 30,381.00

REPOSICION DE PAVIMENTO						
ACTIVIDAD	CANTIDAD	UNIDAD	DETALLES	TIEMPO EN DÍAS	COSTO UNITARIO	COSTO
Colocación de formaleta	100	m		1	Q 215.00	Q 215.00
Formaleta y equipo	100	m	Formaleta en alquiler	2	Q 2.00	Q 400.00
Concreto	49.5	m ³	1.1 factor de desperdicio	0.5	Q 730.00	Q 36,135.00
Colocación	300	m ²		0.5	Q 12.15	Q 3,645.00
Curado	300	m ²		0.5	Q 6.00	Q 1,800.00
Corte	220	m	Cotes cada 2.50	0.5	Q 4.50	Q 990.00
Sello	220	m	Sellar a los 28 días	1	Q 12.00	Q 2,640.00
Banderilleros	2	Ayudante	1 por entrada de calle	3	Q 135.00	Q 270.00
						Q 46,095.00

RESUMEN

Días laborados	22
Días con cierre de calle	28
Costo Total	Q165,173.50
Costo Unitario por metro lineal de zanja	Q1,651.74

Figura 20. Presupuesto método tradicional.

Fuente: Rivera.

INTRODUCCIÓN DE DRENAJES EN VILLA NUEVA

Relleno fluido con zanja a 3.00 m. de ancho

ALCANCE

Introducción de drenaje de 75 cm. de diámetro para aguas negras para un tramo de 100 metros lineales la calle actualmente posee tráfico alto en horas pico y tiene un pavimento de concreto de 15 cm. de espesor

DIMENSIONES			
Ancho de Zanja	3.00	m	Dato de diseño
Profundidad de Zanja	1.10	m	Dato fijo
Longitud de zanja	100.00	m	Dato fijo

DEMOLICIÓN DE PAVIMENTO						
ACTIVIDAD	CANTIDAD	UNIDAD	DETALLES	TIEMPO EN DÍAS	COSTO UNITARIO	COSTO
Trazo	500	m	1 albañil 2 ayudantes	0.25	Q 0.34	Q 170.00
Corte para demolición	500.00	m	1 corte de 3 m cada 0.75	1	Q 6.00	Q 3,000.00
Volumen de demolición	45	m ³	3 albañiles y 6 ayudantes	4	Q 107.56	Q 4,840.00
Acarreo de ripio	58.5	m ³	1.3 factor de inchamiento	4	Q 69.00	Q 4,036.50
Cargador Frontal	4	días	Jornada de 8 horas	4	Q 250.00	Q 8,000.00
Banderilleros	2	Ayudante	1 por entrada de calle	2	Q 90.00	Q 180.00
				4		Q 20,226.50

EXCAVACIÓN DE ZANJA						
ACTIVIDAD	CANTIDAD	UNIDAD	DETALLES	TIEMPO EN DÍAS	COSTO UNITARIO	COSTO
Mano de Obra	330	m ³	3 albañiles y 6 ayudantes	14	Q 21.64	Q 7,140.00
Herramientas varias	14	días	Palas, carretas, etc.	14	Q 100.00	Q 1,400.00
Piomero	14	días	Para cubrir emergencias	14	Q 100.00	Q 1,400.00
Acarreo de ripio	429	m ³	1.3 factor de inchamiento	14	Q 69.00	Q 29,601.00
Cargador Frontal	5.66	días	Jornada de 8 horas	14	Q 250.00	Q 11,320.00
Banderilleros	2	Ayudante	1 por entrada de calle	14	Q 630.00	Q 1,260.00
				14		Q 52,121.00

COLOCACIÓN DE DRENAJE						
SE OMITIÓ ESTE PASO POR SER EL MISMO COSTO EN AMBOS CASOS						

RELLENO DE ZANJA						
ACTIVIDAD	CANTIDAD	UNIDAD	DETALLES	TIEMPO EN DÍAS	COSTO UNITARIO	COSTO
Relleno Fluido	286	m ³	1.1 factor de desperdicio	1	Q 450.00	Q 128,700.00
Mano de Obra	2	días	1 albañil y 2 ayudantes	2	Q 170.00	Q 340.00
Alquiler ballaninas	0	Unidad	1 por cada grupo	0	Q 125.00	Q -
Banderilleros	2	Ayudante	1 por entrada de calle	2	Q 90.00	Q 180.00
				2		Q 129,220.00

REPOSICIÓN DE PAVIMENTO						
ACTIVIDAD	CANTIDAD	UNIDAD	DETALLES	TIEMPO EN DÍAS	COSTO UNITARIO	COSTO
Colocación de formaleta	100	m		1	Q 170.00	Q 170.00
Formaleta y equipo	100	m	Formaleta en alquiler	2	Q 2.00	Q 400.00
Concreto	49.5	m ³	1.1 factor de desperdicio	1	Q 730.00	Q 36,135.00
Colocación	300	m ²	Vibrado y emparejado	1	Q 12.15	Q 3,645.00
Curado	300	m ²	producto y aplicación	1	Q 6.00	Q 1,800.00
Corte	320	m	Cortes cada 2.50	0.25	Q 4.50	Q 1,440.00
Sello	320	m	Sellar a los 28 días	1	Q 12.00	Q 3,840.00
Banderilleros	2	Ayudante	1 por entrada de calle	3	Q 135.00	Q 270.00
				3		Q 47,700.00

RESUMEN

Días laborados	23
Días con cierre de calle	30
Costo Total	Q 249,267.50
Costo Unitario por metro lineal de zanja	Q2,492.68

Figura 21. Presupuesto relleno fluido.
Fuente: Rivera.

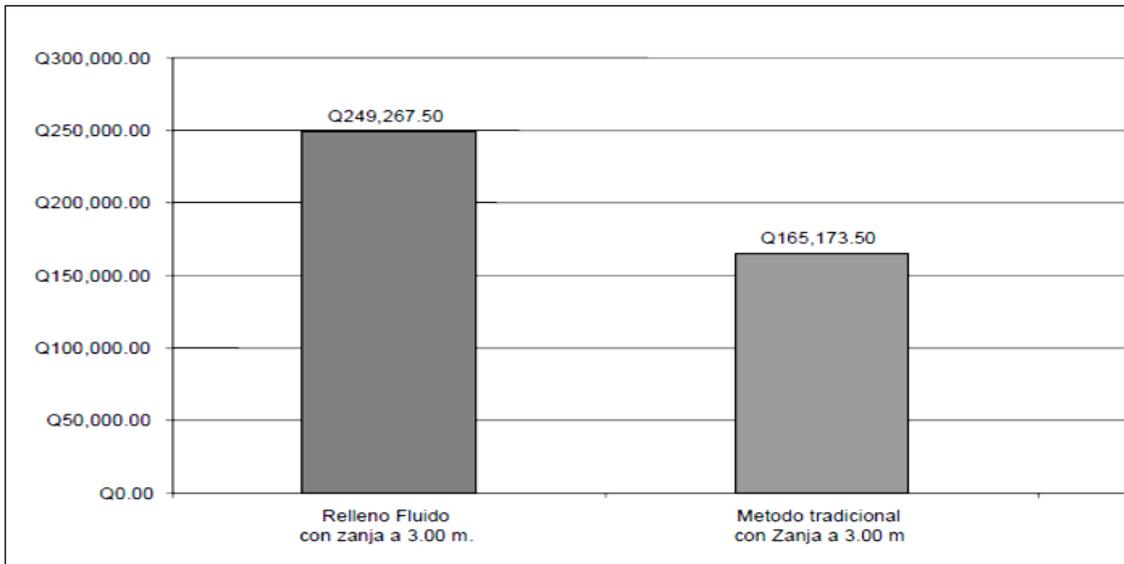


Figura 22. Comparativo de costos.
Fuente: Rivera.

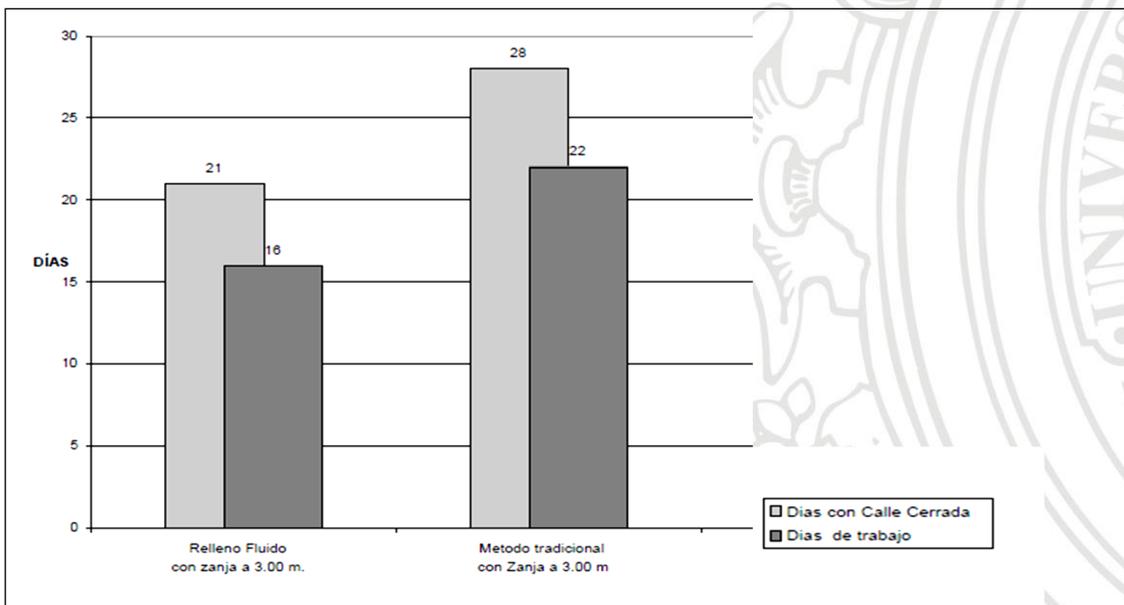


Figura 23. Comparativo días.
Fuente: Rivera.

En la figura 22 se presenta un resumen del costo total, realizando el cambio de moneda a pesos colombianos, los valores son de \$81'594.057 y 123'135.652, para el método tradicional y empleando relleno fluido, respectivamente. Es decir, que, al emplear relleno fluido, se genera un costo adicional de casi el 50% respecto al método tradicional.

Por otro lado, en la figura 23 se presenta un comparativo entre los días trabajados y de cerramiento de la vía para ambos métodos. Respecto a los días de cierre de la vía se logró una reducción de cerca del 25%, lo cual es un factor para considerar, pues se puede poner más rápido en funcionamiento la estructura; en los días de trabajo se evidencia una disminución del 27%, lo cual son días que se disminuyen tanto de pagos de honorarios y personal, como de posibles retrasos.

Al realizar una comparación económica, no se debe de limitar a considerar los costos de los materiales y los tiempos de mano de obra; también deben considerarse los tiempos de ejecución entre ambos métodos ya que el tiempo que puede pasar una calle sin ser transitada, una bodega sin ser utilizada, el tiempo que se suspendan actividades en una empresa, hospital o comunidad puede ser el punto más importante para realizar el trabajo que el costo mismo.

7 Metodología

Con el fin de lograr los objetivos planteados, se llevaron a cabo las siguientes actividades:

7.1 Consulta y revisión del estado del arte de las metodologías empleadas para el llenado de bodegas industriales

Antes de realizar un análisis del procedimiento constructivo ejecutado al interior de la obra, se hizo una revisión bibliográfica de las metodologías ejecutadas en obras similares o en obras viales donde la conformación de terraplenes por medio de llenos es un pilar fundamental. Con ello se buscó realizar una comparación entre las metodologías y los controles que tenían.

Por otro lado, se logró hallar información referente al control de la humedad y de la compactación que se realiza en la obra CLIN, mediante una guía procedimental, además, de obtener los resultados de los ensayos realizados a los materiales que conformaban las capas de subbase y base de los llenos de las bodegas industriales. También, por medio de esta consulta se pudieron encontrar algunos avances tecnológicos como lo son las compactaciones inteligentes que permiten disminuir los tiempos de compactación y del uso de materiales como el concreto fluido que pueden mejorar las características mecánicas del suelo in situ.

7.2 Búsqueda de los ensayos realizados a los materiales empleados para el lleno estructural en el proyecto

Para entender el porqué del diseño de los espesores de cada una de las capas del lleno estructural en las bodegas, se realizó una búsqueda y revisión de cada uno de los ensayos que se le realizaron a los materiales que conforman esta estructura. Dentro de estos se tienen los ensayos de CBR realizados para la base y subbase, y de la granulometría empleada para éstas igualmente. Sin embargo, al realizar el análisis de estos resultados, se pudo apreciar una variación en los resultados de las densidades máximas y humedad óptima en los ensayos de CBR y de densidad de campo, esto a raíz del cambio de material durante la ejecución de la obra.

7.3 Comparación de los resultados de los ensayos de densidad de campo para el lleno estructural del CLIN con los requeridos por la normativa y en las especificaciones del proyecto

Se realizó un análisis del resultado del ensayo de densidad de campo con cono de arena de varias bodegas industriales, y estos se compararon con los valores requeridos por la normativa y en las especificaciones del proyecto, de tener como mínimo una densidad in situ del 95% del valor obtenido del ensayo de Proctor modificado. Esto con el fin de garantizar una compactación adecuada y con ello una garantía para la estabilidad y funcionabilidad a largo plazo de la losa.

7.4 Toma de registros fotográficos de los procesos de llenado en el interior de las bodegas

Se realizó el seguimiento fotográfico de cada una de las fases que componen el lleno estructural como son el acopio y llegada de material, el mezclado del material granular, el regado y compactación de cada una de las capas, los imprevistos que surgían durante la ejecución de cada actividad y de la maquinaria requerida para ésta. Todo este registro se tomó con el fin de tener una evidencia visual del día a día dentro de la obra.

7.5 Registro de los tiempos de duración del lleno de cada una de las capas que componen la estructura

Para realizar un análisis de la duración de cada actividad dentro del lleno estructural, se tomó el registro del ingreso de material a la obra durante 9 días consecutivos, con el fin de tener un promedio diario del ingreso y estudiar el rendimiento de este. También se cronometró la duración del mezclado de material, el regado de este, la humectación y la compactación, con el fin de encontrar los puntos en los cuales se puede mejorar y reducir de esta forma el tiempo de llenado en cada bodega.

7.6 Identificación de las variables que afectan el rendimiento de la ejecución del lleno estructural

Durante la ejecución del lleno al interior de las bodegas industriales, se logró identificar una serie de variables que afectan los tiempos de ejecución de esta actividad, para esto se realizó un análisis visual del día a día al interior de la obra y del seguimiento de cada uno de los pasos que requiere el llenado estructural de las bodegas. Con ellos se encontraron puntos críticos como son la poca coordinación con los demás frentes de la obra y de imprevistos que se generaban diariamente.

7.7 Elaboración de propuestas y recomendaciones para la optimización de los tiempos de ejecución del lleno estructural y viabilidad de estas

Tomando como base la revisión bibliográfica y el análisis del procedimiento ejecutado dentro de la obra se realizaron varias propuestas que permitieran reducir la duración de las actividades que conforman este frente de obra, tomando como base los recursos disponibles y de la posibilidad de implementar adecuadamente las mejoras.

8 Resultados y análisis

8.1 Revisión del estado del arte

Dentro de las metodologías y avances encontrados durante la revisión del estado del arte de los procesos de conformación de los llenos, se puede apreciar un constante uso de herramientas tecnológicas ligadas a la

georreferenciación, como lo es el uso del GPS para realizar un mapeo de la zona a compactar y ubicar los puntos donde esta actividad presenta problemas. También al obtener información en tiempo real con el uso de la compactación inteligente, se pueden disminuir los costos respecto al uso de maquinaria, tanto para el pago al operador como del consumo de combustible, además que incrementa la calidad y seguridad final de la obra.

Al analizar la implementación de nuevos materiales que permiten lograr altas resistencias y que disminuyen los tiempos de ejecución, se puede pensar en optar por ellas, sin embargo, los costos son un factor para considerar, y por ende el costo-beneficio se debe evaluar profundamente, para evitar sobrecostos innecesarios o por otro lado retrasos y multas por incumplimientos.

Todas estas alternativas y metodologías se enfocan en garantizar la estabilidad a largo plazo del lleno y de reducir los tiempos de ejecución de esta actividad, pero su costo mayor respecto a los sistemas tradicionales los puede hacer parecer poco atractivos. Sin embargo, en muchas ocasiones la disminución de tiempos puede ser más importante que los costos, por ejemplo, una vía de alta importancia o de gran tráfico, la pista de un aeropuerto, estacionamientos o vías de acceso a construcciones de uso primordial como son hospitales, deben estar la menor cantidad de tiempo cerradas.

8.2 Caso de estudio: Centro Logístico Industrial del Norte (CLIN)

8.2.1 Ensayos de laboratorio

Dentro del control de los materiales grueso granulares que conforman la subbase y base, se requieren realizar ensayos de granulometría, de contenido de materia orgánica, de índice de alargamiento y aplanamiento.

Para la obra se deben cumplir con las especificaciones presentadas en la tabla 2 y se trabaja con una subbase granular SBG 20 y una base granular BG 25, cuya granulometría se muestra en la tabla 3. Además, el material para la subrasante se considera como suelo tolerable, ver tabla 1. En las figuras 24 y 25 se muestran los resultados de los ensayos de Proctor y CBR realizados, respectivamente.

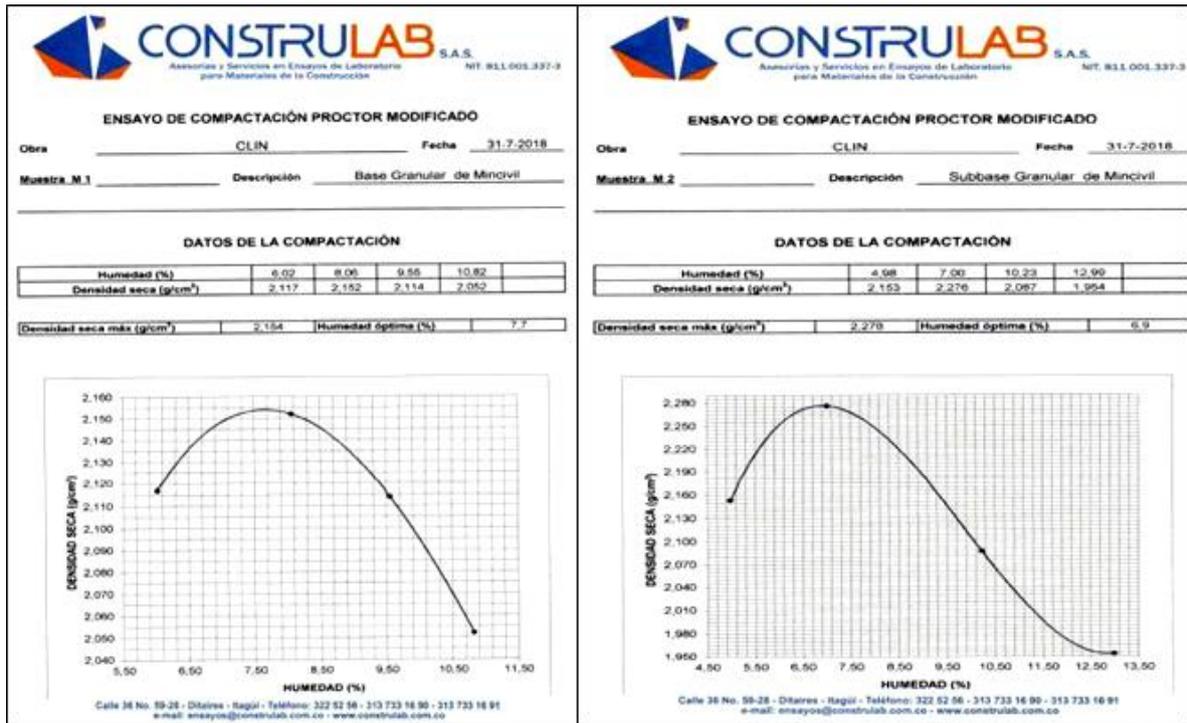


Figura 24. Resultado ensayos de Proctor modificado subbase y base granular.
Fuente: Franco.

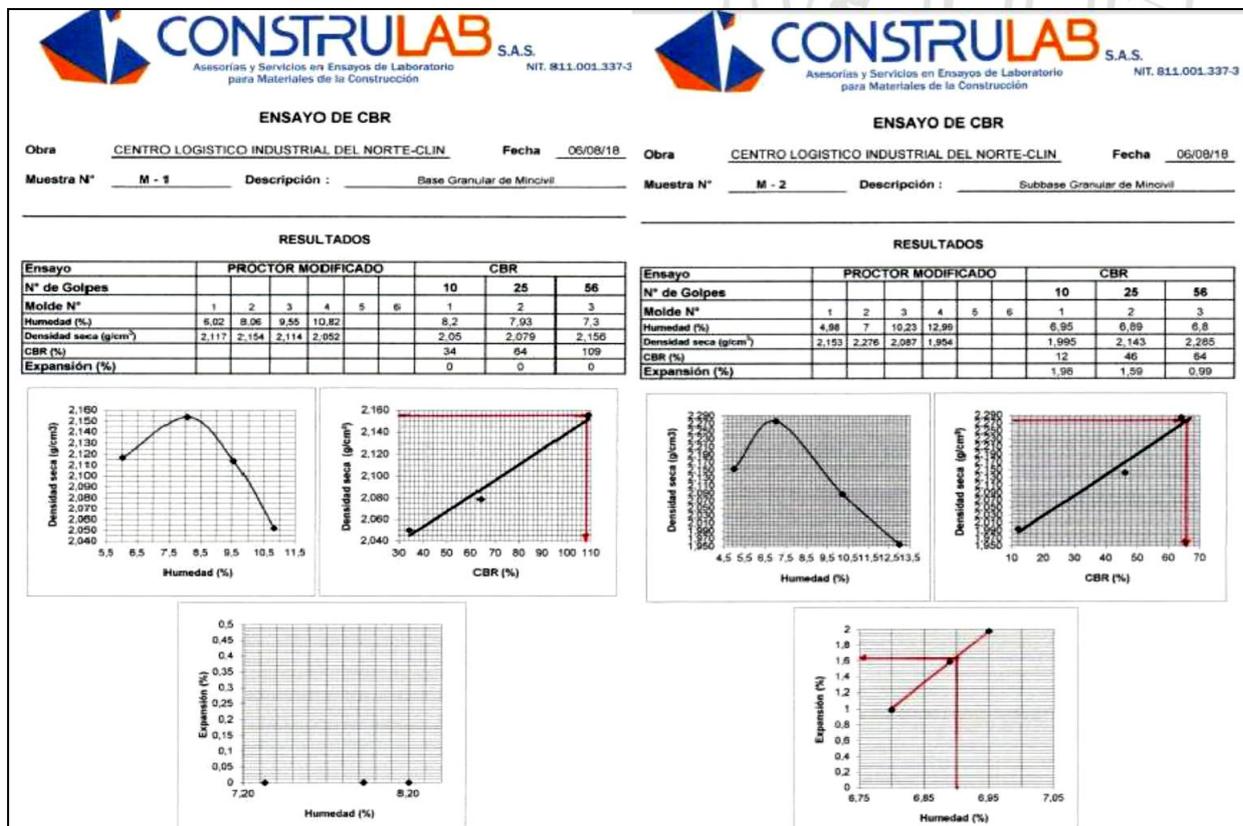


Figura 25. Resultado ensayos de CBR subbase y base granular.
Fuente: Franco.

Para analizar el cumplimiento de las especificaciones del lleno estructural para las bodegas industriales, se realiza el ensayo de densidad con cono, el cual se nombró anteriormente. Cabe resaltar que de acuerdo con la normativa este ensayo se debe realizar para cada una de las capas que conforman el lleno. Ver figura 2. Sin embargo, en la obra se realiza únicamente para la capa de base granular.

A continuación, se presenta en la tabla 13 los resultados de los ensayos realizados a algunas de las bodegas que conforman el proyecto.

Tabla 13. Resultados de densidad de campo en bodegas industriales.

Ensayo de densidad en campo con cono					
N° ensayo	Proctor modificado		Densidad in situ		
	Humedad óptima %	Densidad seca máx. kg/m³	Densidad seca. Kg/m³	% humedad	% compactación
1	5.1	2050	2105.14	2.6	102.7%
2	5.1	2050	2253.49	2.4	109.9%
3	5.1	2050	2165.39	2.9	105.6%
4	5.1	2050	2165.69	3.3	105.6%
5	5.1	2050	2193.39	3.5	107.0%
6	5.1	2050	2168.21	4.1	105.8%
7	5.1	2050	2213.55	4.1	108.0%
8	5.1	2050	2121.8	4.3	103.5%
9	5.1	2050	2055.98	4.7	100.3%
10	5.1	2050	2112.87	4.6	103.1%
11	5.1	2050	2233.21	4.2	108.9%
12	5.1	2050	2139.51	3.7	104.4%
13	5.1	2050	2215.57	3.5	108.1%
14	5.1	2050	2085.61	3.5	101.7%
15	5.1	2050	2145.2	3.2	104.6%
16	5.1	2050	2212.88	4.4	107.9%
17	5.1	2050	2402.25	3.6	117.2%

18	5.1	2050	2247.7	5.6	109.6%
19	5.1	2050	2266.26	3.8	110.5%
20	5.1	2050	2411.63	4.3	117.6%

Fuente: Elaboración propia, 2020.

De acuerdo con los datos obtenidos, se observa que las densidades obtenidas in situ son mayores a las tabuladas por el ensayo de Proctor modificado, superando el 95% de la densidad máxima seca de este último que pide la normativa para la densidad in situ. Esto permite garantizar una resistencia adecuada de esta capa de la estructura del lleno, además, que el proceso de compactación se está realizando de forma adecuada. Sin embargo, al verificar únicamente la densidad de la base granular, no se puede garantizar que las demás capas cumplan con el 95% del Proctor modificado obtenido para cada una de estas.

También se logra apreciar que la mayoría de los resultados de % de humedad están por debajo de la humedad óptima del ensayo de Proctor modificado, lo que permite inducir que la energía de compactación del vibrocompactador es mayor a la suministrada durante el ensayo, con lo cual se obtienen densidades mayores a niveles más bajos de humedad.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que se han presentado cambios en los proveedores de los materiales, por lo tanto, la variación de las características de estos también se deben considerar como una posible causa de las diferencias que se obtienen respecto a la densidad y porcentaje de humedad, como se puede apreciar en la densidad máxima y humedad óptima obtenida en el ensayo de Proctor modificado, ver figura 24, y la de densidad máxima y humedad óptima de referencia utilizada en el ensayo de densidad de campo, ver tabla 13.

8.2.2 Proceso de conformación del lleno estructural

En la figura 26, se presenta el proceso de conformación del lleno estructural, incluyendo las actividades previas que se realizan en el interior de las bodegas.

Tabla 14. Cantidad de material y viajes.

Material de lleno estructural para bodegas industriales									
Capa	Espesor (m)	Cantidad (m3)	% Triturado	% Arenilla	Triturado (m3)	Arenilla (m3)	Viajes triturado	Viajes arenilla	Viajes
Subrasante	0.53	1073.25	-	-	-	-	-	-	77
Subbase	0.35	708.75	75%	25%	532	177	38	13	-
Base	0.25	506.25	67%	33%	339	167	24	12	-
Total					871	344	62	25	77

Fuente: Elaboración propia, 2020.

De material para subrasante se tiene una cantidad de 1073.25 m³, lo cual requiere un total de 77 viajes. Por otro lado, para realizar las capas de subbase y base granular se requieren 344 m³ de arenilla y 871 m³ de triturado con 25 y 62 viajes respectivamente.

A continuación, en la tabla 15 y 16, se muestra el registro de ingreso de los materiales para las capas de subrasante, subbase y base.

Tabla 15. Ingreso de material para la subrasante.

Promedio de ingreso de material de subrasante	
Fecha	Número de viajes
13/02/2020	6
14/02/2020	2
15/02/2020	8
17/02/2020	15
19/02/2020	6
20/02/2020	11
21/02/2020	5
22/02/2020	11
24/02/2020	7
Promedio diario	8

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Tabla 16. Ingreso de material para la subbase y base.

Promedio de ingreso de material de subbase y base		
Fecha	Número de viajes triturado	Número de viajes arenilla
9/03/2020	4	3
10/03/2020	2	6
11/03/2020	3	5
12/03/2020	5	8
13/03/2020	4	6
14/03/2020	0	0
16/03/2020	7	2
17/03/2020	9	5
18/03/2020	8	6
Promedio diario	5	5

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Tomando como referencia los datos obtenidos en las tablas 14, 15 y 16, se procede a calcular el rendimiento de ingreso de material necesario para la actividad de lleno estructural. Los resultados se muestran en la tabla 17.

Tabla 17. Rendimiento de ingreso de material.

Ingreso de material						
Capa	Viajes totales	Viajes por día	Viajes por día triturado	Viajes por día arenilla	Días totales	Rendimiento diario %
Subrasante	77	8	-	-	10	10.4%
Subbase	51	-	5	5	5	19.6%
Base	36	-	5	5	4	27.8%

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Se puede observar de los resultados que el rendimiento diario de ingreso de material a la obra para lleno estructural de bodegas es muy bajo, por lo que representa uno de los factores principales que genera retrasos en la actividad y en el desarrollo de la obra.

También se realiza el registro de la duración de las actividades de mezclado, nivelación y compactación. Ver tabla 18.

Tabla 18. Rendimiento de actividades.

Mezclado y nivelación de material			
Capa	Días mezclado	Días nivelación	Días compactación
Subrasante	-	1	1
Subbase	3	2	2
Base	3	2	2

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Si bien se puede observar que los procesos de mezclado, nivelación y compactación no tienen una gran duración, todos estos se ven afectados por el bajo ingreso de material a la obra, por lo tanto, se comprueba que la escasez de material es uno de los factores que influye en el rendimiento del lleno estructural.

8.2.4 Identificación de variables que afectan el proceso de llenado

Dentro de la revisión de la actividad de lleno estructural en la obra, se lograron evidenciar algunas variables que afectan el rendimiento de esta. Entre las que se identificaron, se pueden mencionar:

- **Falta de coordinación con los otros frentes de la obra:** Durante el proceso de llenado al interior de las bodegas, en ocasiones se encontraban otros frentes como por ejemplo el frente de soldadura o de izaje y el llenado se debía parar por la presencia de maquinaria como grúas, telehandlers o manlifts, inclusive podía haber volquetas varadas al interior de las bodegas. También se presentaban ocasiones en las que, durante el proceso de llenado, la maquinaria era llevada o solicitada por otros frentes o la entrada a las bodegas estaba bloqueada.



Figura 27. Presencia de otros frentes de trabajo.
Fuente: Fotografía propia.

- **Espacios reducidos para el ingreso de volquetas, motoniveladora y vibrocompactador:** En las bodegas se entraban zonas en las cuales el espacio para operar la maquinaria era limitado o con una altura libre baja. Por ejemplo, en una de las bodegas se encontraba un mezanine a una altura de 4.2m por lo cual la motoniveladora y el vibrocompactador no podían trabajar y era necesario emplear maquinaria de menor tamaño que afectaba el rendimiento.



Figura 28. Altura libre reducida.
Fuente: Fotografía propia.

- **Reiterados problemas mecánicos:** La maquinaria presentaba recurrentemente fallas mecánicas y los tiempos de espera eran altos para la reparación de estos. En la tabla 19, se muestran las intervenciones realizadas al carrotanque en menos de 1 mes.

Tabla 19. Mantenimientos efectuados al carrotanque.

EQUIPO	PROYECTO	INTERVENSIÓN	Fecha 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

Fuente: Ochoa, 2020.



Figura 29. Maquinaria con fallas mecánicas.
Fuente: Fotografía propia.

- Mala programación para los procesos de llenado:** Durante el llenado de las bodegas, en ocasiones se debía parar el proceso en una bodega y pasar a otra por cambios de prioridades, lo cual genera retrasos y retrocesos posteriores, ya que se puede perder la humedad del material para subbase y base y es necesario realizar nuevamente la humectación del material.



Figura 30. Cambio de prioridades recurrentes.
Fuente: Fotografía propia.

- **Desabastecimiento de material:** Como se mostró en las tablas 16, 17 y 18, los rendimientos de ingresos de material para subrasante, subbase y base son bajos, por lo cual en muchas ocasiones se tenía que parar el proceso de llenado por falta de este.



Figura 31. Poco flujo de material para llenado.
Fuente: Fotografía propia.

- **Los retrasos en la construcción de las cubiertas de las bodegas:** Esta actividad es primordial, ya que las capas de subbase y base se deben realizar posterior a la culminación de la cubierta para evitar fallos por precipitaciones o pérdida de material.



Figura 32. Retrasos en la construcción de las cubiertas.
Fuente: Fotografía propia.

- **No realización de actividades previas:** Por ejemplo, la no instalación de tuberías e impermeabilización de muros genera reprocesos y pérdida de material de subbase y base, debido a que se contaminaba con limo.



Figura 33. Colocación de tubería de aguas lluvia.
Fuente: Fotografía propia.

- **Ruptura de bajantes para aguas lluvias durante la nivelación:** Al emplear maquinaria como la motoniveladora o el minicargador, se presentaban en ocasiones daños en los bajantes de agua lluvia, lo cual detiene el proceso de llenado hasta su reparación.



Figura 34. Ruptura de bajante durante nivelación.
Fuente: Fotografía propia.

- **Generación de fallos en las capas:** Durante el proceso de llenado se presentaban en ocasiones fallos por precipitaciones o por la no conexión de tuberías.



Figura 35. Fallos en las capas del lleno.
Fuente: Fotografía propia.

- **Poco control de la humedad del material compactado:** A pesar de tener una guía procedimental para controlar el proceso de llenado, mostrada en el presente informe, no se tomaban estas recomendaciones, lo que generaba que el material estuviera seco o muy húmedo, lo cual afectaba la compactación y el cumplimiento de las densidades respecto al ensayo de Proctor modificado.



Figura 36. Regado de subbase.
Fuente: Fotografía propia.

- **Cambios en los niveles de llenado para las diferentes capas durante la ejecución de estas:** Durante el proceso de llenado, en ocasiones se cambiaban los niveles de las capas, por lo cual se debía quitar o agregar material y con esto afectar el rendimiento diario.



Figura 37. Cambio de nivel de subbase.
Fuente: Fotografía propia.

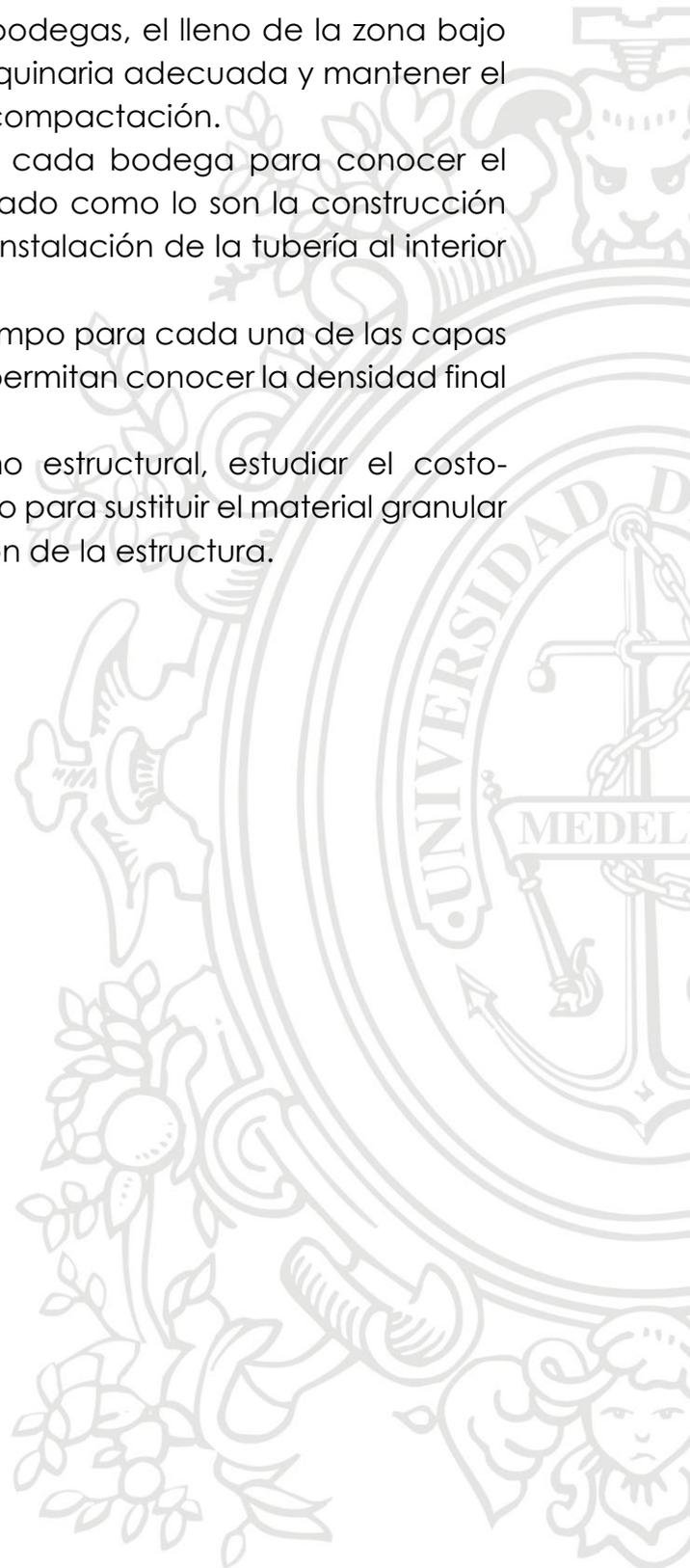
9 Recomendaciones y propuestas de mejora

Teniendo en cuenta la información recopilada durante el tiempo en obra y haciendo una comparación del procedimiento de ejecución implementado y de los avances y controles que se hallaron durante la revisión bibliográfica, se presentan algunas recomendaciones en pro de la optimización del tiempo y de los materiales empleados en el proceso de conformación del lleno estructural dentro de las bodegas.

- Realizar una programación en paralelo de forma secuencial y lógica del lleno de mínimo 3 bodegas industriales, esto con el fin de agilizar el uso de la maquinaria y evitar los tiempos muertos entre el regado de material, humectación y compactación.
- Realizar con mínimo una semana de antelación una revisión del estado de cada una de las capas, con el fin de realizar una cubicación adecuada del material necesario para la semana posterior a dicha revisión, esto permitirá tener un control y se evitará el desperdicio. Además, se debe tener claridad sobre los cambios en los niveles de llenado con anterioridad.
- Solicitar el material necesario para la subbase y base como mínimo con una semana de antelación al llenado de las bodegas, para realizar un adecuado mezclado y evitar el desabastecimiento de este.
- Antes de realizar la programación del llenado de las bodegas, se debe hablar con los diferentes frentes de la obra para saber la programación que se tiene en la bodegas y evitar interferencias en el desarrollo de las actividades de estos.
- Implementar la guía procedimental realizada para el lleno de las bodegas, con el fin de controlar tanto la humedad como la compactación y evitar reprocesos o pérdida de material por fallos.
- Inspeccionar de forma periódica la maquinaria con el fin de anticipar, evitar o mitigar en lo posible las fallas mecánicas recurrentes, y en caso tal de que sucedan, agilizar la corrección de estas.
- Realizar el acopio del material para la conformación de la subbase y base en una sola bodega y que esté cercana a las bodegas programadas para el llenado, con el fin de tener un control del ingreso y del proceso de mezclado del material.
- Analizar la viabilidad de implementar un proceso de compactación inteligente, teniendo en cuenta la capacidad financiera y de recursos que tenga la empresa. Ya que este sistema permite una reducción del

tiempo de llenado y aumenta la calidad de la compactación de cada una de las capas. Además, evita el paso en exceso del vibrocompactador, lo cual disminuye el uso de combustible.

- Realizar con prioridad dentro de las bodegas, el lleno de la zona bajo los mezanines, para poder usar la maquinaria adecuada y mantener el rendimiento diario y la calidad de la compactación.
- Tener un cuadro de seguimiento de cada bodega para conocer el estado de actividades previas al llenado como lo son la construcción de cubiertas y muelles de carga y la instalación de la tubería al interior de estas.
- Realizar el ensayo de densidad de campo para cada una de las capas del lleno o implementar ensayos que permitan conocer la densidad final de cada capa.
- Antes de realizar el diseño del lleno estructural, estudiar el costo-beneficio de implementar relleno fluido para sustituir el material granular y acelerar el proceso de conformación de la estructura.



10 Conclusiones

Durante la revisión de los procesos y metodologías implementadas en los procesos de ejecución de los llenos estructurales, se pudo evidenciar que la optimización de los tiempos va ligada a los avances tanto técnicos como tecnológicos. En este último aspecto, la metodología de compactación inteligente se basa en una combinación de la georreferenciación, avances computacionales y de software y la experiencia obtenida en la realización de esta actividad. Si bien la IC no es muy utilizada en Colombia debido a la poca promoción que se le da por parte de los entes reguladores y a la reglamentación de su uso, se puede precisar una intención de migrar a esta metodología por parte del medio de la construcción.

También al realizar la revisión del estado del arte sobre los llenos estructurales, se encontró el uso de relleno fluido como una alternativa que permite generar altas resistencias, incluso en zonas de difícil acceso, y en un tiempo considerablemente menor respecto al sistema tradicional en el que se usa material granular. Este ítem puede ser el más importante en proyectos donde cada día de cierre o en el que no se ponga en funcionamiento un espacio puede generar pérdidas financieras. Sin embargo, es allí donde los estudios de factibilidad y viabilidad juegan un papel fundamental, ya que es allí donde se realiza un análisis del costo-beneficio, pues si bien el uso de relleno fluido puede disminuir entre un 25% y 27% los tiempos de ejecución, el costo si puede ser hasta un 50% mayor que el sistema tradicional de llenado.

A raíz de estas metodologías encontradas, se pudo realizar una comparación respecto al caso de estudio de las bodegas industriales en el Centro Logístico Industrial del Norte, en el cual se verificaron las calidades de los materiales implementados para conformar las capas de subbase y base por medio de los ensayos de CBR y Proctor modificado. Sin embargo, se evidenció que el ensayo de densidad de campo con cono de arena se realiza solo para la capa de base, cuando se debería realizar para cada una de las capas que conforman el lleno con el fin de garantizar la densidad adecuada y por ende un comportamiento adecuado de la estructura. Además, se encontraron variables que afectaban el rendimiento de la actividad, entre las cuales el desabastecimiento de material era la más importante ya que de ella se derivaban las demás.

Como solución a estos problemas encontrados en el caso de estudio, se propuso reorganizar la metodología empleada actualmente en el proyecto y realizar un llenado en paralelo en diferentes bodegas para reducir los tiempos muertos, previo a esto se debe realizar una cubicación adecuada del material

necesario con antelación y una programación con los demás frentes de obra para evitar interrupciones en la actividad. También se propone evaluar la viabilidad de equipar a la maquinaria actual utilizada para la compactación con un sistema inteligente que permita garantizar una calidad adecuada del lleno y evitar pasadas innecesarias y detectar las zonas que presentes problemas de compactación.



11 Referencias Bibliográficas

- Aldana, R. (2020, 31 mayo). *Ensayo Proctor Normal y Proctor Modificado*. Aulacarreteras. <https://www.aulacarreteras.com/ensayo-proctor/>
- AMEC International Ingeniería y Construcción Ltda. (2010). *ESPECIFICACIÓN TÉCNICA EXCAVACIONES Y RELLENOS ESTRUCTURALES M40035-1-SPEC-002*. <https://es.scribd.com/document/350556025/Excavaciones-y-Rellenos-Estructurales>
- Andreu, R., Bradineras, F. J., & Grau, R. (2009, 10 noviembre). *Diseño de una nave industrial sin uso específico en la localidad de Vilamalla*. <https://repositori.udl.cat>. <http://hdl.handle.net/10459.1/45812>
- Asociación nacional técnica de estabilizados de suelos y reciclado de firmes (ANTER). (2010). *Equipos de compactación*.
- Berbeo, C. H. (2011, diciembre). *Pautas generales para la creación de una nave de almacenamiento modular destinada a productos no perecederos*. *Revista Clepsidra*. <https://doi.org/10.26564/19001355.58>
- CAT CS533. (2020). CAT. https://www.cat.com/es_MX/products/new/equipment/compactors/vibratory-soil-compactors/18230166.html.
- CEMEX. (2020). *Relleno fluido*. <https://www.cemex.com/documents/46130145/46412300/FT-PA-relleno-fluido.pdf/eb21d58d-da64-94de-5ca8-ef7b5c555345>
- Das, B. M. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (Cuarta Edición ed.). Editorial Cengage Learning, Inc.

- Espanya. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. (1987). *Sistematización de los medios de compactación y su control* (Vol. 19). Centro de Publicaciones. Secretaria General Técnica. Ministerio de Obras Públicas.
- Esquivel, R. (2011). *Compactación inteligente de suelos, bases y sub-bases en Colombia*.
<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/11513/u538813.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Franco, Y. A. (2019). *Práctica empresarial como auxiliar de ingeniería en nivelación del lleno en bodegas industriales y logísticas*.
<http://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/13169>
- García, E. (2017). *Diapositivas del curso "Mecánica de Suelos"*. Clase teórica Universidad de Antioquia.
- IngenieriaReal.com. (2020, 11 octubre). *Cómo realizar ensayo densidad en el sitio*. <https://ingenieriareal.com/como-realizar-ensayo-densidad-en-el-sitio-con-el-cono-de-arena/>
- INVIAS. (2012). *Especificaciones generales de construcción de carreteras*.
<https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-ynormas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>
- JH-Soluciones integrales. (s. f.). *Ingeniería Estructural*.
<https://www.sioingenieria.com/sitio/>
- *Manual de diseño y construcción pisos industriales*. (2017). CEMEX.
<https://es.scribd.com/document/356969246/Manual-de-Diseno-y-Construccion-Pisos-Industriales-Cemex>

- Ochoa, J. A. (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)*.
http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/15176/1/OchoaJoh_n_2020_DesarrolloGuiaProcedimental.pdf
- Peña, N. L. (2018). *Análisis de la tecnología de compactación inteligente*.
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/13789/2018penana dia.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- Rivera, E. M. (2008). *Uso de rellenos fluidos en la construcción*.
http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2904_C.pdf
- Salsilli, R. (2012). *Manual de diseño de pisos industriales*. Instituto del cemento y del hormigón de Chile.
- Universidad Nacional de Ingeniería. (2016). *El concreto en la práctica ¿Qué, Por qué y Cómo?*
<https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-de-ingenieria/arquitectura-bioclimatica/informe/el-concreto-en-la-practica-que-por-que-y-como/5114808/view>
- Vilcas, J. M. (2018). *Planteamiento del mejoramiento del suelo empleando relleno fluido para la construcción de los edificios multifamiliares en la obra casa club recrea "los nogales", distrito de el agustino, lima*.
<http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/2042>
- Zapata Ingenieros. (2016). *Base y sub base granular*.
<http://www.zapataingenieros.com/base-y-sub-base-granular/>

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

Figura 38. Registro de mantenimientos preventivos y correctivos del vibrocompactador.

Fuente: Ochoa.

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

Figura 39. Cantidades de materiales para realizar las diferentes capas del lleno estructural en función de diferentes espesores.
Fuente: Ochoa.

CL-71296-01-2020
Itagüí 2020-01-18

Ingeniero
César Augusto Garcés Restrepo
GOMECO S.A.S.
Obra: CENTRO LOGÍSTICO E INDUSTRIAL DEL NORTE "CLIN"
Doble Calzada Bello-Hatillo / 3008524300-3225778027
Girardota

Asunto: Ensayos de densidad de campo - NTC 1667
Equipos empleados: Cono, placa, arena calibrada, balanza electrónica BLZ 03 MEGA HAW-10BH de 10000 g, calibrada en diciembre de 2019

Tabla de Resultado CENTRO LOGÍSTICO E INDUSTRIAL DEL NORTE "CLIN" Código: 2395 CL-71296-01-2020										
# 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	2105.14	102.7	2.6	Eje 17 I - Bodega 108	Obra	2020-01-15
2	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2253.49	109.9	2.4	Eje 17 G - Bodega 108	Obra	2020-01-15
3	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2165.39	105.6	2.9	Eje 14 B - Bodega 108	Obra	2020-01-15
4	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2165.69	105.6	3.3	Eje 14 H - Bodega 108	Obra	2020-01-15

HUMBERTO GUARIN ALZATE
Ingeniero Civil

CL-71375-01-2020
Itagüí 2020-01-22

Ingeniero
César Augusto Garcés Restrepo
GOMECO S.A.S.
Obra: CENTRO LOGÍSTICO E INDUSTRIAL DEL NORTE "CLIN"
Doble Calzada Bello-Hatillo / 3008524300-3225778027
Girardota

Asunto: Ensayos de densidad de campo - NTC 1667
Equipos empleados: Cono, placa, arena calibrada, balanza electrónica BLZ 03 MEGA HAW-10BH de 10000 g, calibrada en diciembre de 2019

Tabla de Resultado CENTRO LOGÍSTICO E INDUSTRIAL DEL NORTE "CLIN" Código: 2395 CL-71375-01-2020										
# 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	2193.39	107.0	3.5	Patio de maniobras Bodega 114	Obra	2020-01-21
2	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2168.21	105.8	4.1	Patio de maniobras Bodega 119 entre eje 84-83	Obra	2020-01-21
3	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2213.55	108.0	4.1	Patio de maniobras Bodega 119 entre eje 80-86	Obra	2020-01-21
4	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2121.80	103.5	4.3	Patio de maniobras Bodega 118 entre eje 78-79	Obra	2020-01-21
5	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2055.98	100.3	4.7	Patio de maniobras Bodega 118 entre eje 76-77	Obra	2020-01-21

Tabla de Resultado CENTRO LOGÍSTICO E INDUSTRIAL DEL NORTE "CLIN" Código: 2395 CL-71665-02-2020										
# 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	2112.87	103.1	4.6	Bodega 141 R-113	Obra	2020-01-31
2	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	1991.95	97.2	5.0	Bodega 141 O-113	Obra	2020-01-31
3	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2139.51	104.4	3.7	Bodega 141 L-111	Obra	2020-01-31
4	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2215.57	108.1	3.5	Bodega 123 J-111	Obra	2020-01-31
5	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2085.61	101.7	3.5	Bodega 123 G-113	Obra	2020-01-31
6	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2145.20	104.6	3.2	Bodega 123 D-112	Obra	2020-01-31
7	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2212.88	107.9	4.4	vía bodega 116 lado izquierdo	Obra	2020-01-31
8	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2402.25	117.2	3.6	vía bodega 117 lado derecho	Obra	2020-01-31
9	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2247.70	109.6	5.6	vía bodega 118 lado izquierdo	Obra	2020-01-31
10	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	1985.42	96.8	20.7	vía bodega 119 lado derecho	Obra	2020-01-31
11	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2266.26	110.5	3.8	vía bodega 120 lado izquierdo	Obra	2020-01-31
12	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2233.21	108.9	4.2	vía bodega 121 lado derecho	Obra	2020-01-31
13	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2411.63	117.6	4.3	vía bodega 122 lado izquierdo	Obra	2020-01-31
14	Base granular	Modificado	5.1	2050.000	2233.67	109.0	3.9	vía bodega 123 lado derecho	Obra	2020-01-31

Figura 40. Ensayos de densidad de campo.
Fuente: GOMECO S.A.S.

Tabla 20. Revisión del estado del arte.

Identificación de la fuente	Objetivo	Categorías o variables	Instrumentos de recolección de la información	Resultados
<p>Informe: ESPECIFICACIÓN TÉCNICA EXCAVACIONES Y RELLENOS ESTRUCTURALES M40035-1-SPEC-002, (AMEC,2010)</p>	<p>Se busca realizar la descripción del proceso de ejecución de llenos y excavaciones, así como las características de los materiales empleados para los llenos estructurales. Se desarrolló en la ciudad de Antofagasta, Chile, en la ampliación de un proyecto minero.</p>	<p>Llenos, subbase y base granular, ensayos de materiales, preparación del terreno, colocación de lleno, compactación de materiales, controles.</p>	<p>Se empleó una metodología de observación cualitativa en la cual se realiza una descripción del paso a paso de la conformación de los llenos.</p>	<p>Se obtuvo una referencia respecto a la metodología empleada en los procesos de conformación de llenos estructurales, además de un comparativo respecto a la normativa chilena y colombiana en este campo.</p>
<p>Tesis: ANÁLISIS DE LA TECNOLOGÍA DE COMPACTACIÓN INTELIGENTE, (Peña, 2018)</p>	<p>Se busca realizar una revisión bibliográfica sobre la metodología de compactación inteligente para realizar una comparación entre éste y el sistema tradicional, con el fin de comparar los tiempos y</p>	<p>Sistema integrado de compactación inteligente, compactador vibratorio, sistemas de posicionamiento geográfico (GPS), módulo de rigidez, eficiencia del proceso de trabajo-beneficios.</p>	<p>Se empleó una metodología de revisión bibliográfica sobre la compactación inteligente y un estudio de caso de la empresa Consorcio Vial Oriente 1, que se encuentra reconstruyendo la vía denominada "Concesión del Sisga" que inicia desde la</p>	<p>Se obtuvo un marco teórico referente a la compactación inteligente, la instrumentación y maquinaria requerida para esto y del procedimiento de ejecución. Además, de la reducción en tiempo que permite este método de compactación</p>

	<p>costos de ejecución.</p> <p>Se desarrolló en la ciudad de Bogotá, Colombia.</p>		<p>Represa del Sisga y va hasta Aguaclara, Casanare.</p>	<p>respecto al tradicional.</p>
<p>Tesis: COMPACTACIÓN INTELIGENTE DE SUELOS, BASES Y SUBBASES EN COLOMBIA, (Esquivel, 2011)</p>	<p>Se busca conocer la variabilidad de costos entre el sistema tradicional de compactación y la compactación inteligente, además de consultar sobre la percepción de esta nueva metodología dentro de los operarios e ingenieros en el país.</p> <p>Se desarrolló en la ciudad de Bogotá, Colombia.</p>	<p>Compactación inteligente, costos, percepción, Colombia, especificaciones.</p>	<p>Se realiza una revisión bibliográfica sobre los antecedentes de la compactación inteligente en otros países y las reglamentaciones que se han realizado sobre esto.</p> <p>Además, se realiza una encuesta a un grupo de 15 ingenieros y 9 operarios en la ciudad de Bogotá con el fin de saber su percepción respecto a esta metodología de compactación.</p>	<p>Se obtuvo el rango de costos entre los que varían los vibradores compactadores inteligentes y del sistema tecnológico para los compactadores tradicionales.</p> <p>Además, se pudo observar que esta metodología de compactación inteligente, si bien es conocida por un porcentaje representativo de los trabajadores, no es implementada en el país debido a que no existe una reglamentación sobre el uso de esta y los costos de la maquinaria.</p>
<p>Tesis: USO DE RELLENOS FLUIDOS EN LA CONSTRUCCIÓN, (Rivera, 2008)</p>	<p>Se busca realizar una comparación de costos y tiempo del sistema de relleno de fluidos y los llenos por medio de material granular.</p>	<p>Costos, relleno fluido, mejoramiento de suelos, autocompactante, fraguado, curado, resistencia</p>	<p>Se realizó una revisión bibliográfica sobre el relleno fluido, sus aplicaciones y las experiencias en algunos países donde se ha implementado</p>	<p>Se conocieron varios antecedentes en los cuales se implementaron los rellenos fluidos, además, se observó que, si bien el precio de este sistema es más elevado respecto al</p>

	Se realizó en la Guatemala.		esta metodología.	sistema tradicional, puede reducir los tiempos considerablemente, por ejemplo, hay registros en los cuales se pudo pasar de 2.5 meses a 1.5 semanas al implementar el relleno fluido y de la importancia que tiene en reparaciones de vías con alto tránsito.
--	-----------------------------	--	-------------------	---

Fuente: Elaboración propia, 2020.

