

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil

Tesis

**Mejora de la productividad en los trabajos de
conformación y compactación de relleno de carretera,
con la aplicación de la metodología Lean Construction
en Mina Bayóvar - Perú**

Lizzeth Angelly Guerreros Vera

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Civil

Huancayo, 2020

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

ASESOR

Ph. D. Andrés Sotil Chávez

AGRADECIMIENTO

Agradecer a Dios, por regalarme la vida, la salud y las ganas de salir adelante cada día.

A mi familia, por ser una bendición más en mi vida y apoyar cada decisión y proyecto que emprendo.

A mis amigos por su presencia, apoyo y cariño.

Al Ph. D. Andrés Sotil Chávez, por ser mi asesor en esta investigación que con su experiencia y paciencia aportó a la satisfactoria culminación de la tesis.

Y para concluir, agradecer a cada ingeniero que pasó por mi etapa académica y profesional, que con sus consejos y experiencia me demostraron que la humildad y ética no se enseñan, pero su práctica distingue a los buenos profesionales.

DEDICATORIA

A mis padres, por ser mi soporte y motivación.

A Yamil y Sneyder por llegar a completar nuestras vidas.

ÍNDICE

| | |
|--------------------------------------------------------|-----------|
| Asesor | ii |
| Agradecimiento | iii |
| Dedicatoria | iv |
| Lista de tablas | viii |
| Lista de figuras | x |
| Resumen | xii |
| Abstract | xiii |
| Introducción | xiv |
| CAPÍTULO I | 16 |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 16 |
| 1.1 Planteamiento y formulación del problema | 16 |
| 1.1.1. Determinación del problema | 16 |
| 1.1.2. Formulación del problema | 18 |
| 1.2 Objetivos | 19 |
| 1.2.1. Objetivo general | 19 |
| 1.2.2. Objetivos específicos | 19 |
| 1.3 Justificación | 20 |
| 1.4 Hipótesis | 21 |
| 1.4.1. Hipótesis general | 21 |
| 1.4.2. Hipótesis específica | 21 |
| 1.5 Variables | 22 |
| 1.5.1. Variable dependiente | 22 |
| 1.5.2. Variable independiente | 22 |
| CAPÍTULO II | 23 |
| MARCO TEÓRICO | 23 |
| 2.1. Antecedentes | 23 |
| 2.2. Bases teóricas | 33 |
| 2.2.1. Antecedentes de la filosofía <i>Lean</i> | 33 |
| 2.2.2. <i>Lean Construction</i> | 35 |
| 2.2.3. Principios del <i>Lean Construction</i> | 36 |
| 2.2.4. Herramientas del <i>Lean Construction</i> | 39 |
| 2.2.5. Modelo tradicional | 42 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.6. Comparación de modelo tradicional y <i>Lean Construction</i> | 43 |
| 2.3. Definición de conceptos básicos..... | 43 |
| 2.3.1. Sectorización..... | 43 |
| 2.3.2. Trenes de trabajo | 44 |
| 2.3.3. Lote de producción | 45 |
| 2.3.4. Nivel general de actividad | 45 |
| 2.3.5. Trabajo productivo (TP)..... | 45 |
| 2.3.6. Trabajo contributorio (TC) | 45 |
| 2.3.7. Trabajo no productivo (TNP) | 46 |
| 2.3.8. Productividad..... | 46 |
| 2.3.10. Carta balance | 46 |
| 2.3.11. Planificación maestra | 49 |
| 2.3.12. Planificación <i>lookahead</i> | 49 |
| 2.3.13. Identificación de pérdidas..... | 49 |
| 2.3.14. Compactación | 50 |
| 2.3.15. Tránsito en vías construidas..... | 50 |
| 2.3.16. Camiones gigantes..... | 50 |
| 2.3.17. Diseño geométrico de vía..... | 51 |
| CAPÍTULO III..... | 52 |
| METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN | 52 |
| 3.1. Método específico..... | 52 |
| 3.2. Diseño de la investigación | 52 |
| 3.3. Población y muestra | 53 |
| 3.4. Técnicas de recolección de datos..... | 54 |
| 3.5. Instrumentos de medición | 55 |
| CAPÍTULO IV..... | 56 |
| PROCESO DE DESARROLLO | 56 |
| 4.1 Descripción de la empresa | 56 |
| 4.2 Descripción del proyecto..... | 56 |
| 4.2.1 Criterios de diseño de la vía a construir | 58 |
| 4.2.2 Proceso constructivo | 60 |
| a) Trabajos Topográficos..... | 60 |
| b) Nivelación de la subrasante | 60 |
| c) Explotación de cantera | 61 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| d) Transporte y descarga del material de relleno | 62 |
| e) Conformación y compactación de pavimento..... | 63 |
| f) Construcción de barrera protección tipo trapecio-berma lateral.... | 65 |
| g) Construcción de cunetas de drenaje | 66 |
| 4.2.3 Cronograma y presupuesto | 66 |
| CAPÍTULO V..... | 70 |
| APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA LEAN CONSTRUCTION..... | 70 |
| 5.1 Diagnóstico del estado actual | 70 |
| 5.1.1 Nivel general de la actividad..... | 70 |
| 5.1.2 Plan semanal..... | 71 |
| 5.1.3 Sectores de avance..... | 72 |
| 5.1.4 Medición de producción..... | 74 |
| 5.1.4.1 Carta balance (por minuto) | 74 |
| 5.1.4.2 Carta balance (jornada completa)..... | 79 |
| 5.2 Aplicación de la metodología <i>Lean Construction</i> | 84 |
| 5.2.1 Sectorización | 85 |
| 5.2.2 Designación del tren de trabajo | 86 |
| 5.2.3 Asignación de recursos | 87 |
| 5.2.4 Last Planner | 87 |
| 1. Planificación maestra | 87 |
| 2. Planificación <i>Lookahead</i> | 88 |
| 3. Análisis de restricciones | 90 |
| 4. Carta balance | 90 |
| 5. Programación y control semanal..... | 94 |
| 6. Porcentaje de plan cumplido (PPC) | 95 |
| 7. Control de avance por lote de producción..... | 96 |
| 5.3 Resumen de resultados | 97 |
| 5.4 Prueba de hipótesis | 102 |
| 5.5 Discusión de resultados..... | 106 |
| Conclusiones..... | 112 |
| Recomendaciones..... | 113 |
| Referencias | 114 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Comparación entre modelo tradicional y modelo aplicando Lean Construction | 43 |
| Tabla 2. Presupuesto contractual..... | 68 |
| Tabla 3. Datos para medición de tiempos para motoniveladora..... | 71 |
| Tabla 4. Datos para medición de tiempos para rodillo | 71 |
| Tabla 5. Avance por sectores (método tradicional) | 73 |
| Tabla 6. Resumen de resultados de carta balance de motoniveladora 2 - por minuto..... | 75 |
| Tabla 7. Resumen de resultados de carta balance de motoniveladora 4 - por minuto..... | 75 |
| Tabla 8. Resumen de resultados de carta balance de Rodillo 1- por minuto .. | 76 |
| Tabla 9. Resumen de resultados de carta balance de Rodillo 2 - por minuto .. | 77 |
| Tabla 10. Resumen de porcentaje de trabajos de Motoniveladora 2 con método tradicional | 81 |
| Tabla 11. Resumen de porcentaje de trabajos de Motoniveladora 4 con método tradicional | 82 |
| Tabla 12. Resumen de porcentaje de trabajos de Rodillo 1 con método tradicional | 83 |
| Tabla 13. Resumen de porcentajes de trabajos de Rodillo 2 con método tradicional | 84 |
| Tabla 14: Análisis de restricciones | 90 |
| Tabla 15. Resumen de porcentaje de trabajos de Motoniveladora 2 con metodología Lean Construction..... | 91 |
| Tabla 16. Resumen de porcentaje de trabajos de Motoniveladora 4 con metodología Lean Construction..... | 92 |
| Tabla 17. Resumen de porcentaje de trabajos de Rodillo 1 con metodología Lean Construction | 93 |
| Tabla 18. Resumen de porcentaje de trabajos de Rodillo 2 con metodología Lean Construction | 94 |
| Tabla 19. Prueba no paramétrica de Shapiro- Wilk..... | 97 |
| Tabla 20. Proceso de conformación: medidas descriptivas | 98 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 21. Proceso de compactación: medidas descriptivas | 100 |
| Tabla 22. Estadísticos de prueba | 103 |
| Tabla 23. Rendimiento: medidas descriptivas | 103 |
| Tabla 24. Estadísticos de prueba (a, b)..... | 105 |
| Tabla 25. Estadísticos de prueba (a, b)..... | 105 |
| Tabla 26. Estadísticos de prueba (a, b)..... | 105 |
| Tabla 27. Estadísticos de prueba (a, b)..... | 105 |
| Tabla 28. Estadísticos de prueba (a, b)..... | 106 |
| Tabla 29. Estadísticos de prueba (a, b)..... | 106 |
| Tabla 30: Resumen de porcentaje de tiempo productivo en conformación | 107 |
| Tabla 31: Resumen porcentaje de tiempo contributorio en conformación..... | 108 |
| Tabla 32: Resumen porcentaje de tiempo no productivo en conformación | 108 |
| Tabla 33: Resumen porcentaje de tiempo productivo en compactación | 109 |
| Tabla 34: Resumen porcentaje de tiempo contributorio en compactación | 110 |
| Tabla 35: Resumen porcentaje de tiempo no productivo en compactación ... | 110 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Sistema de producción Toyota. | 34 |
| Figura 2. Principios de Lean Construction..... | 39 |
| Figura 3. Modelo de planificación basado en construcción ajustada..... | 41 |
| Figura 4. Tren de trabajo para construcción de vías en mina..... | 44 |
| Figura 5. Formato de Carta Balance | 48 |
| Figura 6. Principales categorías de pérdidas de productividad. | 50 |
| Figura 7: Camión gigante de mina | 51 |
| Figura 8. Ciclo de mejoramiento de la productividad..... | 53 |
| Figura 9. Ubicación de la vía Carneloz II Etapa. | 57 |
| Figura 10. Planta de la vía Carneloz – II Etapa..... | 59 |
| Figura 11. Sección típica del diseño de vía..... | 59 |
| Figura 12. Detalle de barreras y cunetas. | 59 |
| Figura 13. Trazo y replanteo | 60 |
| Figura 14. Colocación de geomalla | 61 |
| Figura 15. Descarga de material en plataforma de relleno..... | 63 |
| Figura 16. Conformación de plataforma de relleno | 64 |
| Figura 17. Compactación de plataforma de relleno..... | 64 |
| Figura 18. Ensayo de densidad de campo | 65 |
| Figura 19. Construcción de bermas de seguridad..... | 66 |
| Figura 20. Apertura de cunetas con motoniveladora..... | 66 |
| Figura 21. Cronograma contractual del proyecto. | 67 |
| Figura 22. Zonas de acopio temporal de material | 69 |
| Figura 23. Plan semanal. | 72 |
| Figura 24. Sectores de avance actual (método tradicional) | 72 |
| Figura 25. Carta balance por minuto - motoniveladora 2 | 75 |
| Figura 26. Carta balance por minuto - motoniveladora 4 | 76 |
| Figura 27. Carta balance por minuto - rodillo 1 | 77 |
| Figura 28. Carta balance por minuto - rodillo 2 | 78 |
| Figura 29. Formato carta balance (jornada completa)..... | 80 |
| Figura 30. Carta balance - Método tradicional motoniveladora 2 | 81 |
| Figura 31. Carta balance - Método tradicional motoniveladora 4 | 82 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 32. Carta balance - Método tradicional rodillo 1 | 83 |
| Figura 33. Carta balance - Método tradicional rodillo 2 | 84 |
| Figura 34. Sectorización de vía | 85 |
| Figura 35. Tren de trabajo del estudio del proyecto | 87 |
| Figura 36. Plan Maestro del Proyecto. | 88 |
| Figura 37. Planificación Lookahead | 89 |
| Figura 38. Carta balance - Metodología Lean, motoniveladora 2..... | 91 |
| Figura 39. Carta balance - Metodología Lean, motoniveladora 4..... | 92 |
| Figura 40. Carta balance - Metodología Lean, rodillo 1..... | 93 |
| Figura 41. Carta balance - Metodología Lean, rodillo 2..... | 94 |
| Figura 42. Plan semanal con metodología Lean Construction | 95 |
| Figura 43. Compromisos de avance..... | 96 |
| Figura 44. Porcentaje de cumplimiento | 96 |
| Figura 45. Avance por lote de producción | 96 |
| Figura 46. Proceso de conformación: histograma de frecuencias de tiempo productivo | 98 |
| Figura 47. Proceso de conformación: histograma de frecuencias de tiempo contributorio..... | 99 |
| Figura 48. Proceso de conformación: histograma de frecuencias de tiempo no productivo | 100 |
| Figura 49. Proceso de compactación: histograma de frecuencias de tiempo productivo | 101 |
| Figura 50. Proceso de compactación: histograma de frecuencias de tiempo contributorio..... | 101 |
| Figura 51. Proceso de compactación: histograma de frecuencias de tiempo no productivo | 102 |
| Figura 52. Histograma de frecuencias de rendimiento (m ³) | 104 |

RESUMEN

Esta investigación determina la mejora de la aplicación de la metodología *Lean Construction* en el rendimiento de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar.

Se utilizó el método científico con un diseño cuasi experimental, explicativo, y aplicado, tomando como muestras dos grupos de investigación, uno representado por el empleo del método tradicional en proceso de conformación y compactación de rellenos y el otro con la intervención con la metodología de *Lean Construction* en procesos de compactación y conformación de rellenos. Se consideraron instrumentos validados como la carta balance en la recolección de la información, además de la estadística descriptiva e inferencial para la obtención de resultados.

Los resultados de la investigación determinaron que se presentan mejoras en el rendimiento en los trabajos de compactación y conformación de rellenos en carreteras de la mina Bayóvar, a través de la intervención con la metodología *Lean Construction*.

Se constató que las herramientas aplicadas permiten mejorar la distribución de los trabajos, mediante un análisis de restricciones de actividades, control permanente de avances y retroalimentación constante.

Palabras claves: *Lean Construction*, compactación, conformación, maquinaria pesada, tiempo productivo, tiempo contributorio, tiempo no productivo.

ABSTRACT

This research determines the improvement of the application of the Lean Construction methodology in the performance of the Forming and Compaction works on roads of the Bayovar mine.

The scientific method was used with a quasi-experimental, explanatory, and applied design, taking as samples two groups of research, one represented using the traditional method in processes of forming and compaction of fillers and the other with the intervention with The Lean Construction methodology in compaction and filling forming processes. Validated instruments were considered as the balance chart in the collection of information, in addition to the descriptive and inferential statistics for obtaining results.

The results of the research determined that performance improvements are presented in the compaction and conformation of fillers on roads of the Bayóvar mine, through intervention with the Lean C methodology.

It was found that the tools applied allow to improve the distribution of work, through an analysis of activity constraints, permanent control of progress and constant feedback.

Keywords: Lead Construction, compaction, forming, heavy machinery, uptime, contributory time, non-productive time.

INTRODUCCIÓN

La industria de la minería y la construcción representan un porcentaje significativo de los ingresos económicos del Perú, el mismo que según la Cámara de Comercio de Construcción (Capeco) crecerá un 3% en el 2018. (1) Por ello, estas industrias se encuentran en proceso de implementación de estándares de calidad y productividad que les permita mayor rentabilidad dentro de sus procesos; garantizando la seguridad del personal y poblaciones aledañas. Esto último son factores primordiales para calificar a la minería como sostenible, dentro de un ámbito local que busca su compromiso con la responsabilidad social y con el medio ambiente.

Las actividades de construcción civil en las operaciones mineras implican principalmente el uso de maquinaria pesada para el movimiento de tierras, siendo estos procesos altamente costosos e incidentes dentro del presupuesto, es por lo que mejorar estas técnicas implica la mejora en la rentabilidad de un proyecto de este tipo.

Es necesario reconocer dónde se encuentran las deficiencias dentro de los procesos de construcción, con la investigación se estudiarán los factores de tiempo, costo y calidad buscando mejorar la productividad de los trabajos de movimiento de tierras y por consiguiente generar mayor rentabilidad a los proyectos.

Principalmente nos enfocaremos en la aplicación de las herramientas de gestión que nos ofrece el *Lean Construction*, donde se busca localizar las pérdidas que se presentan en cada proceso, para eliminarlas y generar un trabajo fluido.

En el capítulo I se realiza el planteamiento ¿Cómo mejora la aplicación de la metodología *Lean Construction* en el tiempo productivo de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar?

En el capítulo II veremos los antecedentes a la presente investigación, donde se describen características del modelo de trabajo tradicional, la metodología *Lean Construction*, propuesta para la investigación y las herramientas que se usan para poder controlar los cambios en cada proceso.

En el capítulo III encontraremos la descripción de la metodología usada, técnicas e instrumentos y delimitación de la muestra en base a la población.

En el Capítulo IV se describe de forma detallada el proceso constructivo de la realización de las vías dentro de la Mina Miski Mayo, así como se presenta el cronograma y presupuesto contractual del proyecto.

El capítulo V presenta los primeros resultados de la observación en campo, primero se presenta los resultados de los trabajos con la metodología tradicional, y mediante la aplicación de las herramientas del *Lean Construction*, nos permite reconocer los principales aspectos de mejora para comparar los resultados antes y después de la aplicación de la metodología *Lean Construction*.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento y formulación del problema

1.1.1. Determinación del problema

Uno de los sectores económicos que ha demostrado sostenibilidad y crecimiento en el tiempo, es el sector minero, que a través de sus actividades generan grandes divisas para el país, contribuyendo enormemente en el desarrollo social de las poblaciones dentro del área de influencia del proyecto minero.

Las operaciones mineras como parte de su desarrollo están inmersas en una serie de procesos que van desde la extracción del mineral hasta la disposición del producto final para su comercialización; todos estos procesos deben de estar garantizados por el uso eficiente de recursos materiales y humanos que permitan manejarse bajo un estricto control de estándares de calidad en todas sus operaciones, entre estas el minimizar los impactos ambientales generadas como parte de las labores mineras; el garantizar la seguridad de toda la comunidad laboral cumpliendo normativas vigentes en el país como el DS N.º 024-2016 – MEN, denominado Reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería y entre otros estándares más.

En tal sentido, es vital el poder controlar, manejar y optimizar todos los procesos dentro de las operaciones mineras conservando estándares ambientales, normas de calidad y seguridad, desde la extracción del mineral hasta la disposición del producto final.

Dentro de estos procesos, las labores mineras requieren trabajos muy puntuales dentro de sus operaciones, entre ellas las relacionadas a la industria de la construcción, las cuales se ejecutan mediante obras civiles que son requeridas por la necesidad del proyecto, muchas veces estas labores son designadas a terceros (empresas formales) las cuales son responsables de ejecutar dicha labor sin que estas dejen de lado las políticas de calidad y eficiencia en todos los aspectos las cuales siempre están controladas y monitoreadas por las compañías mineras.

Las obras civiles en minería requieren obtener la mejora continua de los procesos constructivos, permitiendo que se lleven a cabo en menor tiempo, con mayores ganancias y cuidando la seguridad de los trabajadores; lo que implica alcanzar un mejor rendimiento en todas las actividades realizadas dentro de las obras civiles; sin embargo, existen muchos factores que condicionan que el rendimiento esperado no sea el planificado, como por ejemplo: la falta de optimización de procesos, el inadecuado control del tiempo de operaciones en maquinarias, la falta de un control exhaustivo y planificado de la distribución de labores en maquinarias, etc.

Se han considerado muchos aspectos que permitan alcanzar o hacer viables mejoras en los procesos constructivos a través del uso de metodologías innovadoras como lo es la metodología denominada *Lean Construction*, que emplea herramientas de gestión para el control de indicadores como: calidad del proceso, producción, costos adecuados, tiempos estándares, eficiencia, innovación, nuevos métodos de trabajo, tecnología, etc.

Si bien esta metodología no es reciente en nuestro país, pues se conoce y utiliza en diversos procesos constructivos (excavaciones manuales, encofrado, muros de albañilería y demás), es necesario manejarlo en cada punto de la

construcción, con el fin de obtener todos los beneficios que ofrece para optimizar el trabajo y generar mayores ingresos como resultado de este.

Para la actividad minera y de construcción, el movimiento de tierras tiene significancia en el costo de los proyectos, y buscar optimizar tiempos, recursos, innovando la eficiencia y procesos, afectaría directamente a la rentabilidad del proyecto, permitiendo mayor ganancia. Es por eso, que la construcción de los caminos mineros debe realizarse lo más rápido posible, con la mejor calidad, garantizando su resistencia y durabilidad.

El proceso de construcción de caminos para tránsito de camiones gigantes es distinto al que se conoce para vías nacionales o caminos de tránsito común. Su principal característica es el peso que debe soportar, peso propio de los camiones gigantes, así como el peso de los camiones cargados con mineral. Se considera también que los caminos dentro de mina, y específicamente en la minera Miski Mayo (Bayóvar, Piura), varían de acuerdo al planeamiento y zonas de explotación del mineral, por lo que se debe contemplar realizar caminos resistentes, durables y de bajo costo, pues las rutas de tránsito son variables en el tiempo.

La estructura de las vías internas de la mina Miski Mayo (Bayóvar, Piura), según los diseños preliminares pueden contar con rellenos de hasta 1.20 metros de espesor, lo que requiere realizar los trabajos de relleno en capas, para mejorar y asegurar la compactación del material. Es así, que los trabajos de conformación y compactación de estas vías se convierten en las actividades principales de la ruta crítica del proceso de relleno de material para carretera y en esta tesis se propone mejorar este proceso con la aplicación de la metodología *Lean Construction*.

1.1.2. Formulación del problema

En base a la situación manifestada del proceso constructivo de la carretera para la minera Miski Mayo, se plantea la siguiente interrogante como problema central del trabajo de investigación:

A) Problema general

¿Cómo mejora la aplicación de la metodología *Lean Construction*, en el rendimiento de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar?

B) Problemas específicos

Como problemas específicos se plantean los siguientes:

- ¿Cómo mejora la aplicación de la metodología *Lean Construction*, el tiempo productivo de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar?
- ¿Cómo mejora la aplicación de la metodología *Lean Construction*, el tiempo contributorio de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar?
- ¿Cómo disminuye la aplicación de la metodología *Lean Construction* en el tiempo no productivo de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar?

1.2 Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Ante la problemática presentada se plantea el objetivo principal del trabajo de investigación:

- Determinar la mejora del rendimiento de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar con la aplicación de la metodología *Lean Construction*.

1.2.2. Objetivos específicos

Así mismo se procederá a plantear los objetivos específicos, teniendo en cuenta las dimensiones de nuestra variable:

- Determinar la mejora del tiempo productivo de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar con la aplicación de la metodología *Lean Construction*.

- Determinar la mejora del tiempo contributorio de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar con la aplicación de la metodología *Lean Construction*.
- Determinar la disminución del tiempo no productivo de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar con la aplicación de la metodología *Lean Construction*.

1.3 Justificación

La implementación de mejoras en los procesos constructivos dentro de las labores de obras civiles en proyectos mineros hace de la metodología denominada *Lean Construction* una alternativa viable, adecuada y capaz de ser implementada debido a que permite controlar la variabilidad en todos los procesos de producción que en este caso en particular debido al alcance de la presente investigación se centrará en los trabajos de movimientos de tierras, específicamente en lo referente a la conformación y compactación de relleno en la construcción de carreteras de la mina Bayóvar.

Los procesos constructivos relacionados a la conformación y compactación de relleno de carreteras en la mina Bayóvar siguen procedimientos establecidos bajo un protocolo de ejecución que obedecen a lineamientos tradicionales donde los controles de calidad en la producción no son lo suficientemente eficientes, los cuales juegan un papel importante en los resultados obtenidos para los rendimientos de cada uno de estos procesos.

El uso eficiente de maquinarias pesadas constituye uno de los factores que influyen directamente en la productividad en los trabajos de movimiento de tierras, incluso se podría considerar como un factor crítico y relevante en los resultados que se esperan en la producción dentro del planeamiento en el desarrollo del proyecto minero; en tal sentido, controlar eficientemente este factor permitirá mejorar la productividad y por consiguiente incrementar el rendimiento esperado de las labores de movimientos de tierras.

Teniendo en cuenta el control eficiente de las maquinarias pesadas traducidas al control de los tiempos productivos, tiempos contributorios y tiempos no

productivos de manera adecuada y sostenida durante la ejecución de las labores en campo y una adecuada interpretación en gabinete permitirá hacer mejor uso de los tiempos destinados a optimizar la calidad de los resultados, las cuales permitirán una mejora en el rendimiento de las labores de compactación y conformación de rellenos de carreteras en la mina Bayóvar.

Dentro de la simplificación de procesos es necesario tener en cuenta que no se deben descuidar los estándares mínimos de calidad del producto y seguridad al ejecutar los trabajos (con las personas, medio ambiente y propiedad privada), pues la conformidad del proyecto será procurada por el cliente final, quien contempla dentro de sus estándares mínimos cumplir con los objetivos de cero accidentes en base a la prevención y capacitación permanente, el mismo que se encuentra descrito en el Sistema de Gestión de Seguridad, Salud y Medio Ambiente – CMMM.

1.4 Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

Se plantea la siguiente hipótesis que en el transcurso de la investigación será afirmada o negada según la información estudiada:

- La aplicación de la metodología *Lean Construction* mejora el rendimiento de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar.

1.4.2. Hipótesis específica

De la misma manera se obtiene las hipótesis específicas, teniendo en consideración, para esto, las dimensiones de la variable estudiada:

- La aplicación de la metodología *Lean Construction* mejora el tiempo productivo de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar.
- La aplicación de la metodología *Lean Construction* mejora el tiempo contributorio de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar.

- La aplicación de la metodología *Lean Construction* disminuye en el tiempo no productivo de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar.

1.5 Variables

1.5.1. Variable dependiente

Teniendo en cuenta el alcance de la presente investigación se determina como variable dependiente al rendimiento de la conformación y compactación del relleno en caminos mineros de la mina Bayóvar, el cual deberá ser cuantificado en un valor numérico representado por la relación $m^3/día$ que para el proceso representará el volumen ejecutado por cada día de labor.

Del mismo modo se considera realizar la investigación con datos obtenidos en campo de dos muestras distintas, la primera de ellas denominada tradicional que estará representada por datos determinados mediante el empleo de protocolos tradicionales en los procesos constructivos de conformación y compactación; la segunda muestra estará representada por datos obtenidos de la intervención en los procesos constructivos de conformación y compactación con la metodología *Lean Construction*.

1.5.2. Variable independiente

Se presenta como variables independientes a los tiempos productivos (TP), tiempo no productivo (TNP) y tiempo contributorio (TC), mediante ellos se medirá la variación de estos y cómo influye en la mejora del rendimiento.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Teniendo en cuenta una indagación bibliográfica sobre el tema de investigación no se ha encontrado un estudio idéntico que sirva de referente de partida o continuidad para ser empleada en la presente investigación.

Sin embargo, se pueden evidenciar algunos trabajos afines muy relacionados al tema de estudio, que por lo revisado se puede señalar que en muchas partes del mundo se está empleando la metodología *Lean Construction* para realizar mejoras en diversos procesos relacionados a obras civiles, estos referentes afianzan conocimientos muy importantes que motivan a realizar investigaciones sobre el tema.

A continuación, se realiza una descripción detallada de los antecedentes considerados adecuados presentarlos como referentes para la presente investigación.

En la obra “Productividad en la construcción de un condominio aplicando conceptos de la filosofía *Lean Construction*”, (2) se tiene como resultados:

1. En toda actividad de vaciado, bajo la modalidad de concreto preparado en obra con una planta y transportado mediante grúa se tiene un inherente tiempo

de espera, el cual tiene como cuello de botella la capacidad del balde donde se transporta el material. Sin embargo, los niveles de productividad y eficiencia muestran un preocupante desbalance en los tiempos, donde el personal se encuentra en espera del chute, y el tiempo que dura el vaciado.

2. Habría que hacer una ponderación de los tiempos que dura el vaciado bajo las condiciones actuales, y el costo que implica un vaciado con concreto premezclado, este alcance no está cubierto en la presente tesis.
3. La cuadrilla no está balanceada.
4. Propuestas de mejora

Debido al excesivo tiempo de “espera” se recomienda cualquiera de los siguientes caminos:

- Realizar un estudio para un procedimiento alternativo de suministro de concreto.
 - Incrementar la capacidad del balde como medio de transporte para incrementar la producción en los mismos lapsos de tiempo. Actualmente el balde solo pesa 200 kg, el concreto que transporta pesa 720 kg y la capacidad máxima de la grúa en la punta es de 1000 kg, por lo tanto, aumentar el tamaño del balde no es la solución. La solución sugerida es fabricar un balde de menor peso para así poder transportar más concreto en cada viaje.
5. Se considera posible, prescindir de una persona dentro de la cuadrilla, pues en muchos casos se observó a cuatro o incluso cinco personas dirigiendo el balde, este trabajo puede incluso llegar a hacerlo una persona (como se muestra en las fotos). Se repartirá las labores entre el resto de la cuadrilla. (2) (p.86)

La investigación titulada “Propuesta de metodología para la implementación de la filosofía *Lean* (Construcción Esbelta) en proyectos de construcción”, (3) tiene las siguientes conclusiones:

1. La implementación y aplicación de la Filosofía Lean al proyecto de construcción arrojó resultados favorables en cuanto a la gestión administrativa, proceso de planeación y ejecución del proyecto, se evidenció

una reducción considerable en las pérdidas generadas durante el proceso constructivo y por consiguiente una mejora en la productividad. Lo anterior se dio gracias al compromiso de la gerencia y de las partes interesadas en el proyecto, a la aplicación de la metodología y al avance del mejoramiento continuo en los procesos; resultado de la planeación realizada en las reuniones programadas semanalmente.

2. Las empresas de construcción que busquen el mejoramiento en la productividad de los proyectos que se llevan a cabo, deben empezar por capacitar y comprometer al personal asignado en la planeación y ejecución de los proyectos en temas de gestión administrativa. De esta forma se facilitará la aplicación de estos principios adecuadamente, en el proyecto objeto de la implementación de la metodología *Lean* se evidenció que las personas capacitadas y con un alto grado de compromiso en el mejoramiento continuo aportaron sugerencias para encontrar soluciones en sus procesos enfocándose en la productividad y reducción de pérdidas en el proceso constructivo.
3. Los recursos utilizados en el desarrollo del proyecto de construcción como materiales, herramientas, maquinaria y equipos deben ser prioridad en el proceso de planeación, teniendo en cuenta que la ausencia de estos en la obra ocasiona aproximadamente el 60% de los tiempos no contributivos y aumenta los tiempos colaborativos, teniendo como resultado un factor negativo que afecta la productividad.
4. Dentro del proceso de planeación se debe realizar la programación de recursos necesarios tanto semanal como general, con el fin de garantizar la disponibilidad de estos durante la ejecución de los proyectos y evitar retrasos que vayan en detrimento de la productividad, es indispensable que se establezcan los compromisos con los proveedores de estos recursos y así obtener confiabilidad en la total disponibilidad de las cantidades solicitadas en el tiempo requerido y programado. Los retrasos que se dieron en el proyecto objeto de la aplicación de la metodología se generaron por la no disponibilidad de algunos materiales, herramientas y equipos que se hacían absolutamente indispensables en momentos determinados. La selección de los proveedores se debe realizar en forma detallada y precisa teniendo en cuenta variables como tiempo de entrega, disponibilidad de los recursos, etc., y no centrandose

la atención tan solo en el valor que ellos ofrezcan ya que está sola variable no garantiza la certeza de contar con los recursos según los parámetros necesarios para que se beneficie la productividad en el proyecto. (3) (p. 86)

La aplicación del método de productividad ha sido beneficioso al proyecto de estudio, ya que esta herramienta ha permitido elevar la productividad de los equipos, en función a la disminución del tiempo de las operaciones. Este método se aplica de manera iterativa con el fin de que las mejoras sean continuas y se logre eliminar o disminuir al máximo los tiempos muertos de las operaciones. (4)

1. La conclusión principal de esta tesis es que la aplicación del método de productividad ha sido beneficioso al proyecto de estudio, ya que esta herramienta ha permitido elevar la productividad de los equipos, en función a la disminución del tiempo de las operaciones. Este método se aplica de manera iterativa con el fin de que las mejoras sean continuas y se logre eliminar o disminuir al máximo los tiempos muertos de las operaciones.
2. El ejemplo práctico de la tesis consiste en cuatro grandes fases que son: perforación, voladura, carguío y transporte. A pesar de que solo se analizaron el carguío y el transporte, es necesario precisar que las fases anteriores a estas tienen una gran influencia en el rendimiento de la operación, debido a que, si la granulometría del material volado no es la adecuada, las fases de carguío y transporte van a necesitar de una mayor cantidad de tiempo.
3. En el trabajo de movimiento de tierras, los recursos determinantes son los equipos que se utilizan, por lo que hubo que adecuar un método que permita medir la productividad de la operación en función de estos. El método aplicado se basa en la medición de las operaciones de los equipos, divididas en fases que tienen como parámetro el tiempo en minutos. Este método puede ser aplicado a cualquier proyecto que tenga una partida de movimiento de tierras que incluya carguío y transporte de cualquier tipo de material.
4. Es necesario precisar que el ciclo completo de la operación es el que comprende al movimiento de los camiones ya que estos están involucrados en todas las fases de la operación en general, que son carguío, acarreo, espera para descarga, descarga, retorno, y espera para carguío, por lo que como dato inicial para este análisis era necesario analizar la operación de los

equipos de carguío únicamente. Los equipos de carguío en este ejemplo son la pala hidráulica y el cargador frontal. La operación de los equipos de carguío se dividió en las siguientes fases: carguío, maniobra de descarga, descarga, y maniobra de carguío.

5. En el ejemplo práctico, el análisis de los factores que afectan directamente el movimiento de los equipos fue determinante ya que nos proporcionó la información necesaria para poder contrarrestarlos, debido a que estos afectaban las fases de mayor tiempo como son el acarreo y el retorno; entre estos factores tenemos como los más importantes la resistencia al rodamiento y la resistencia a la pendiente. (4) (p. 264)

En la obra titulada “Planeación e implementación de la filosofía *Lean Construction* en base al estudio de pérdidas y aplicación del sistema *Planner* en un proyecto constructivo de la empresa Marval S. A.”, (5) se concluye:

1. La implementación de un nuevo sistema de gestión de calidad en el sector constructivo a partir de la filosofía *Lean Construction* requiere un cambio de pensamiento por parte de los integrantes de las organizaciones implicadas en el proceso. Realizar capacitaciones y reuniones de inducción como proceso de formación para la ejecución del nuevo sistema son el inicio de los cambios que se pueden gestionar para implementar con éxito el desarrollo de la metodología.
2. El análisis de pérdidas en los procesos constructivos permite a los proyectos de construcción de la empresa Marval S.A. controlar actividades que no generan valor a partir de tiempo no contributivo representado en procesos, esperas por falta de material, desplazamientos, descansos, entre otros. Esto a su vez permite aumentar el avance de los procesos constructivos a partir de la evaluación de los factores que afectan el bajo rendimiento o baja productividad de estos que permite gestionar planes de mejoramiento para disminuir las pérdidas en cuanto a mano de obra, materiales y maquinarias del proyecto para las diferentes actividades estudiadas.
3. El enfoque de la metodología *Lean Construction* sigue unos parámetros o metodología a implementar para lograr cambios positivos en el sector de la construcción, sin embargo, es importante destacar que el objetivo final de la

ejecución de la investigación a partir de la nueva filosofía debe centrarse en lograr satisfacer los requerimientos del cliente y superar las expectativas acerca del producto que se está ofreciendo (apartamentos) con el aumento de la productividad de las actividades del sector.

4. El sistema de planificación de actividades semanales, conocido con el último planificador (*Last Planner*) permite controlar las actividades realizadas por los contratistas de la obra Callejuelas y gestiona el avance de los diferentes procesos constructivos a partir de la calificación semanal mediante el porcentaje de asignaciones completadas (PAC): gracias a estas acciones se puede realizar un seguimiento a las actividades internas de la obra, reducir los tiempos de ciclo en los procesos constructivos y evitar atrasos considerables en la planificación a largo plazo *Work-Flow* del proyecto. (5) (p. 191)

En el proyecto de tesis titulado “Aplicación de la filosofía *Lean Construction* en la planificación, programación, ejecución y control de proyectos”, (6) tienen como resultado:

1. El LPDS (sistema de entrega de proyectos lean) nos propone un total de 42 herramientas en sus cinco fases. Sin embargo, la filosofía *Lean* en el Perú se está desarrollando principalmente en tres fases (Construcción Lean, Control de producción y trabajo estructurado), ya que son las empresas constructoras las que la están aplicando dentro de su campo de acción que es precisamente la ejecución de obras. En el presente proyecto se utilizaron 9 de las 17 herramientas disponibles para las tres fases mencionadas, siendo de estas las de más importancia e impacto en el desarrollo del proyecto el *last planner system* (cinco herramientas) en el control de producción y los *first run studies* en la ejecución lean.
2. De los beneficios observados de cada herramienta Lean se puede concluir que la sectorización y los trenes de trabajo son dos de las herramientas más sencillas de aplicar y que a su vez son las que más aportan en cuanto a mejoras del proyecto con respecto a la visión tradicional. Estas herramientas replantean totalmente la manera de trabajar pasando de un sistema *push* a un sistema *pull*, acortan tiempos de ejecución de los proyectos gracias a la superposición de actividades y brindan mejoras en la productividad debido a

que se designan cuadrillas específicas para cada tipo de trabajo. Mencionado estos puntos es normal que el uso de estas herramientas se haya divulgado mucho más que otras herramientas más complejas de la filosofía *Lean* dadas las mejoras que representan.

3. Se puede concluir que la aplicación de las herramientas *Lean* en un proyecto de construcción, en especial de edificaciones, tiene muy buenos resultados en el desarrollo del proyecto, tanto en la productividad como en el plazo y costo. Sin embargo, se deben utilizar las herramientas de manera constante para que las mejoras que estas representan se vean reflejadas en nuestro proyecto.
4. El uso de la sectorización y los trenes de trabajo en el proyecto hizo posible que se tenga una curva de aprendizaje en las partidas más incidentes del proyecto (concreto, encofrado y tarrajeo) reduciendo los tiempos de ejecución de las actividades hasta en un 40% (tarrajeo) con respecto a los rendimientos iniciales, es decir se incrementó hasta en un 40% la producción diaria de la cuadrilla debido al porcentaje de aprendizaje obtenido que para el caso de esa partida fue de 88%.
5. El uso del *Last Planner System* nos permite reducir considerablemente los efectos de la variabilidad sobre nuestros proyectos; en nuestro caso, aplicando todos los niveles de planificación y programación que contiene el *last planner* se logró cumplir con el plazo establecido para terminar la etapa de casco de la obra (9 de julio de 2012), esto debido a que se cumplían en gran medida las programaciones semanales que eran desprendidas del *lookahead* de obra llegando a obtener un nivel de cumplimiento de la programación del 75% lo cual está por encima del estándar en los proyectos de edificaciones de la capital peruana. Sin embargo, no hubiese sido posible poder cumplir con las programaciones sin trabajar para mejorar los problemas de la obra y es ahí donde radica la importancia de las causas de incumplimiento y las acciones correctivas, ya que nos alertaron de los problemas más comunes en la obra para darle un énfasis especial y estar preparados.
6. Los resultados obtenidos en las mediciones de productividad realizadas en la etapa de casco de la obra "Barranco 360°" (Trabajo productivo = 40%, Trabajo contributorio = 41% y Trabajo no contributorio = 19%) están por encima de los

resultados promedio obtenidos en mediciones de las obras de Lima en los años 2001 (TP = 28%, TC = 36% y TNC = 36%) y 2006 (TP = 32%, TC = 43% y TNC = 25%); esto nos da un punto de referencia respecto a la importancia de la aplicación de la filosofía *Lean* para mejorar la productividad en las obras de construcción y en especial las de edificaciones, ya que es en este tipo de proyectos en los cuales la mano de obra tiene mayor incidencia en cuanto al costo del proyecto. Sin embargo, si nos comparamos con los resultados que muestra Virgilio Ghio de mediciones realizadas en Chile en el 2001 (TP = 47%, TC = 28% y TNC = 25%) se puede apreciar que aún queda una brecha grande por mejorar, la cual se logrará reduciendo las pérdidas de los procesos de construcción. (7)

7. En las mediciones de cartas de balance realizadas para las actividades de vaciado de concreto y encofrado de elementos horizontales (vigas) se pudo apreciar que se tenían cuadrillas sobredimensionadas en ambos casos y que el mismo trabajo podía ser realizado con una cantidad menor de personas incrementando de esa manera los rendimientos de dichas partidas y generando un ahorro para la obra. Es necesario realizar las mediciones de cartas de balance, puesto que, a pesar de realizar un dimensionamiento de cuadrillas previo al inicio de los trabajos, este cálculo es teórico y está en base a los rendimientos presupuestados o proyectados para el proyecto, pero no sabemos con certeza si son los rendimientos óptimos, además las condiciones en campo siempre son distintas y por lo tanto también se debería hacer un análisis en campo para replantear la cuadrilla en una etapa temprana del proyecto.
8. Se optimizaron los procesos analizados mediante las cartas de balance reduciendo la cuadrilla de 7 a 6 personas para el caso de vaciado de concreto, ya que se observó que la cantidad de TNC era muy elevada en los ayudantes de la cuadrilla. Para la cuadrilla de encofrado de vigas se pudo reducir de 8 a 7 personas, esto debido a que se tenía una pareja que se estaba dedicando, íntegramente, a desencofrar y transportar material y se observó que el trabajo de desencofrado podía ser realizado por una persona dedicada a dicha labor y los ayudantes podían apoyar el transporte en sus tiempos muertos. Estos ajustes de cuadrillas representan un ahorro económico del 13% en el costo de mano de obra de las cuadrillas en mención, si eso se realizara para todas las

partidas del proyecto podría obtenerse un ahorro de aproximadamente 10% del costo total de la mano de obra.

9. Como conclusión general se puede decir que la aplicación de las 9 herramientas *Lean* en el proyecto “Barranco 360°” ha generado ahorro debido al incremento de la productividad, al cumplimiento de los plazos establecidos y a la reducción de los principales tipos de desperdicios mencionados en la parte teórica. Habría que preguntarse en este punto, a qué nivel se hubiese llegado utilizando más herramientas. (7) (p. 111)

En el proyecto titulado: “Diagnóstico y evaluación de los niveles de productividad en la construcción mediante la filosofía *Lean Construction* en la ciudad de Tacna” (8) llega a la conclusión:

1. La ciudad de Tacna cuenta con un nivel de 41% de trabajo productivo, 34% de trabajo contributivo y 25% de trabajo no contributivo como resultado de la aplicación de la herramienta Carta Balance, encuestas y entrevistas de apoyo con un margen de error menor al 5% resultando en el rango de 36% hasta 46% para trabajo productivo; en base a esto, se afirma que se tiene un sector de construcción de infraestructura educativa con pérdida superficial y alta presencia de pérdida interna. Por lo tanto, a pesar de superar los porcentajes dados por otros autores para la situación de la capital de nuestro país, los niveles de productividad a los cuales apunta la filosofía *Lean Construction* todavía no son alcanzables debido a las particularidades de la actualidad del sector en la ciudad de Tacna, una de ellas es estar ubicada geográficamente en zona de frontera con Chile, país donde la filosofía *Lean Construction* lleva muchos años de uso desde su implementación y trabajando a niveles de producción donde es muy difícil encontrar las pérdidas internas y donde las pérdidas superficiales son rápidamente identificadas para luego ser eliminadas manteniendo una performance adecuada y, sin embargo, no se tiene la misma realidad a modo de comparación.
2. El trabajo contributivo y no contributivo suma en total 59% dentro del rango de 54% y 64% además con la ayuda de las encuestas y entrevistas de apoyo el rango se ajusta entre 59% y 64%, siendo mayor que el trabajo productivo y, por lo tanto, la pérdida superficial e interna en la mayoría de los procesos

de construcción. Con la ayuda de los diagramas de Pareto visualizados en los informes de las cartas balance se ha podido apreciar cuáles actividades son parte de ese 20% de las causas que generan el 80% de los efectos; entre ellos tenemos para el trabajo contributivo de la partida de acero al transporte de material, mediciones y nivelaciones, para la partida de encofrado similar con la adición de comunicación e inspección de sus actividades y para la partida de concreto al transporte de material más el uso de la maquinaria de mezclado y vibrado, por lo tanto el transporte de material es predominante en todas las partidas con la suma de particularidades como las mediciones de la separación de los estribos, coordinaciones para colocar los paneles y los accesorios del encofrado y el uso de las máquinas para vaciar el concreto. En el caso del trabajo no contributivo, para la partida de acero se tiene esperas, trabajo rehecho y tiempo ocioso, para la partida de encofrado proliferan las esperas más viajes improductivos y para la partida de concreto se encuentran esencialmente esperas; en consecuencia, lo más significativo dentro de este tipo de trabajo son las esperas, el trabajo rehecho y los viajes improductivos; como lo es volver a colocar el estribo por tener una separación incorrecta, esperar a que los puntales lleguen al lugar donde se está encofrando y que los obreros que operan las carretillas no puedan seguir su circuito de manera constante por esperar el tiempo de mezclado, por lo que finalmente todas estas actividades son las que llevan a un bajo porcentaje de trabajo productivo.

3. En el marco de un sector construcción de infraestructura educativa con una cantidad importante de pérdidas se ha propuesto un modelo de mejora de la productividad con el propósito de tener mejora continua, el cual está basado en la filosofía *Lean Construction* tomando las variables asignadas como etapas de implementación para aumentar el nivel de productividad obtenido. Estas tres etapas están enmarcadas dentro del círculo de *Deming*; la primera que busca producir procesos eficientes está definida por la aplicación de herramientas que permitan un mejor análisis de la productividad como la masificación de la aplicación de la Carta Balance; la segunda etapa que tiene como fin conseguir flujos eficientes mediante la industrialización del sector con la dotación a profundidad de lotes de producción y lotes de transferencia con la ayuda de la sectorización y tren de actividades y, por último, la tercera etapa

donde se menciona al buque insignia de la filosofía *Lean Construction*, el *Last Planner System*, para reducir la variabilidad mediante el análisis de las restricciones adicionando la ayuda del mapeo de la cadena de valor; en las últimas dos etapas la colaboración de los modelos BIM con su detección de interferencias y otras consideraciones del IPD como lo son los contratos relacionales, mejora los flujos haciéndolos eficientes y que no paren. Como la mejora continua es iterativa todo lo antes mencionado debe de pasar por controles visuales para realizar el “hacer” dentro del PDCA, revisando y actuando todas las veces que sean necesarias. (8) (p. 118)

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Antecedentes de la filosofía *Lean*

Sakichi Toyoda, fundador del grupo empresarial Toyota, inventó el concepto de *Jidoka* a comienzos del siglo XX mediante la incorporación de un dispositivo en su telar automático que paraba el funcionamiento de este cada vez que un hilo se rompía. Esto permitió grandes mejoras a la hora de garantizar la calidad y permitió liberar a los trabajadores para que pudieran dedicar más tiempo a tareas que realmente añadían valor, en lugar de simplemente estar controlando las máquinas y la calidad. Eventualmente, este simple concepto encontró su camino en cada máquina, cada línea de producción y cada operación de Toyota. Este concepto japonés significa proveer a las máquinas y a los trabajadores la habilidad de detectar cuándo ocurre una condición fuera de lo normal e inmediatamente parar el trabajo para identificar la causa raíz. (9)

El Sistema de Producción Toyota (ver Figura 1) o *Toyota Production System* (TPS) es un sistema de producción y gestión integral cuyas ideas básicas son: la eliminación de inventarios y pérdidas, producir pequeñas cantidades de muchos modelos de productos, reducir o simplificar su estructura de producción, utilización de máquinas semiautomáticas, cooperación entre los proveedores, el respeto por el trabajador, entre otras técnicas. El TPS tiene como pilares fundamentales al JIT (*Just in Time* o Justo a Tiempo) y *Jidoka* (Calidad en la Propia Fase). El *Just in Time* (JIT) es un sistema de producción que fabrica y entrega justo lo que se necesita, cuándo se necesita y en la cantidad que se necesita. Kiichiro Toyoda, hijo de Sakichi Toyoda desarrolló este concepto en la

década de los 30, siendo él quien decretara que las operaciones de Toyota no deberían tener exceso de inventario y que Toyota debería esforzarse en trabajar en colaboración con los proveedores para nivelar la producción. Bajo el liderazgo del ingeniero Taiichi Ohno, el JIT se desarrolló dentro de un único sistema de flujo de información y materiales para controlar la sobreproducción. (9)



Figura 1. Sistema de producción Toyota. Tomada de Implementación de Sistema Last Planner en una habilitación Urbana

Bajo la dirección de consultores americanos Deming, Juran y Feigenbaum, se implementaron aspectos de calidad en la industria japonesa, en paralelo al Sistema de Producción Toyota. La filosofía de calidad fue desarrollada y basada en un método estadístico de garantía de calidad, fue un acercamiento más amplio que los aplicados hasta el momento, incluyendo ciclos de calidad y otras herramientas, para su desarrollo en las empresas.

Todas estas ideas comienzan a ser difundidas en Europa y Norteamérica aproximadamente en 1975 con el cambio de mentalidad de la industria

automotriz. Durante los años de 1980 en adelante, una serie de textos fueron publicados para explicar y analizar el acercamiento hacia la nueva filosofía en forma más detallada. (10) (11) (12)

Además, el Sistema de Producción Toyota ha servido de base para la elaboración de las Cadenas Críticas, Teoría de las Restricciones y mejoramiento continuo, propuestos por el físico israelí Eliyahu Goldratt, en sus libros *La Meta*, *Teoría de las Restricciones*, *Las Cadenas Críticas* y *No Fue la Suerte* (2° parte de *La Meta*), que han revolucionado la administración de negocios y se extendió a la construcción. Paralelo a la propuesta de Goldratt se crea una nueva filosofía de planificación de proyectos, que nace a comienzos de los años '90 en Finlandia, teniendo como modelo el Sistema de Producción Toyota, donde Lauri Koskela sistematiza los conceptos más avanzados de la administración moderna (Benchmarking, Mejoramiento Continuo, Justo a Tiempo), que, junto con la ingeniería de métodos reformula los conceptos tradicionales de planificar y controlar obras. (13) (p. 27)

El término *Lean* (en inglés) se traduce como “sin pérdidas”. Fue acuñado en 1990 a la manufactura por un grupo de investigadores como “*Lean Manufacturing*” o “*Lean Production*”, cuando luego de sus estudios comprobaron la enorme eficacia del Sistema de Producción.

El uso del término *Lean* obedece al hecho de que este sistema utiliza menos de todo comparado con la producción en masa: la mitad de esfuerzo humano en la fábrica, la mitad de espacio en la fabricación, la mitad de inversión en herramientas, la mitad de las horas de ingeniería para desarrollar un nuevo producto en la mitad de tiempo. Además, requiere mantener mucho menos de la mitad del inventario necesario en el sitio, dando lugar a muchos menos defectos y produce una mayor e incluso creciente variedad de productos. (14)

2.2.2. *Lean Construction*

Para el *Lean Construction Institute* (ILC), el *Lean Construction* es la forma de ordenar las formas en producción con el objetivo de eliminar o minimizar las pérdidas en los recursos para construir un proyecto a fin de generar el máximo

valor posible para los clientes teniendo como principal objetivo disminuir los desperdicios (en tiempo o recursos) para generar mayor margen de utilidad o ganancia.

2.2.3. Principios del *Lean Construction*

Dentro de la filosofía *Lean Construction* se plantean 11 principios que lideran el pensamiento para cumplir los objetivos, los cuales son (13):

A. Reducir la parte de las actividades que no agregan valor

Se identifican las actividades que no agregan valor y se trata de reducirlas y, en el mejor de los casos, eliminarlas para generarle ganancias al proyecto, ya sea en costo y/o tiempo. Por lo tanto, identificar estas actividades es primordial para reducir las pérdidas.

B. Incrementar el valor del producto a través de la consideración de las necesidades del cliente

Los beneficios obtenidos de eliminar las pérdidas en general deben enfocarse en incrementar el valor del producto para el cliente final. Esto se puede lograr poniéndose en perspectiva del cliente y haciendo que el producto iguale y, en el mejor de los casos, supere las expectativas que estos tienen sobre el producto.

C. Reducir la variabilidad

La variabilidad afecta negativamente todos los ámbitos de la producción y también es algo negativo para el cliente, por lo cual es importante la reducción de la variabilidad para evitar problemas con las programaciones y la satisfacción del cliente.

D. Reducir el tiempo de los ciclos

El tiempo que dura un ciclo de producción se puede reducir con la teoría de lotes de producción y lotes de transferencia, la cual dice que si se divide la producción (lote de producción) en lotes pequeños (lotes de transferencia) que se van transfiriendo de proceso a proceso, el ciclo tendrá una duración menor que si se introduce todo el lote a un proceso y se espera a que todo el paquete esté listo para llevarlo al siguiente proceso o actividad. (6)

E. Simplificar mediante la reducción del número de pasos, partes y relaciones

La simplificación de procesos consiste en mejorar el flujo por medio de la reducción de los procesos involucrados para, de ese modo, controlar mejor estos procesos y reducir la variabilidad y el costo de realización de cada proceso.

F. Incrementar la flexibilidad de las salidas (producto terminado)

La transparencia es un estímulo muy importante para todos (subcontratistas, proveedores de primer nivel, ensambladores, distribuidores, consumidores y empleados) ya que al tener acceso a más información resulta más fácil descubrir mejores metodologías para la creación de valor. Además, se produce un *feedback* (retroalimentación) casi instantáneo y altamente positivo para los empleados que hacen mejoras, un rasgo clave del trabajo *Lean* y un estímulo poderoso para seguir haciendo esfuerzos por mejorar.

La descentralización en la toma de decisiones a través de la transparencia y la potenciación de habilidades significa proporcionar a los participantes del proyecto información sobre el estado de los sistemas de producción, dándoles el poder de tomar acción.

G. Incrementar la transparencia de los procesos

Concepto que se relaciona a la mejora del control visual de la producción, la calidad y la organización del lugar del trabajo. Por ejemplo: Aumentar la transparencia significa retirar los obstáculos del camino, dejando informaciones visibles, utilizando las herramientas y controles visuales en la obra y el programa de las 5 S. Dicho programa toma su nombre de cinco palabras japonesas: Seiri (diferenciar entre los elementos necesarios y los innecesarios para vivir o trabajar, descartando los innecesarios), Seiton (orden), Seiso (limpieza permanente), Seiketsu (pulcritud, y practicar continuamente los tres pasos anteriores) y Shitsuke (autodisciplina y formar el hábito de comprometerse con las "5 S").

H. Focalizar el control en los procesos globales o completos.

Conocer el proceso en su totalidad para hacer posible el reconocimiento de los resultados globales de la empresa y probar soluciones mucho más eficaces. Por ejemplo: supervisar el desempeño de las cédulas de producción en las diferentes fases de la construcción.

I. Introducir la mejora continua en los procesos

Estar abierto a recibir o a buscar información relevante para agregar el valor al proceso. Por ejemplo: realizar capacitación en obra, introducir nuevos equipamientos y motivar a los trabajadores para sugerir mejoras al proceso.

J. Mantener el equilibrio entre mejoras en los flujos y en las conversiones

Observar los procesos y analizar lo que se puede mejorar, tanto en relación con los flujos cuanto a las conversiones. Por ejemplo: una forma de equilibrar la mejora del flujo y las conversiones es la utilización de mecanismos que disminuyan el tiempo de la ejecución de una tarea.

K. Hacer *benchmarking*

Esto se basa en comparar los procesos propios, con los procesos de la empresa líder en el campo de acción para tener ideas de mejora basándose en el potencial de las empresas de la competencia.

Se muestran en la Figura 2 los principios de la filosofía *Lean Construction* según los criterios a emplear.

| ETAPA | | | CRITERIO | PRINCIPIOS |
|--------|---------------|--------------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Diseño | Planificación | Comunicación | Mejorar Procesos | * Incrementar la eficiencia de las actividades que agregan valor (P1) |
| | | | | * Enfocar el control de los procesos al proceso completo (P2) |
| | | | | * Introducir el mejoramiento continuo de los procesos (P3) |
| | | | | * Referenciar permanentemente los procesos (Bechmarking) (P4) |
| | | | Reducir Pérdidas | * Reducir la participación de actividades que no agregan valor (P5) |
| | | | | * Reducir la variabilidad (P6) |
| | | | | * Incrementar la flexibilidad de las salidas (P7) |
| | | | | * Reducir el tiempo del ciclo (P8) |
| | | | | * Minimizar los pasos de manera de simplificar el proceso (P9) |
| | | | | * Incrementar la transparencia de los procesos (P10) |
| | | | Valor - Cliente | * Aumentar el valor del producto considerando los requerimiento del cliente (P11) |

Figura 2. Principios de Lean Construction. Tomada de Koskela, 2012

Estos 11 principios se dan entre las etapas de diseño y planificación teniendo en cuenta diversos criterios con el único objetivo de mejorar la producción, conservando la calidad para mejorar los tiempos de entrega y por ende los costos de un proyecto sean más rentables.

2.2.4. Herramientas del *Lean Construction*

El sistema *Lean Construction* se apoya en una serie de herramientas que forman parte de él. Estas herramientas desarrolladas específicamente se justifican como una forma de simplificar la aplicación de *Lean Construction* en los procesos de administración y gestión de una obra. Según distintos autores

como Picchi en 1993 o Womack en 1996, las herramientas no son más, que la aplicación de los principios teóricos a la práctica profesional (15) (p. 96) siendo las principales:

- **Administración de procesos por demanda.** (*Pull-Driven Process Management*). Consiste en ejecutar una actividad solo cuando sea un requerimiento inmediato de otra actividad. Su objetivo es construir de forma óptima en términos de tiempo, costos y calidad.
- **Justo a tiempo.** (*Just in Time*). Se trata de una herramienta usada para definir el flujo de materiales hasta el lugar de la construcción, implicando que estos materiales serán trasladados a su destino final para una puesta en obra sencilla y serán utilizados según lleguen a su localización final, sin ningún tipo de espera o almacenaje.
- **Reingeniería en el proceso de negocio.** (*Business Process Reengineering*). Por reingeniería se entiende la acción de replantearse y rediseñar la forma en la que se llevan a cabo ciertos procesos productivos.
- **Sistema de administración basado en la localización.** (*Location Based Management System*). Esta herramienta es un sistema técnico de administración de *Lean Construction*, que se concentra en pronosticar el ciclo de obra mientras este se ejecuta a través de las localizaciones de los equipos de trabajo, junto a su distribución y movimientos para identificar posibles tiempos de holgura. El sistema se basa en cuatro principios básicos: punto de referencia o línea base, flujo, progreso y pronóstico.
- **Gestión de calidad total.** (*Total Quality Management*). Es un conjunto de estrategias de gestión y se basa en conseguir que se cumplan los requerimientos y demandas del cliente. Se enfoca en el cumplimiento de los procesos y en la mejora continua de estos.
- **Sistema del último planificador.** (*Last Planner System*). Es la herramienta más utilizada dentro de la filosofía de *Lean Construction*. Presenta cambios fundamentales en la manera de controlar y planificar los proyectos. El método incluye la definición de unidades de producción y el control del flujo de actividades, mediante asignaciones de trabajo y búsqueda del incremento de

la productividad. A continuación, se muestra un modelo de planificación basado en construcción ajustada (ver Figura 3).

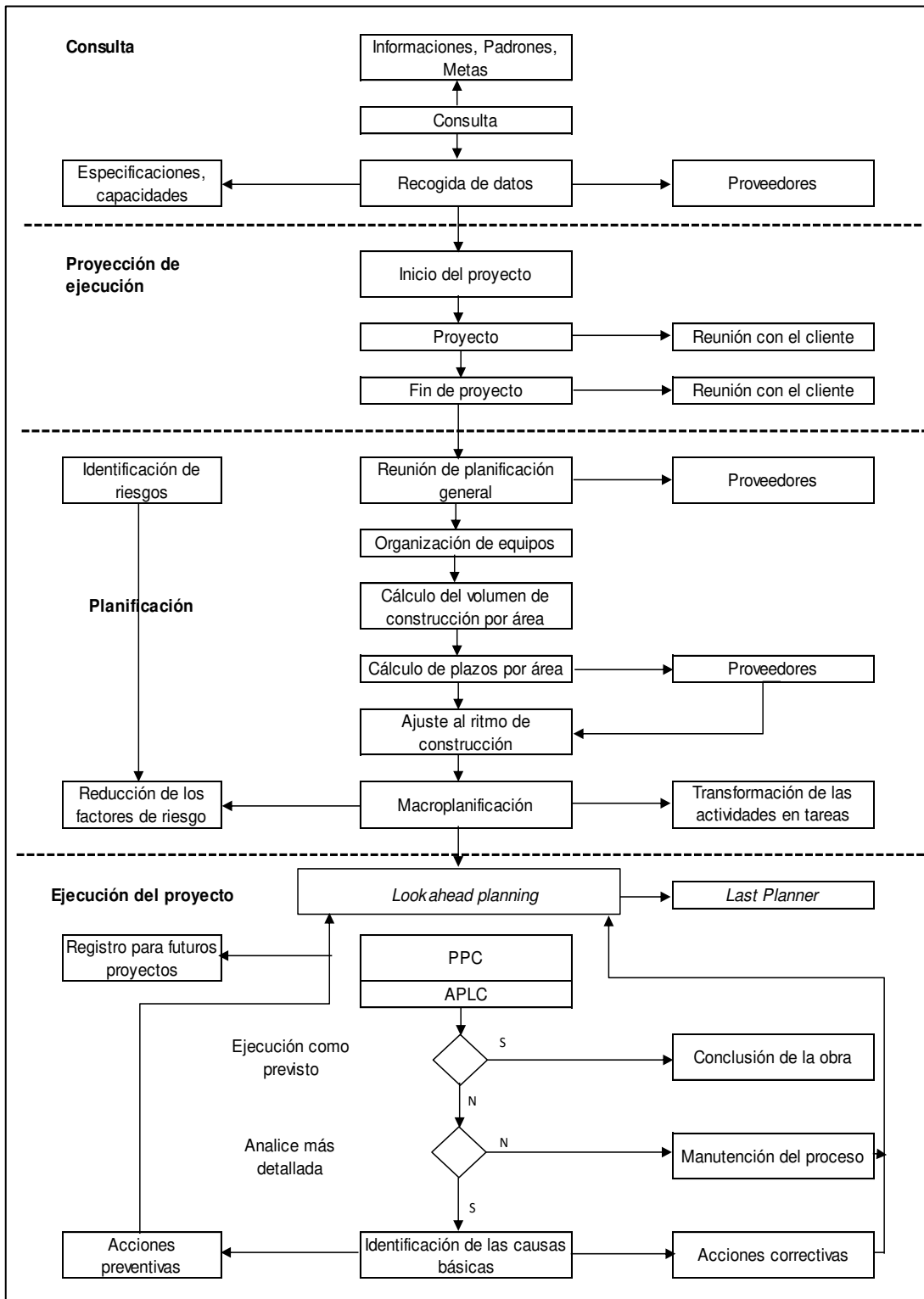


Figura 3. Modelo de planificación basado en construcción ajustada. Tomada de Información tecnológica Vol.18, 2007

2.2.5. Modelo tradicional

Los problemas típicos del modelo tradicional de la gestión integral de proyectos, desde su fase inicial de diseño hasta su ejecución, uso y mantenimiento, incluyen (16):

- i. Escasa formación y experiencia en los nuevos sistemas de gestión y planificación de obras.
- ii. Control de calidad ineficaz basado en métodos estadísticos que están lejos de garantizar el cien por cien de la calidad.
- iii. Escaso rigor en el cumplimiento de las medidas de seguridad.
- iv. Errores y omisiones en proyectos.
- v. Falta de interés en la formación y capacitación de los trabajadores.
- vi. Falta de coordinación entre los actores intervinientes en las diferentes etapas del proyecto.
- vii. Falta de transparencia y comunicación entre las partes interesadas.
- viii. Baja productividad comparada con otras industrias.

Las principales consecuencias de todo ello son bien conocidas: ejecución de obras fuera de plazo, sobrecostes, reclamaciones derivadas de la escasa calidad, excesivo número de accidentes laborales y, en general, incertidumbre y variabilidad con respecto a las condiciones iniciales del contrato. Las razones históricas de esta disfuncionalidad son muchas, entre ellas, la multiplicidad de participantes con intereses en conflicto, una cultura organizacional incompatible entre los miembros del equipo de proyecto y el acceso limitado a la información oportuna, en el momento preciso. Así pues, el objetivo de todos los actores en la industria de la construcción debería ser una mejor, más rápida y más eficaz gestión integral del proyecto –desde el diseño hasta el uso del edificio o infraestructura– creada por la formación de equipos totalmente integrados y colaborativos. Según informe publicado en 2010 por diversas organizaciones que representan a promotores, arquitectos, constructores, administración pública y enseñanza universitaria de Estados Unidos; la industria que engloba la arquitectura, ingeniería y construcción, que apenas ha sufrido cambios esenciales durante más de un siglo está apuntando hacia un futuro significativamente diferente al actual. Nuevas herramientas, metodologías y roles

están influyendo y dando forma a cambios fundamentales en la cultura empresarial de la construcción. Según el informe, se están viviendo las primeras etapas de una transformación acelerada, generalizada y positiva, y es muy importante que se comprenda por qué se necesita un cambio de sistema productivo en la construcción. Según este mismo estudio, entre las fuerzas más importantes que están influyendo en la industria de la arquitectura, la ingeniería y la construcción hoy en día se incluyen las tres siguientes:

- a. Desperdicio y falta de productividad
- b. La evolución tecnológica (software)
- c. Una mayor demanda de valor por parte del propietario o usuario final del edificio, instalación o infraestructura.

2.2.6. Comparación de modelo tradicional y *Lean Construction*

Entre las principales comparaciones entre el modelo tradicional y el modelo aplicando la metodología *Lean Construction*, destacan las presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Comparación entre modelo tradicional y modelo aplicando *Lean Construction*

| Modelo tradicional | <i>Lean Construction</i> |
|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sigue el modelo de conversión | Sigue el modelo de flujos |
| El diseño de producto se termina y después empieza el diseño del proceso | Producto y procesos son diseñados conjuntamente |
| No todas las etapas del ciclo de vida del producto son consideradas durante el diseño | Todas las etapas del ciclo de vida del producto son consideradas durante el diseño |
| Las actividades se llevan a cabo tan pronto sea posible | Las actividades se llevan a cabo al último momento responsable (<i>last responsible moment</i>) |
| Se eligen los subcontratistas debido al costo | Se eligen los subcontratistas debido a su capacidad de colaboración |

Tomada de Edifica

2.3. Definición de conceptos básicos

2.3.1. Sectorización

La sectorización es un proceso que antecede y a la vez permite formar los trenes de trabajo, la programación en sus distintos niveles y el dimensionamiento de las cuadrillas.

Es el proceso de la división de una actividad en porciones más pequeñas (manejables de acuerdo con la cantidad de recursos) llamada sectores, la suma de todos los sectores comprende el metrado total, y cada uno tiene un metrado similar, para mantener el flujo continuo entre ellos; lo que logra reducir la duración de un ciclo de producción.

La sectorización está relacionada con la teoría de lotes de producción y lotes de transferencia, ya que al dividir el trabajo en sectores más pequeños estamos dividiendo nuestro lote de producción en lotes más pequeños que serán los que transferimos a las actividades siguientes (lotes de transferencia). Asimismo, al sectorizar se está optimizando los flujos de recursos en la obra, lo cual genera un beneficio para todo el sistema de producción. (6) (p. 27)

2.3.2. Trenes de trabajo

Se entiende como trenes de trabajo a la secuencia de actividades, donde la culminación de una actividad es esencial para el inicio de la siguiente, los trenes de trabajo son las herramientas más utilizadas para la optimización de tiempos en cada actividad, donde influye que el tren de trabajo se realice en simultáneo en cada etapa de avance del trabajo. Los trenes de trabajo dividen secuencialmente sus actividades según los lotes de producción propuestos para cada actividad, al concluir con un determinado lote se continúa con la siguiente actividad, de tal manera que se realicen las labores simultáneamente. Por ejemplo, en la *Figura 4* se presenta un tren de trabajo para el proceso de construcción de una vía, donde figuran los trabajos en cantera: extracción de material, el transporte de materia a la zona de acopios, preparación o zarandeo de material, colocación y conformación del material del relleno y compactación del material de relleno.



Figura 4. Tren de trabajo para construcción de vías en mina

2.3.3. Lote de producción

Los lotes de producción son una forma de planificar el trabajo de un alcance global en unidades mínimas fácilmente controlables que sumados resulten en la totalidad del trabajo. Se aplican cuando se tienen alcances de trabajo grandes (por ejemplo: cuando se divide el trabajo de una carretera de 200 km, en lotes de producción de 150 m.) Se caracteriza por su volumen, variedad y cantidad; magnitudes que lo diferencian de un proceso de producción intermitente. Su principal diferencia está en los volúmenes que son más altos, porque los mismos productos, servicios, u otros similares se suministran continuamente, con el fin de elaborar los mismos en gran cantidad y reducir los trastornos en la producción. (6) (p. 27)

2.3.4. Nivel general de actividad

El nivel general de actividad mide el porcentaje de los tres tipos de trabajo en la obra. El control y medición de tiempos precisa el rendimiento de los recursos en cada actividad, donde cada proceso o actividad son necesarios para completar una tarea. Los tiempos se pueden definir entre tiempo productivo (TP), tiempo no productivo (TNP) y tiempo contributorio (TC) que serán definidos a continuación. (2)

2.3.5. Trabajo productivo (TP)

Guzmán lo define como aquel trabajo que aporta de forma directa en la producción de alguna unidad de construcción. Es el tiempo empleado en convertir las actividades que agregan valor, es decir las actividades que se encuentran presupuestadas; por ejemplo, la conformación y compactación de material de relleno, ambos medidos en m³. (6)

2.3.6. Trabajo contributorio (TC)

Se define como aquel trabajo de apoyo necesario para ejecutar los trabajos que agregan valor. Los flujos necesarios que se consideran como trabajo contributivo garantizan que los trabajos sean eficientes, se realicen con calidad y estén dentro de los estándares de seguridad que toda mina exige. (6) Ejemplos de TC son: orden de trabajo, apertura de acceso para explotación de cantera,

acondicionamiento de plataforma para parqueo de volquetes en zona de carguío, entre otros.

2.3.7. Trabajo no productivo (TNP)

Se define como aquel trabajo empleado en cualquier otra actividad diferente a las de soporte o productivas. Las esperas, los reprocesos y demás se consideran como trabajo no productivo (6); por ejemplo: colas de los volquetes a la espera de carga, carguío de material inadecuado.

2.3.8. Productividad

Se define a la productividad como la medición de la eficiencia con que los recursos son administrados para completar un producto específico, dentro de un plazo establecido y con un estándar de calidad dado. Esta comprende dentro de sí tanto la eficacia como la efectividad, ya que sirve para producir más en menos tiempo, usando adecuadamente los recursos y suministros. (17)

2.3.9. Productividad de la maquinaria

Se describe como factor importante, por el alto costo de los equipos, por lo tanto, son muy relevantes las pérdidas en la utilización de este tipo de recursos, sobre todo para los trabajos de movimiento de tierras, donde las maquinarias implican un 70% del valor del costo del proyecto.

2.3.10. Carta balance

La carta de balance o carta de equilibrio de una cuadrilla es un gráfico de barras verticales, que tiene una ordenada de tiempo, y una abscisa en la que se indican los recursos (hombre, máquina, etc.) que participan en la actividad que se estudia, asignándole una barra vertical a cada recurso. Tal barra se subdivide en el tiempo según la secuencia de actividades en que participa el respectivo recurso, incluyéndose los lapsos improductivos y de trabajo inefectivo. Dado que cada elemento de la cuadrilla es graneado en el mismo período de tiempo, la relación de estos se puede observar mediante una comparación de líneas horizontales de referencia, pudiendo descubrirse patrones comunes que incidan en los ciclos de trabajo.

En la *Figura 5* se presenta la carta balance donde se resaltan cuatro partes importantes de la misma:

1. Datos del proyecto, datos referentes a la fecha y hora del muestreo y datos del muestreador.
2. Definición de la partida a muestrear, partida abastecedora y partida cliente.
3. Leyenda de los trabajos productivos, no productivos y contributorios de la partida a muestrear, el mismo que sirve al muestreador a reconocer los tipos de trabajo, y
4. Cuerpo de la carta balance, que se divide en cinco filas, la primera indica el minuto de muestra; en los siguientes tres, se deberá marcar si la actividad que se realiza en el minuto indicado pertenece a un TP, TC o TNC y en la quinta fila se realizan comentarios u observaciones, la misma que puede ayudar a reconocer qué trabajo se realizó para distinguir en el procesamiento de datos.

ESTUDIO DEL TRABAJO: CARTA BALANCE
FORMATO DE MUESTREO

PROYECTO : RECONSTRUCCIÓN DE VÍAS DE MINA

ENTREGABLE / ZONA :

PARTIDA A MUESTREAR :

CAPATAZ :

FECHA DE MUESTREO :

NOMBRE DEL MUESTREADOR :

Hora Inicio : 04:38

Hora Fin : 05:18

Duración de la Muestra : 00:40

PROCESO EN ESTUDIO

| | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p style="text-align: center; color: blue; font-weight: bold;">PARTIDA PROVEEDORA</p> Transporte y descarga de material en plataforma | .=> | <p style="text-align: center; color: blue; font-weight: bold;">PARTIDA A MUESTREAR</p> Nivelación y conformación de material | .=> | <p style="text-align: center; color: blue; font-weight: bold;">PARTIDA CLIENTE</p> Relleno estructural de material |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

| Leyenda: | Definiciones de Sub-Procesos a Considerar: | Recursos a Utilizar |
|------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------|
| TP: TIEMPO PRODUCTIVO | | MANO DE OBRA : 02 PEONES |
| TC: TIEMPO CONTRIBUTORIO | | MATERIALES : |
| TNC: TIEMPO NO CONTRIBUTORIO | | EQUIPOS : |

| N° | TP | TC | TNC | OBSERVACIONES / COMENTARIOS |
|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------------|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| 6 | | | | |
| 7 | | | | |
| 8 | | | | |
| 9 | | | | |
| 10 | | | | |
| 11 | | | | |
| 12 | | | | |
| 13 | | | | |
| 14 | | | | |
| 15 | | | | |
| 16 | | | | |
| 17 | | | | |
| 18 | | | | |
| 19 | | | | |
| 20 | | | | |
| 21 | | | | |
| 22 | | | | |
| 23 | | | | |
| 24 | | | | |
| 25 | | | | |
| 26 | | | | |
| 27 | | | | |
| 28 | | | | |
| 29 | | | | |
| 30 | | | | |
| 31 | | | | |
| 32 | | | | |
| 33 | | | | |
| 34 | | | | |
| 35 | | | | |
| 36 | | | | |
| 37 | | | | |
| 38 | | | | |
| 39 | | | | |
| 40 | | | | |
| TOTAL | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |

Figura 5. Formato de Carta Balance

2.3.11. Planificación maestra

La planificación maestra es un plan que identifica los principales acontecimientos o hitos de un proyecto (inicio, entrega al cliente, procura de componentes de largo plazo, movilización en campo, diseño completo, licencias, etc.) y sus fechas. A menudo es la base para los acuerdos contractuales entre el cliente, contratista y otros miembros del equipo de trabajo del proyecto, según lo señalado en el glosario de *Lean Construction Institute*.

2.3.12. Planificación *lookahead*

Como señala el *Lean Construction Institute*, la planificación *lookahead* es la planificación de jerarquía media dedicada a controlar la asignación de recursos a corto plazo, permitiendo garantizar que las actividades programadas en dicho plazo sean posibles. El criterio de posibilidad se establece a partir de que dichas actividades cuenten con todos los recursos necesarios para lograr un escudo sobre la producción entre 3 a 5 semanas de anticipación.

De acuerdo con lo que indica Castillo, entre los principales factores que afectan la eficiencia y productividad en obra tienen como causa fundamental el no contar con los recursos necesarios en el momento que se requieren. (7)

2.3.13. Identificación de pérdidas

Es importante conocer que, dentro de los procesos constructivos o trenes de trabajo, existen actividades que no generan productividad. Ello hace suponer que son pérdidas que se deben identificar. La identificación de las pérdidas es necesaria para controlar los tiempos de los trabajos, los mismos que pueden

resumirse en cinco categorías que se indican en la *Figura 6* que se muestra a continuación:



Figura 6. Principales categorías de pérdidas de productividad. Tomada de Serpell, 2002

2.3.14. Compactación

Es el proceso realizado generalmente por medios mecánicos, por el cual se produce una densificación del suelo, disminuyendo la relación de vacíos. El objetivo de la compactación es el mejoramiento de las propiedades geotécnicas del suelo, de tal manera que presente un comportamiento mecánico adecuado.

2.3.15. Tránsito en vías construidas

Las vías internas de la mina Miski Mayo, sirve para el traslado de mineral desde las zonas de explotación (tajo abierto) hacia la zona denominada Alimentadores 1090 (planta de procesamiento de mineral).

Las vías tienen tránsito continuo en dos turnos de trabajo (día y noche), con 20 camiones gigantes que trasladan el mineral de acuerdo con la necesidad existente.

2.3.16. Camiones gigantes

También conocido como camión minero, volquete minero, yucle, camión de acarreo pesado o *haul truck*. La capacidad de carga de estos camiones va desde

las 40 toneladas (36 m³) hasta las 100 toneladas (90 m³) específicamente diseñado para ser usado en la explotación minera a gran escala. Los camiones gigantes son usados para el traslado del mineral extraído y transportado hacia la planta de procesamiento.



Figura 7: Camión gigante de mina

2.3.17. Diseño geométrico de vía

El diseño ha sido elaborado usando el *Guide For Mine Haul Road Design*, el Manual de Diseño Geométrico vigente del MTC del Perú y las recomendaciones del Estudio de Suelos y Diseño Geométrico de Vías en el Área de Mina Fosfatos Bayóvar elaborado por Ausenco Vector el año 2011.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Método específico

El método específico de investigación utilizado es el método científico cuantitativo, tipo experimental, explicativo y aplicado pues se realizaron las observaciones antes y después de aplicada la metodología *Lean Construction*, se analizaron los datos y se compararon resultados.

3.2. Diseño de la investigación

El mejoramiento de la productividad comprende tres etapas que deben ser realizadas para lograr el mejoramiento (ver Figura 8):

a) Medición de la productividad

- Toma de datos
- Análisis y procesamiento de la información

b) Evaluación de la productividad

- Diagnóstico
- Identificación de problemas
- Determinación de cursos de acción
- Evaluación de alternativas

c) Sistemas o planes de mejoramiento

- Implementación de estrategias y acciones de mejoramiento (*Lean Construction*)
- Seguimiento y control de la implementación y sus resultados.

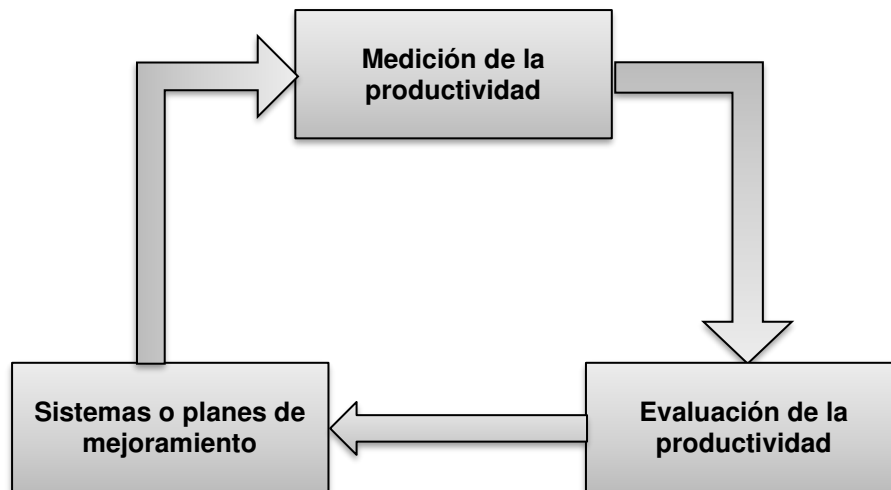


Figura 8. Ciclo de mejoramiento de la productividad. Tomada de Serpell, 2012

3.3. Población y muestra

Población: construcción de las vías internas de la mina Bayóvar, las cuales sirven para tránsito interno de camiones con mineral – roca fosfática (2.8 km-capa).

Muestra: la construcción de las capas 2 y 3, de la vía Carneloz (Planta de la vía Carneloz – II Etapa) desde la progresiva 1+400 a 1+900 (1.0 km-capa).

Tipo de muestra: la muestra fue no probabilística, ya que no se aplicó el criterio del azar, sino por conveniencia, debido a que ciertos tramos fueron de las capas 2 y 3 del relleno de la vía, siendo construidos con el método tradicional y en ciertos tramos se aplicaron las herramientas de la filosofía *Lean Construction*, que son de interés para la evaluación en esta investigación.

Técnicas de muestreo: las técnicas de muestreo aplicadas fueron no probabilísticas, ya que estuvieron en función del interés de la investigación.

3.4. Técnicas de recolección de datos

Para la recolección de datos se realizó:

- a. Para determinar la mejora de la productividad en el proceso de conformación y compactación en el relleno, es necesario evaluar los tiempos necesarios para completar los procesos, conservando los criterios básicos para considerar que una actividad fue realizada satisfactoriamente, se detallan a continuación:
 - **Seguridad:** todo trabajo o actividad realizada busca cumplir con los criterios de seguridad que establece la compañía minera Miski Mayo, en alusión a las normas de seguridad y salud en el trabajo vigentes, establecidas en el DS 024-2016, donde la prioridad es la protección a la vida y salud humana, conservación del medio ambiente y evitar pérdidas materiales.
 - **Calidad:** los trabajos deben pasar por un proceso de control de calidad, desde la ejecución de estos y al finalizar, para liberar áreas de trabajo que permitan continuar con las actividades subsiguientes.
 - **Rentabilidad:** la realización de los trabajos debe obedecer al gasto programado para ello, es decir, debe garantizar la seguridad y calidad en las actividades sin generar que estas sean más costosas de lo programado.

Teniendo en cuenta los criterios básicos para definir las actividades es fundamental precisar los indicadores de medición de productividad que se usaron para la investigación. Los mismos que se evaluaron según la muestra actual, y después, según la muestra con la aplicación de la metodología *Lean Construction*.

- **Plazo:** se verifica el plazo de ejecución de las actividades, control permanente y en función al término de estas.
- b. Una vez establecidos los criterios e indicadores de evaluación se procedió a evaluar la muestra mediante el uso de la carta balance, donde se definieron los tiempos de los trabajos productivos, no productivos y contributorios de las actividades de conformación y compactación.

- c. Ya conociendo los porcentajes de cada tiempo en las actividades antes descritas, se verificaron cuáles son los trabajos que elevan el porcentaje de TNP (tiempo no productivo), TC (tiempo contributorio).
- d. Se definió el plan de acción para reducir los tiempos de los trabajos contributorios y se buscó eliminar las actividades no productivas o, en su defecto, disminuir sus tiempos en la operación.
- e. Como las actividades de movimiento de tierras no pueden ser solo evaluadas por la carta balance, se realizó el control del cronograma de obra, en los trabajos establecidos, y si no se hubiese contado con este detalle, fue necesario considerar una herramienta adicional para comparar los tiempos de término de actividades de la muestra con y sin la aplicación de la metodología *Lean Construction*.

3.5. Instrumentos de medición

Se ha requerido el uso de los siguientes instrumentos de medición:

- a. Carta balance
- b. Control de avance por lotes de producción

CAPÍTULO IV

PROCESO DE DESARROLLO

4.1 Descripción de la empresa

General House de Comercio Industrial S.A.C. es una empresa peruana, dedicada a la ejecución de obras civiles para la industria minera, representada dentro de los proyectos mineros Miski Mayo – Bayóvar, Iscaycruz – Oyón, Yauliyacu – Casapalca, entre otras.

4.2 Descripción del proyecto

La minera Miski Mayo requería la construcción de 0.70 km de vía para tránsito de camiones gigantes, la misma que serviría para unir la vía Carneloz (I Etapa) con la vía Chavelos o vía principal. Esta vía fue denominada Carneloz (II etapa) y sirve para dar mayor transitabilidad al Acceso 4 hacia la vía Chavelos, la cual apertura el acceso hacia la explotación de la zona norte del minado actual.

La vía Carneloz (II Etapa) está ubicada al este de la vía Chavelos y es la continuación de la vía del mismo nombre, que tiene una longitud inicial de 1.9 km. Esta vía se encuentra al sur de las pantallas 2 y 3 y es la vía que une al Acceso 4 con la vía Chavelos (ver Figura 9).

Según el estudio de planeamiento será la nueva ruta que se usará para el traslado del mineral.

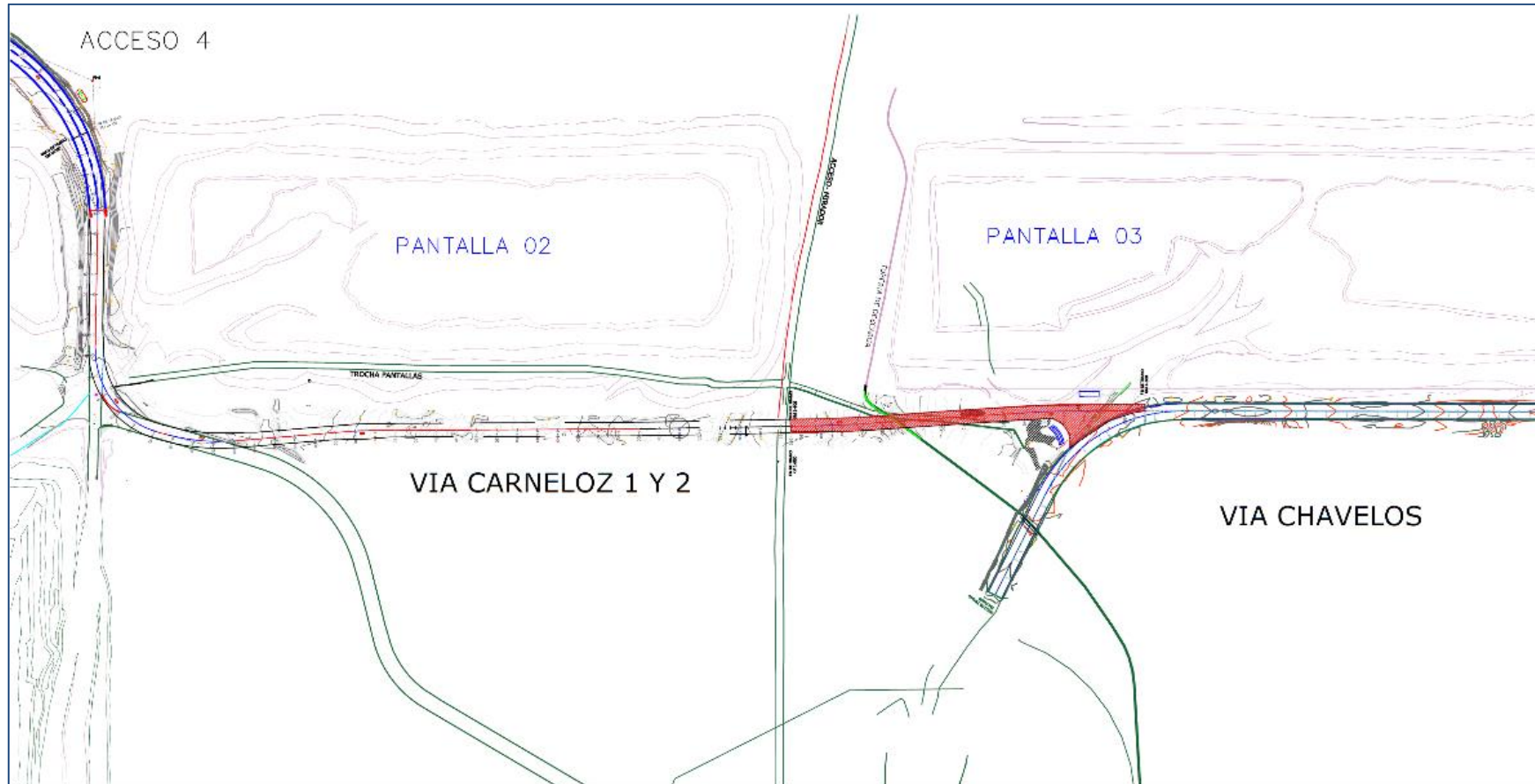


Figura 9. Ubicación de la vía Carnelez II Etapa. Tomada de data de Miski Mayo

4.2.1 Criterios de diseño de la vía a construir

El diseño detalla que la vía consta de 300 ml tangenciales y dos curvas, tal como se observa en la *Figura 10*, la primera curva en el ingreso con un radio de 150 m, y la segunda curva al finalizar la vía de radio de 1000 m.

La velocidad directriz ha sido proporcionada por Miski Mayo teniendo en cuenta los rendimientos de los camiones mineros y su plan de tránsito interno en mina. Por lo tanto, se ha definido como velocidad de diseño del camión cargado 40 km/h y del camión vacío 45 km/h.

Se consideró un peralte de 4%, tomando de referencia las recomendaciones de la tabla 2.5 del *Guide For Mine Haul Road Design*. (18) Asimismo, se ha considerado como longitud de transición del peralte una longitud de 40 metros (ver *Figura 11*).

La pendiente longitudinal más pronunciada en todo el tramo es de 3.3% en 65 metros, valor inferior al máximo recomendado (7%).

Se consideró un bombeo transversal de 2%, dada las condiciones climáticas de la zona, donde se resalta escasa precipitación a excepción de los cortos periodos de lluvia y eventos extraordinarios como el Fenómeno del Niño.

El ancho de la plataforma a nivel de subrasante es de 29.50 m, el cual considera cunetas de 1.0 m de ancho y 0.50 m de profundidad. Mientras que, en zonas de curvas, dado el gran radio de giro, se ha considerado un sobre ancho mínimo de 0.60 m, con lo cual se asegura el tránsito seguro de los camiones. Cabe señalar que el estudio de Ausenco Vector recomienda un ancho efectivo de acceso de 27.20 m. (19)

Finalmente, luego de hacer un balance de los volúmenes de relleno contractuales para la construcción del pavimento, se ha llegado a la siguiente estructura:

| | |
|---------------------------|---------|
| Capa 4 (rodadura) | : 30 cm |
| Capa 3 (base granular) | : 30 cm |
| Capa 2 (subbase granular) | : 30 cm |
| Capa 1 (subbase granular) | : 30 cm |

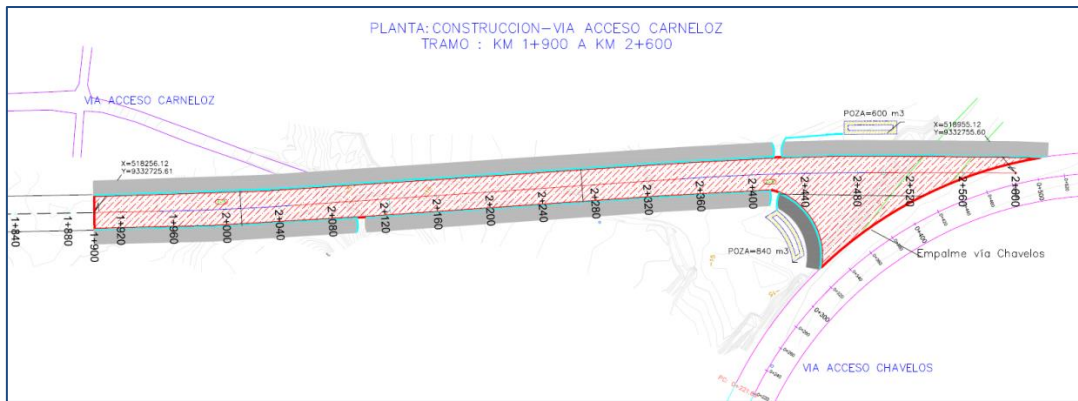


Figura 10. Planta de la vía Carneloz – II Etapa. Tomada de expediente técnico

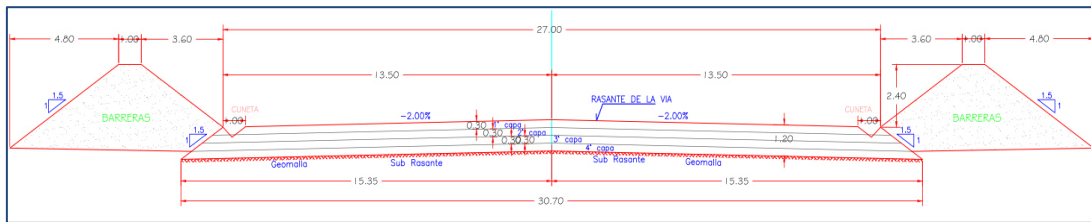


Figura 11. Sección típica del diseño de vía. Tomada de diseño geométrico de vía, 2010

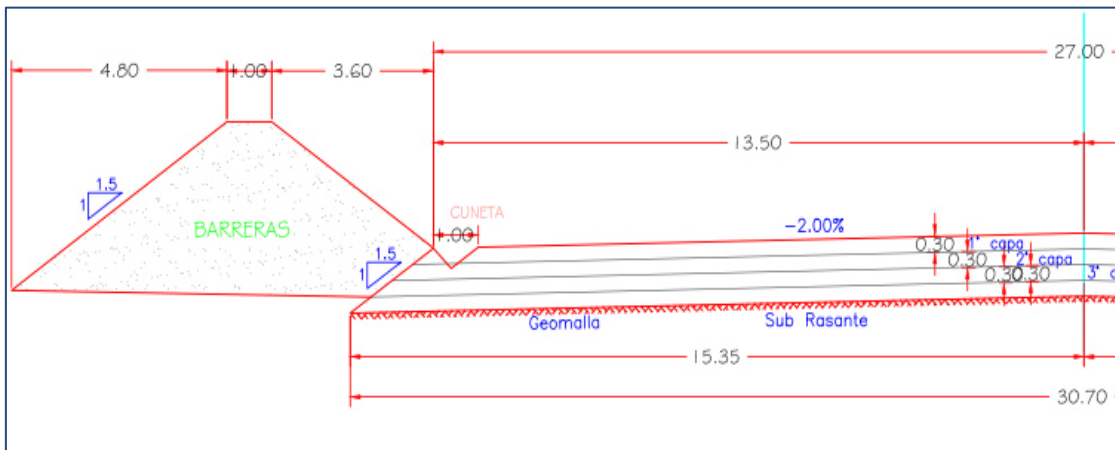


Figura 12. Detalle de barreras y cunetas. Tomada de diseño geométrico de vía, 2010

4.2.2 Proceso constructivo

a) Trabajos Topográficos

Los trabajos topográficos corresponden al trazo y replanteo del diseño contractual que indica el expediente técnico.

Los trabajos en general se dieron inicio con el levantamiento topográfico, para conocer las condiciones reales del terreno y compatibilizar con los planos de diseño (ver Figura 13).



Figura 13. Trazo y replanteo

Seguido de ello se procedió a trazar los límites de corte y retiro de material inadecuado en plataforma como inicio de labores, definición del área de las canteras de explotación de material de préstamos y verificación de accesos alternos para no interrumpir el tránsito durante la ejecución de los trabajos.

El control topográfico a partir del inicio de los trabajos de movimiento de tierras fue permanente, tanto en campo para el trazado de ejes, límites y cotas, como en gabinete para el cálculo de áreas y volúmenes que servirían para el control y programación de los trabajos subsiguientes.

b) Nivelación de la subrasante

Para el tratamiento de la subrasante se procedió a nivelar el terreno de acuerdo con las cotas de diseño, en zonas de corte se llegó hasta el nivel de subrasante y luego procedió a escarificar 30 cm de profundidad del terreno por debajo de la subrasante.

En zonas de relleno se conformó el terreno de fundación mediante un escarificado, humedecimiento, batido y compactado de 30 cm de profundidad. Luego se procedió a conformar el relleno hasta el nivel de subrasante en capas de 30 cm de espesor como máximo.

Todos los rellenos y conformación del terreno natural por debajo de la subrasante se compactaron mínimo al 95% de la densidad máxima obtenida mediante el Proctor Modificado.

A nivel de subrasante se colocó una geomalla triaxial de polipropileno, como se observa en la Figura 14, para lograr una mejor distribución de las cargas y por ende reducir los esfuerzos en la subrasante. Considerando traslapes longitudinales y transversales mínimos de 0.45 m y 1.0 m respectivamente.



Figura 14. Colocación de geomalla

c) Explotación de cantera

Para los trabajos de excavación, preparación y carguío del material seleccionado, se usaron las canteras de Hito 32 y cantera Bappo. Las mismas que fueron aceptadas, pues los materiales cumplían con lo requerido en la especificación técnica.

La cantera Hito 32, que serviría para extraer material de conchuela y material arcilloso, se encuentra situada a 7 km de distancia del punto medio de la vía.

En la cantera Bappo se encontró material para afirmado. Esta cantera está situada a 32 km de la vía. (Ambas canteras cumplieron con los taludes de

explotación adecuados y fueron remediadas para minimizar los impactos ambientales).

Las pruebas iniciales del material fueron granulometría, prueba de límites, pruebas de contenido de humedad, *Proctor* modificado y CBR.

La capa 1 tiene una proporción de 50% de material de conchuela de Hito 32 y 50% de material arena proveniente de Dunas. Las capas 2 y 3 tienen una composición de 100% de material de conchuela proveniente de la cantera Hito 32, la capa 4 tiene una proporción de 40% de material de conchuela proveniente de la cantera Hito 32, y 60% de material afirmado proveniente de la cantera Bappo.

El material fue preparado en los acopios cercanos a la vía en construcción, para garantizar que el material cumpliera con las características de diseño requeridas (humedad óptima, encontrarse dentro del huso granulométrico, cumplir con *Proctor* requerido, entre otros), comprobados mediante pruebas *in situ* y para realizar la preparación o mezcla de los distintos materiales, buscando la homogeneidad del material, lo que garantiza su calidad hasta este proceso.

d) Transporte y descarga del material de relleno

El material de relleno fue transportado desde las canteras habilitadas, hacia los puntos de acopio ubicados en los laterales a la plataforma de relleno; las zonas de acopio servirán también para realizar las mezclas correspondientes.

Una vez que el material se encontró en condiciones óptimas, se realizó el transporte a la plataforma de relleno, donde fue conformado en capas, tal como se observa en la Figura 15.



Figura 15. Descarga de material en plataforma de relleno

e) Conformación y compactación de pavimento (subbase y capa de rodadura)

La conformación del material del pavimento (capas 1, 2, 3 y 4), se realizó en capas de espesor de 30 centímetros, las cuales fueron conformadas y niveladas con motoniveladora, es importante precisar que el material ya venía mezclado desde el acopio y el control de calidad garantizaba la homogeneidad del material, por lo que el equipo solo extendía y conformaba la capa, lo cual facilitó el proceso.

La compactación de las capas fue realizada con rodillo liso vibratorio de 12 t, se realizaron 9 ciclos para garantizar obtener el 95% (como mínimo) de compactación. En la Figura 16 y 17 se observa que el proceso de conformación y nivelación debe culminar para iniciar la compactación de este.



Figura 16. Conformación de plataforma de relleno



Figura 17. Compactación de plataforma de relleno

El control del grado de compactación se realiza mediante el ensayo de cono de arena, (ver Figura 18) y la humedad en campo se determina indirectamente mediante el equipo *Speedy* y fue esta prueba la que definió la continuidad de labores en dicho sector.



Figura 18. Ensayo de densidad de campo

El control de calidad *in situ* garantiza que el trabajo se ha realizado de acuerdo a los estándares de calidad requeridos por el expediente técnico, en caso de que los resultados no fueran satisfactorios, se procede a recompactar (de acuerdo al criterio del supervisor) 1 ciclo o 2 ciclos adicionales. Si pese a ello, no se alcanza el grado de compactación requerido, será necesario escarificar la última capa y proceder con la conformación nuevamente.

En el Anexo 2, se adjuntan los protocolos de calidad, donde se muestran las conformidades de los ensayos *in situ*.

f) Construcción de barrera de protección tipo trapecio - berma lateral

La construcción de barreras laterales se realizó con material propio. Las bermas tienen una altura de 2.65 m y taludes estables. Se empujó el material depositado en los lados laterales con tractor, seguido de ello, se procedió a conformar el material con excavadora, dándole el talud de diseño y la estabilización necesaria, tal como se observa en la Figura 19.



Figura 19. Construcción de bermas de seguridad

g) Construcción de cunetas de drenaje

Para la construcción de las cunetas, se procedió a realizar el marcado topográfico, y definiendo los anchos de diseño se procedió a realizar el corte con motoniveladora.



Figura 20. Apertura de cunetas con motoniveladora

4.2.3 Cronograma y presupuesto

El proyecto se programó para realizarse en 125 días calendario, de los cuales se considera 15 días para efectos de movilización y desmovilización.

El corte nivelación, conformación y compactación a nivel de subrasante, describe las actividades a realizar para liberar el área donde se coloca el material de relleno, el cual tiene un plazo de 31 días calendario después de la movilización. Seguido de ello, se procede a realizar las actividades de extracción

de material de cantera y transporte de material que cuenta con plazo de 70 días calendario.

La conformación y compactación de relleno se podrá dar inicio después de cuatro días calendario de culminada las actividades en la subrasante, con una duración de 70 días calendario.

Tal como se aprecia en el cronograma adjunto (Figura 21), las actividades son secuenciales y cualquier demora afecta al cumplimiento del plazo contractual.

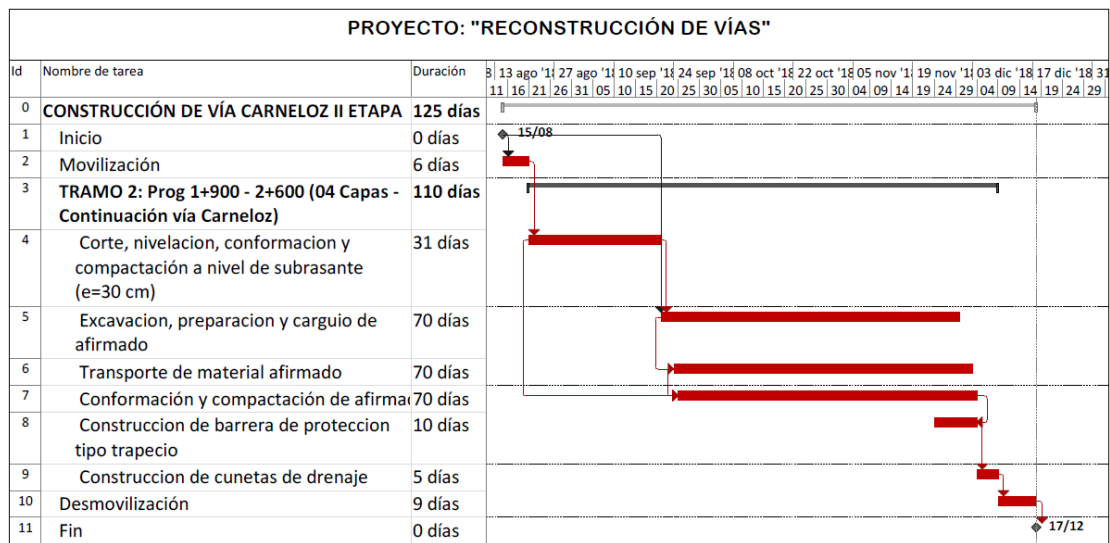


Figura 21. Cronograma contractual del proyecto. Tomada de expediente técnico

Entre las principales actividades para el desarrollo del presente proyecto se consideran los trabajos de extracción de material de cantera, transporte de material y relleno de vía (conformación y compactación) como los más incidentes tanto en el presupuesto como en tiempo de ejecución. Esto se puede observar en la Tabla 2, resaltando los porcentajes de incidencia de estas tres partidas (19.43%, 26.82% y 24.97%; respectivamente).

Tabla 2. Presupuesto contractual

| Ítem | Descripción | Unid | Cantidad | Pu | Precio parcial | Porcentaje |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------|-----------|-------------------|----------------|
| 1 | Obras civiles, movimiento de tierras, compactación | | | | | |
| 1.1 | Movilización de equipos, personal y materiales | Glb | 1.00 | 82,972.51 | 82,972.51 | 9.46% |
| 1.2 | Desmovilización de equipos, personal y materiales | Glb | 1.00 | 26,908.87 | 26,908.87 | 3.07% |
| 2 | Movimiento de tierras | | | | | |
| 2.1 | Conformación y compactación a nivel de subrasante (e=30 cm) | m ² | 23,142.20 | 2.49 | 57,606.60 | 6.57% |
| 2.2 | Preparación de material de cantera | m ³ | 35,006.81 | 4.87 | 170,386.46 | 19.43% |
| 2.3 | Transporte de material afirmado (14 km) | km-m ³ | 422,839.84 | 0.56 | 235,207.12 | 26.82% |
| 3 | Compactación y relleno | | | | | |
| 3.1 | Conformación y compactación de afirmado (base, subbase y capa de rodadura) | m ³ | 31,240.76 | 7.01 | 218,960.99 | 24.97% |
| 4 | Otras obras | | | | | |
| 4.1 | Construcción de barrera de protección tipo trapecio | M | 1,400.00 | 55.85 | 78,187.32 | 8.92% |
| 4.2 | Construcción de cunetas de drenaje | M | 1,400.00 | 4.71 | 6,599.98 | 0.75% |
| Total | | | | | 876,829.84 | 100.00% |

Tomada del expediente técnico

Por las condiciones y la cantidad de recursos disponibles para estos trabajos se decidió iniciar con las actividades de extracción de material de cantera y transporte de material una vez iniciado el proyecto, puesto que se contaba con disposición de camiones, volquetes y una excavadora antes de la fecha programada. Para ello, se habilitó acopios en lados laterales de la vía a construir, para descargar del material y proceder con la preparación en dichos puntos, tal como muestra la Figura 22.

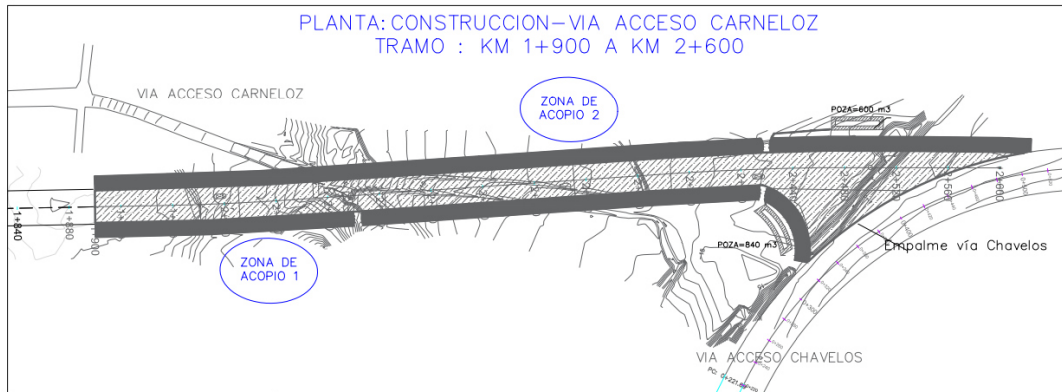


Figura 22. Zonas de acopio temporal de material

Por lo tanto, los trabajos de conformación y compactación de material de relleno se convirtieron en la actividad más crítica, por el plazo requerido y por su incidencia en el presupuesto. Esta actividad depende de otras actividades para su realización (descarga de material en plataforma de relleno) y su culminación inicia otras actividades (bermas y cunetas laterales).

CAPÍTULO V

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA *LEAN CONSTRUCTION*

5.1 Diagnóstico del estado actual

Se requiere conocer el estado y condiciones actuales del desarrollo de las actividades del proyecto, para verificar que estas se realicen dentro de los marcos legales de Seguridad y Salud Ocupacional del Ministerio de Energía y Minas y estándares de calidad propuestos por Miski Mayo. De acuerdo con esto, se pueden reconocer los principales puntos del proceso, en el cual se pueden realizar cambios para alcanzar o mejorar estándares solicitados (en seguridad, calidad o producción).

5.1.1 Nivel general de la actividad

Teniendo en cuenta que se realizan distintas actividades dentro de la jornada laboral, es importante definir cómo serán considerados los trabajos realizados, los cuales serán divididos por el tipo de equipo que se emplee¹.

En este caso, la motoniveladora dividirá sus trabajos en lo siguiente (Tabla 3):

Trabajos productivos: conformación y nivelación

¹ Si la actividad requiere más de un equipo, solo se dividirá por actividades. En este caso se considera que cada equipo realiza una actividad independiente. La motoniveladora conforma y nivela, mientras que el rodillo procede a compactar. Se puede realizar el estudio considerando la actividad de conformación y compactación, pero al tener cada equipo un rendimiento distinto se distorsionan los resultados del estudio.

Trabajos contributorios: orden de trabajo, traslado interno de equipo, charla de seguridad, llenado de herramientas de gestión.

Trabajos no productivos: espera de frente, falta de espacio, descansos no programados y trabajos rehechos.

Tabla 3. Datos para medición de tiempos para motoniveladora

| Trabajo | | |
|-------------------|-------------------------|----------------------|
| Productivo | Contributorio | No productivo |
| Conformación | Orden de trabajo | Espera de frente |
| Nivelación | Traslado interno | Falta de espacio |
| | Charla de seguridad | Descansos |
| | Herramientas de gestión | Trabajos rehechos |
| | Mantenimiento de vías | |

Para el rodillo se dividirán los trabajos en lo siguiente (Tabla 4):

Trabajos productivos: compactación

Trabajos contributorios: orden de trabajo, traslado interno de equipo, charla de seguridad, llenado de herramientas de gestión, limpieza de rola.

Trabajos no productivos: espera de frente, falta de espacio, descansos no programados y trabajos rehechos.

Tabla 4. Datos para medición de tiempos para rodillo

| Trabajo | | |
|-------------------|-------------------------|----------------------|
| Productivo | Contributorio | No productivo |
| Compactación | Orden de trabajo | Espera de frente |
| | Traslado interno | Falta de espacio |
| | Charla de seguridad | Descansos |
| | Herramientas de gestión | Trabajos rehechos |
| | Limpieza de rola | |

5.1.2 Plan semanal

En el plan semanal se definen las actividades programadas para la siguiente semana de control; en este caso se presenta un valor estimado de avance para ser corroborado una vez se termine la semana de control (ver Figura 23).

Con el método tradicional obtenemos que, de las 4 actividades programadas solo una logró cumplir el metrado comprometido de la actividad.

La preparación y mezcla de material para relleno logró superar el metrado comprometido en la semana, mientras que el relleno de material en el lado izquierdo y derecho solo logró el 85% del metrado esperado.

El material de relleno fue aquel que fue transportado, por lo que la actividad de transporte interno de material depende directamente de la actividad de relleno.

| Proyecto: Reconstrucción de Vías de Acceso Mina | | | | Planificación Semanal | | |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------|-----------------------|-------|----------------|
| Item / Código | Descripción de la Tarea | Responsable | Unidad | Cumplimiento | | "1" Logrado |
| | | | | Comprometido | Real | "0" No Logrado |
| | Preparación y mezcla de material para relleno | A. Albujar | m3 | 3,780 | 3,800 | 1 |
| | Transporte interno de material (desde acopio hacia plataforma) | A. Albujar | m3 | 3,780 | 3,240 | 0 |
| | Conformación y compactación de afirmado (base, sub base y capa de rodadura) | | | | | |
| | Relleno de la capa 02 - Lado derecho | A. Albujar | m3 | 1,575 | 1,350 | 0 |
| | Relleno de la capa 02 - Lado izquierdo | A. Albujar | m3 | 1,575 | 1,350 | 0 |
| Total Logrado (Suma de "1") | | | | | | 1 |
| % de Cumplimiento PPC (suma de "1"/Nº total de actividades) | | | | | | 25% |
| | | | | | | 4 |

Figura 23. Plan semanal. Tomada de Herramientas de control del proyecto

5.1.3 Sectores de avance

En el método tradicional no se cuenta con una sectorización definida, el proceso de avance y la medición de este se realiza de acuerdo con la asignación diaria de trabajos. Como se observa en la Figura 24, los sectores son irregulares y no presentan un patrón definido, determinándose que afecta considerablemente a la producción del proyecto, como se explica en los siguientes párrafos.

| CAPA | PROG. | 1+900 | 2+000 | 2+100 | 2+200 | 2+300 | 2+400 | 2+500 | 2+600 |
|--------|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| CAPA 2 | IZQUIERDO | 09/10 al 10/10 (2 días) | | 09/10 al 10/10 (2 días) | 11/10 al 13/10 (3 días) | 16/10 al 18/10 (3 días) | 19/10 al 23/10 (5 días) | 26/10 al 27/10 (2 días) | |
| | DERECHO | 09/10 al 10/10 (2 días) | 10/10 al 11/10 (2 días) | 13/10 al 14/10 (2 días) | 14/10 al 16/10 (3 días) | 16/10 al 17/10 (2 días) | 17/10 al 18/10 (2 días) | 22/10 al 23/10 (2 días) | 25/10 al 27/10 (3 días) |

Figura 24. Sectores de avance actual (método tradicional)

Tabla 5. Avance por sectores (método tradicional)

| Fecha | Lado izquierdo | | Lado derecho | |
|--------|----------------|--------------------------|--------------|--------------------------|
| | Progresiva | Avance (m ³) | Progresiva | Avance (m ³) |
| 09-oct | 1900-2000 | | | |
| 10-oct | 2000-2070 | 765 | 1900-1950 | 225 |
| 11-oct | | | 1950-2040 | 405 |
| 12-oct | | | | |
| 13-oct | 2070-2220 | 675 | | |
| 14-oct | | | 2040-2120 | 360 |
| 15-oct | | | | |
| 16-oct | | | 2120-2280 | 720 |
| 17-oct | | | 2280-2320 | 180 |
| 18-oct | 2220-2360 | 630 | 2320-2450 | 585 |
| 19-oct | | | | |
| 20-oct | | | | |
| 21-oct | | | | |
| 22-oct | | | | |
| 23-oct | 2360-2500 | 630 | 2450-2550 | 450 |
| 24-oct | | | | |
| 25-oct | | | | |
| 26-oct | | | | |
| 27-oct | 2500-2600 | 450 | 2550-2600 | 225 |
| | | | Total | 6300 |

En este punto se realizan también observaciones de seguridad y calidad. Como se aprecia, existen tramos tan cortos que pueden llegar a medir 60 metros de largo, los cuales dificultan u obstaculizan los trabajos en los siguientes sentidos:

- a) **Seguridad:** los equipos deben desplazarse y realizar sus labores en tramos cortos, y principalmente la motoniveladora debe reducir la velocidad para evitar la colisión con equipos o personal que se encuentren en los sectores cercanos.
- b) **Calidad:** al culminar un sector de trabajo, este será liberado mediante una prueba de calidad, y para realizar el relleno en el siguiente sector, se deberá realizar un empalme del tramo liberado con el siguiente tramo a rellenar.

Es decir, si se libera un tramo de 60 metros de longitud, para el relleno del siguiente tramo, se deberá escarificar como mínimo 8 metros para que el relleno del siguiente tramo garantice un buen empalme del material y así evitar juntas

frías (líneas de falla) de la vía proyectada. Este empalme se debe realizar tanto horizontal como transversalmente².

El total de tiempo empleado para culminar la capa 2 fue de 19 días, realizando un relleno total de 6,300 m³ de material, obteniendo un rendimiento diario de 331.58 m³/día.

5.1.4 Medición de producción

5.1.4.1 Carta balance (por minuto)

Se procedió a realizar mediciones en campo para verificar la producción mediante la carta balance, teniendo en consideración los siguientes aspectos:

- Se realizaron las mediciones, en un día, al azar.
- Las mediciones se realizaron en tres horarios distintos, tomando datos en horas de la mañana, media tarde y antes de finalizar la jornada laboral.
- Se realiza la medición de 40 minutos de trabajo, donde, cada ítem fue considerado como un minuto.

A continuación, se presentan los datos obtenidos de las muestras recogidas los días 15 y 16 de octubre de 2018.

a) Conformación - Motoniveladora 2:

Fecha de muestra: 15 de octubre de 2018

Cantidad de muestras: tres

Horario: 09:10, 11:15, 16:00 horas.

Duración de la observación: 40 minutos (cada una)

Resultados: descritos en la Tabla 6 y Figura 25.

² Entre sectores continuos y sectores que dividen el carril izquierdo del carril derecho.

Tabla 6. Resumen de resultados de carta balance de motoniveladora 2 - por minuto

| Fecha | Muestra | TP | TC | TNP |
|--------|---------|--------|--------|---------|
| 15-oct | 1 | 92.50% | 7.50% | 0.00% |
| 15-oct | 2 | 0.00% | 0.00% | 100.00% |
| 15-oct | 3 | 40.00% | 10.00% | 50.00% |

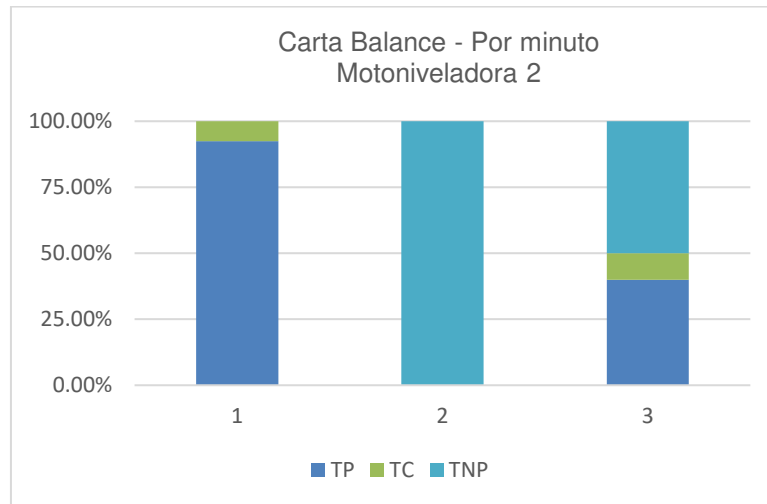


Figura 25. Carta balance por minuto - motoniveladora 2

b) Conformación - Motoniveladora 4:

Fecha de muestra: 16 de octubre

Cantidad de muestras: tres

Horario: 08:00, 11:32, 17:10 horas.

Duración de la observación: 40 minutos (cada una)

Resultados: descritos en la Tabla 7 y Figura 26.

Tabla 7. Resumen de resultados de carta balance de motoniveladora 4 - por minuto

| Día | Muestra | TP | TC | TNP |
|--------|---------|---------|--------|-------|
| 16-oct | 1 | 100.00% | 0.00% | 0.00% |
| 16-oct | 2 | 40.00% | 60.00% | 0.00% |
| 16-oct | 3 | 100.00% | 0.00% | 0.00% |

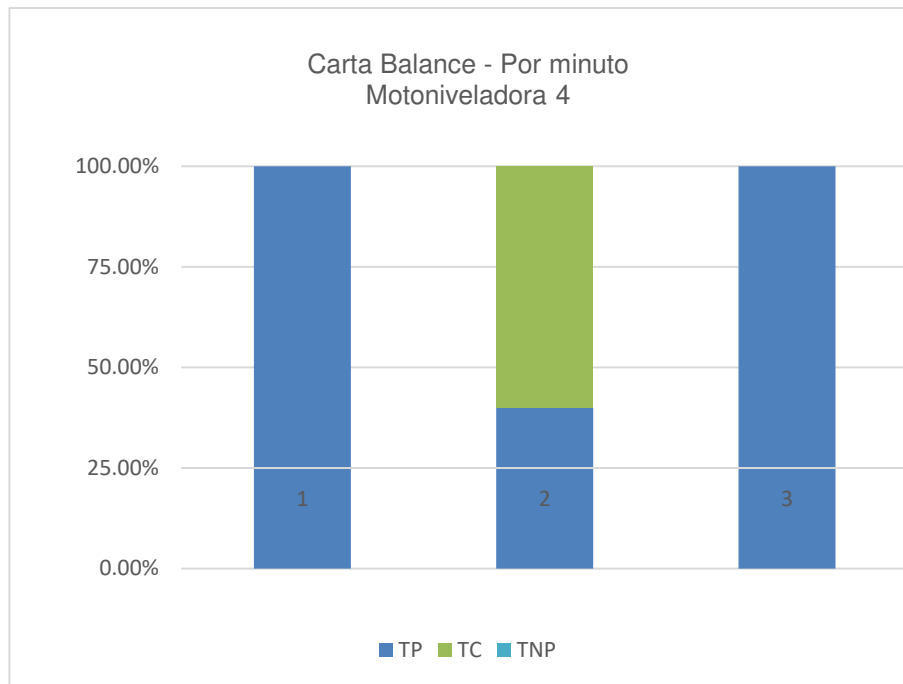


Figura 26. Carta balance por minuto - motoniveladora 4

c) Rodillo 1:

Fecha de muestra: 15 de octubre

Cantidad de muestras: tres

Horario: 09:10, 11:15, 16:00 horas.

Duración de la observación: 40 minutos (cada una)

Resultados: descrito en la Tabla 8 y Figura 27.

Tabla 8. Resumen de resultados de carta balance de Rodillo 1- por minuto

| Día | Muestra | TP | TC | TNP |
|--------|---------|--------|--------|---------|
| 15-oct | 1 | 0.00% | 0.00% | 100.00% |
| 15-oct | 2 | 45.00% | 7.50% | 47.50% |
| 15-oct | 3 | 90.00% | 10.00% | 0.00% |

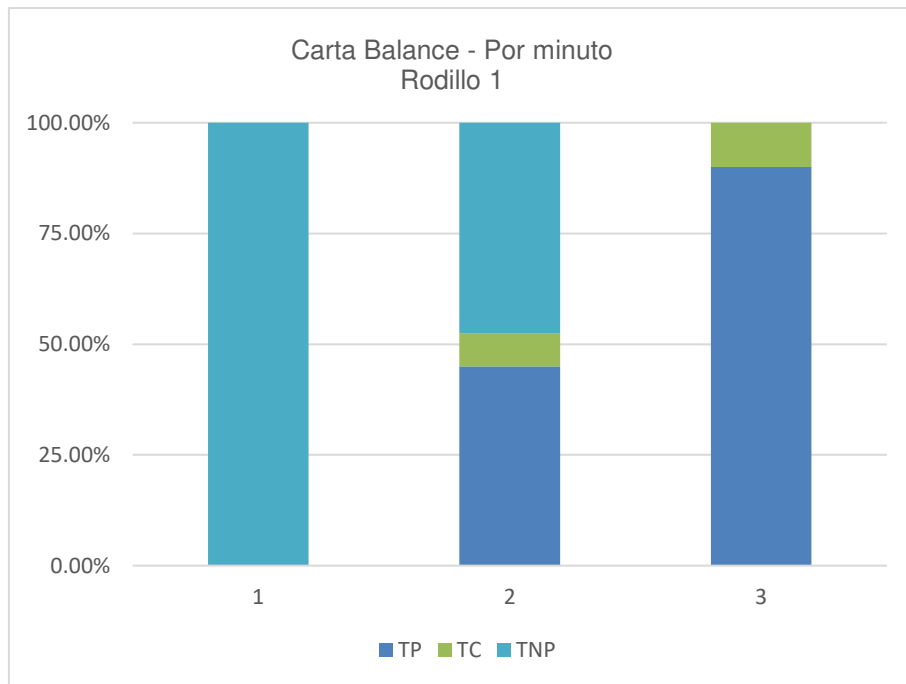


Figura 27. Carta balance por minuto - rodillo 1

d) Rodillo 2:

Fecha de muestra: 16 de octubre

Cantidad de muestras: 03

Horario: 08:00, 11:32, 17:10 horas.

Resultados: descrito en la Tabla 9 y Figura 28.

Tabla 9. Resumen de resultados de carta balance de Rodillo 2 - por minuto

| <i>Día</i> | <i>Muestra</i> | <i>TP</i> | <i>TC</i> | <i>TNP</i> |
|------------|----------------|-----------|-----------|------------|
| 16-oct | 1 | 17.50% | 7.50% | 75.00% |
| 16-oct | 2 | 62.50% | 12.50% | 25.00% |
| 16-oct | 3 | 100.00% | 0.00% | 0.00% |

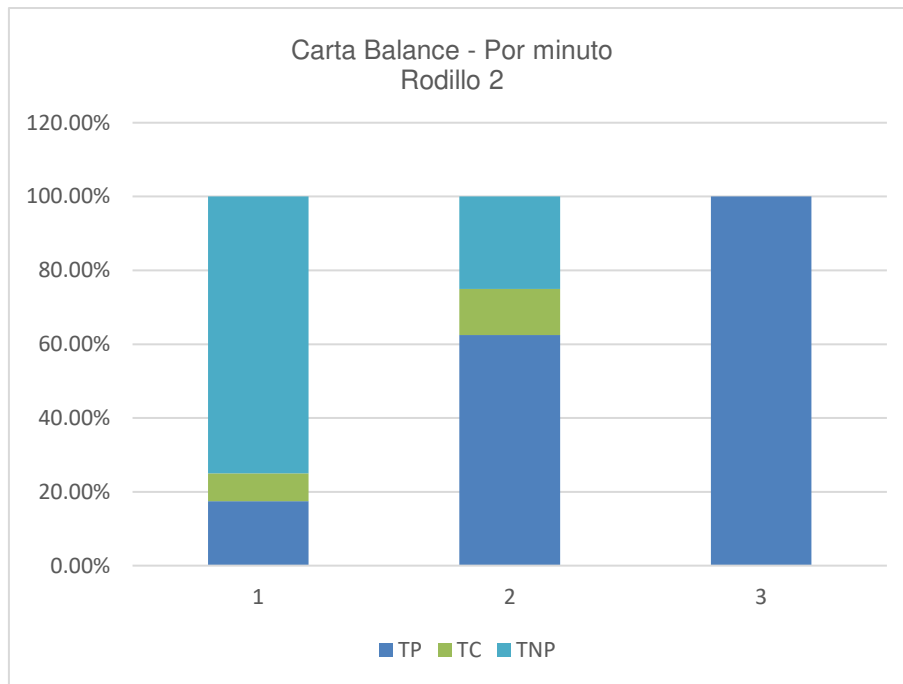


Figura 28. Carta balance por minuto - rodillo 2

De los datos antes mostrados, se aprecia que en las Tabla 6 y 7 (resumen de trabajos de motoniveladoras), la muestra 2 del día 15 de octubre refleja el 100% de TNP y las muestras 1 y 3 del 16 de octubre reflejan 100% de TP.

De igual manera, en las Tabla 8 y 9 (resumen de trabajos de rodillos) la muestra 1 del 15 de octubre refleja el 100% de TNP y la muestra 3 del 16 de octubre refleja 100% de TP.

De acuerdo con lo mostrado anteriormente, se puede deducir que los datos recogidos en 40 minutos no reflejan la realidad de proyecto.

En una muestra el equipo puede estar trabajando durante toda la observación, como también se pueden encontrar en *stand by* y reflejan datos de TP al 100% o TNP al 100%.

Esto implica que la medición no es idónea y que los datos obtenidos no son adecuados para continuar con la investigación.

Se busca obtener datos más reales, por lo cual se contempla la opción de realizar una observación a una jornada completa de trabajo.

5.1.4.2 Carta balance (jornada completa)

Para obtener los datos de una jornada completa de trabajo es necesario capacitar al personal (operadores de equipos y capataces), ya que de los reportes que se emiten diariamente, se obtendrá la información requerida.

Por lo expuesto, se consideran 8 días de observación continua, donde los reportes diarios del personal operativo servirán para el relleno de la carta balance, tal como se indicó anteriormente. Para considerar la jornada completa; en la Figura 29, se considera por cada ítem de observación como 15 minutos cronológicos.

En este formato se observarán 10 horas efectivas de trabajo, las mismas que se laboran diariamente por tratarse de un sistema de trabajo atípico o comúnmente conocido como sistema minero de 2x1³.

El inicio de labores es a las 7:00 am hasta las 12:00 del mediodía, donde se realiza una pausa de 1 hora para el almuerzo y se retoman las actividades a las 1:00 pm hasta las 6:00 pm. Dentro de las 10 horas trabajadas, se consideran los tiempos de charla de seguridad obligatoria al inicio de cada jornada, charlas de seguridad programadas, relleno de las herramientas de gestión de seguridad y control de producción.

³ En un sistema de trabajo de 2x1, significa que el empleado obtendrá un día de descanso por cada 2 días trabajados. Para ello es necesario cumplir con jornadas laborales de 10 horas, las mismas que acumulan diariamente 2 horas de trabajo para compensar los días de descanso. Esto en cumplimiento de las normas vigentes del Ministerio de Trabajo y Promoción del empleo.

| ESTUDIO DEL TRABAJO: CARTA BALANCE | | | | | |
|-------------------------------------------------|---------------|--------------------------------------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| FORMATO DE MUESTREO | | | | | |
| PROYECTO | : | RECONSTRUCCIÓN DE VÍAS DE MINA | | | |
| ENTREGABLE / ZONA | : | | | | |
| EQUIPOS | : | | | | |
| CAPATAZ | : | José Zapata | | | |
| FECHA DE MUESTREO | : | | Hora Mañana | : | 07:00 - 12:00 |
| NOMBRE DEL MUESTREADOR | : | Lizzeth Guerreros | Hora tarde | : | 13:00 - 18:00 |
| | | | Duración de la Muestra | : | 10:00 |
| PARTIDA PROVEEDORA | | PROCESO EN ESTUDIO | | PARTIDA CLIENTE | |
| Transporte y descarga de material en plataforma | | PARTIDA A MUESTREAR | | Relleno estructural de material | |
| | | Nivelación y conformación de material | | | |
| | | | | | |
| Leyenda: | | Definiciones de Sub-Procesos a Considerar: | | Recursos a Utilizar | |
| TP: TIEMPO PRODUCTIVO | | | | MANO DE OBRA : 02 PEONES | |
| TC: TIEMPO CONTRIBUTIVO | | | | MATERIALES : | |
| TNC: TIEMPO NO CONTRIBUTIVO | | | | EQUIPOS : | |
| | | | | | |
| N° | | TP | TC | TNC | OBSERVACIONES / COMENTARIOS |
| 1 | 7:00 - 7:15 | | | | |
| 2 | 7:16 - 7:30 | | | | |
| 3 | 7:31 - 7:45 | | | | |
| 4 | 7:46 - 8:00 | | | | |
| 5 | 8:01 - 8:15 | | | | |
| 6 | 8:16 - 8:30 | | | | |
| 7 | 8:31 - 8:45 | | | | |
| 8 | 8:46 - 9:00 | | | | |
| 9 | 9:01 - 9:15 | | | | |
| 10 | 9:16 - 9:30 | | | | |
| 11 | 9:31 - 9:45 | | | | |
| 12 | 9:46 - 10:00 | | | | |
| 13 | 10:01 - 10:15 | | | | |
| 14 | 10:16 - 10:30 | | | | |
| 15 | 10:31 - 10:45 | | | | |
| 16 | 10:46 - 11:00 | | | | |
| 17 | 11:01 - 11:15 | | | | |
| 18 | 11:16 - 11:30 | | | | |
| 19 | 11:31 - 11:45 | | | | |
| 20 | 11:46 - 12:00 | | | | |
| 21 | 13:01 - 13:15 | | | | |
| 22 | 13:16 - 13:30 | | | | |
| 23 | 13:31 - 13:45 | | | | |
| 24 | 13:46 - 14:00 | | | | |
| 25 | 14:01 - 14:15 | | | | |
| 26 | 14:16 - 14:30 | | | | |
| 27 | 14:31 - 14:45 | | | | |
| 28 | 14:46 - 15:00 | | | | |
| 29 | 15:01 - 15:15 | | | | |
| 30 | 15:16 - 15:30 | | | | |
| 31 | 15:31 - 15:45 | | | | |
| 32 | 15:46 - 16:00 | | | | |
| 33 | 16:01 - 16:15 | | | | |
| 34 | 16:16 - 16:30 | | | | |
| 35 | 16:31 - 16:45 | | | | |
| 36 | 16:46 - 17:00 | | | | |
| 37 | 17:01 - 17:15 | | | | |
| 38 | 17:16 - 17:30 | | | | |
| 39 | 17:31 - 17:45 | | | | |
| 40 | 17:46 - 18:00 | | | | |
| TOTAL | | 0.00% | 0.00% | 0.00% | |

Figura 29. Formato carta balance (jornada completa)

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las muestras recogidas entre los días 19 al 26 de octubre. Resumidas de la data completa que se encuentra en el Anexo 2.

a) Motoniveladora 2:

Cantidad de muestras: 8

Duración de la observación: 10 horas

Resultados: descritos en la Tabla 10 y Figura 30.

Tabla 10. Resumen de porcentaje de trabajos de Motoniveladora 2 con método tradicional

| <i>Día</i> | <i>TP</i> | <i>TC</i> | <i>TNP</i> |
|------------|-----------|-----------|------------|
| 19-oct | 65.00% | 7.50% | 27.50% |
| 20-oct | 27.50% | 32.50% | 40.00% |
| 21-oct | 57.50% | 7.50% | 35.00% |
| 22-oct | 67.50% | 17.50% | 15.00% |
| 23-oct | 77.50% | 7.50% | 15.00% |
| 24-oct | 0.00% | 77.50% | 22.50% |
| 25-oct | 0.00% | 65.00% | 35.00% |
| 26-oct | 35.00% | 5.00% | 60.00% |

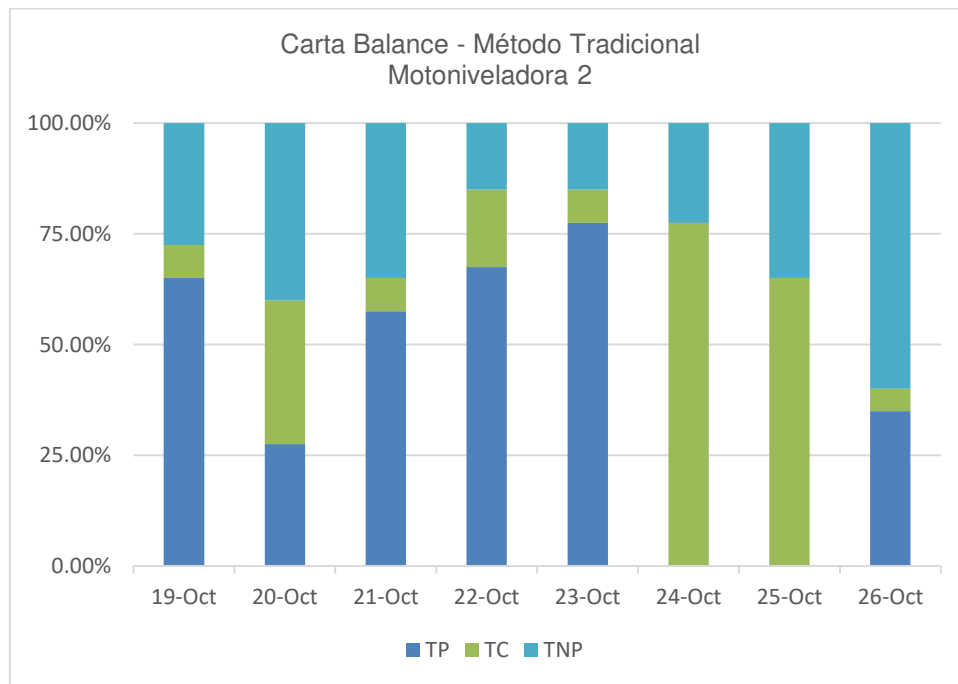


Figura 30. Carta balance - Método tradicional motoniveladora 2

b) Motoniveladora 4:

Cantidad de muestras: 8

Duración de la observación: 10 horas

Resultados: descritos en la Tabla 11 y Figura 31.

Tabla 11. Resumen de porcentaje de trabajos de Motoniveladora 4 con método tradicional

| <i>Día</i> | <i>TP</i> | <i>TC</i> | <i>TNP</i> |
|------------|-----------|-----------|------------|
| 19-oct | 0.00% | 70.00% | 30.00% |
| 20-oct | 52.50% | 7.50% | 40.00% |
| 21-oct | 32.50% | 7.50% | 60.00% |
| 22-oct | 37.50% | 7.50% | 55.00% |
| 23-oct | 70.00% | 30.00% | 0.00% |
| 24-oct | 0.00% | 0.00% | 100.00% |
| 25-oct | 27.50% | 7.50% | 65.00% |
| 26-oct | 77.50% | 7.50% | 15.00% |

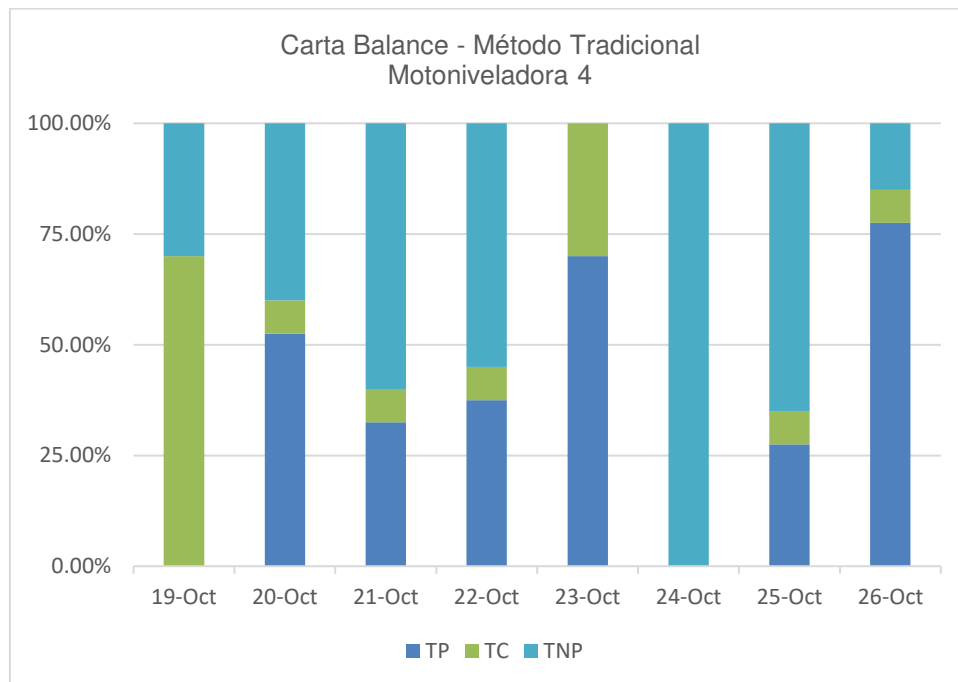


Figura 31. Carta balance - Método tradicional motoniveladora 4

c) Rodillo 1:

Cantidad de muestras: 8

Duración de la observación: 10 horas

Resultados: descritos en la

Tabla 12 y Figura 32.

Tabla 12. Resumen de porcentaje de trabajos de Rodillo 1 con método tradicional

| <i>Día</i> | <i>TP</i> | <i>TC</i> | <i>TNP</i> |
|------------|-----------|-----------|------------|
| 19-oct | 42.50% | 7.50% | 50.00% |
| 20-oct | 45.00% | 10.00% | 45.00% |
| 21-oct | 25.00% | 7.50% | 67.50% |
| 22-oct | 42.50% | 7.50% | 50.00% |
| 23-oct | 0.00% | 0.00% | 100.00% |
| 24-oct | 0.00% | 0.00% | 100.00% |
| 25-oct | 72.50% | 7.50% | 20.00% |
| 26-oct | 92.50% | 7.50% | 0.00% |

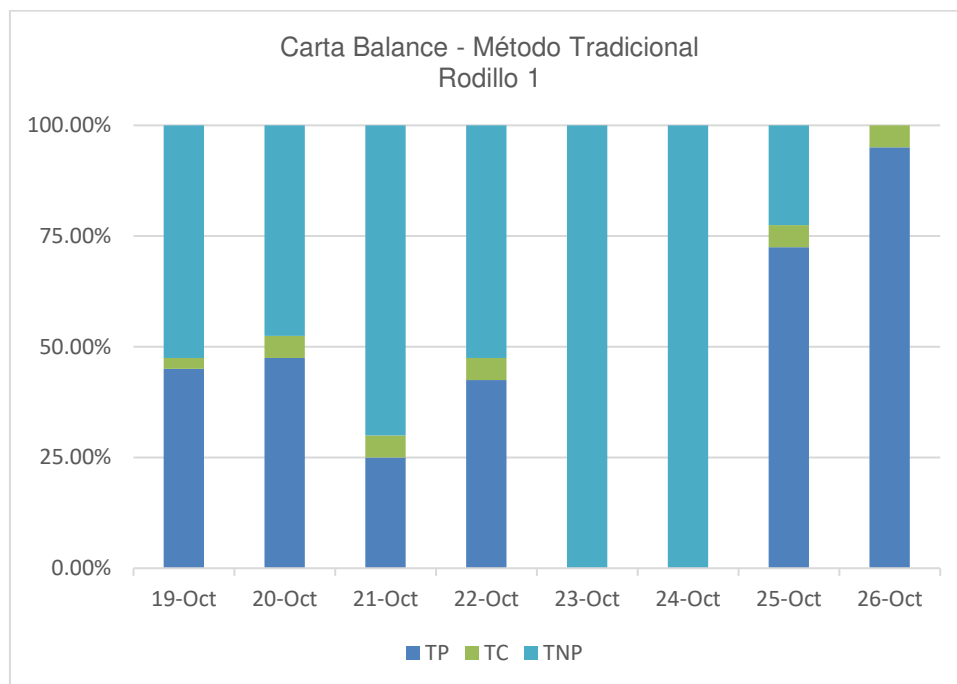


Figura 32. Carta balance - Método tradicional rodillo 1

d) Rodillo 2:

Cantidad de muestras: 8

Duración de la observación: 10 horas

Resultados: descritos en la Tabla 13 y Figura 33.

Tabla 13. Resumen de porcentajes de trabajos de Rodillo 2 con método tradicional

| <i>Día</i> | <i>TP</i> | <i>TC</i> | <i>TNP</i> |
|------------|-----------|-----------|------------|
| 19-oct | 40.00% | 10.00% | 50.00% |
| 20-oct | 42.50% | 7.50% | 50.00% |
| 21-oct | 22.50% | 7.50% | 70.00% |
| 22-oct | 37.50% | 7.50% | 55.00% |
| 23-oct | 37.50% | 7.50% | 55.00% |
| 24-oct | 25.00% | 10.00% | 65.00% |
| 25-oct | 72.50% | 5.00% | 22.50% |
| 26-oct | 92.50% | 7.50% | 0.00% |

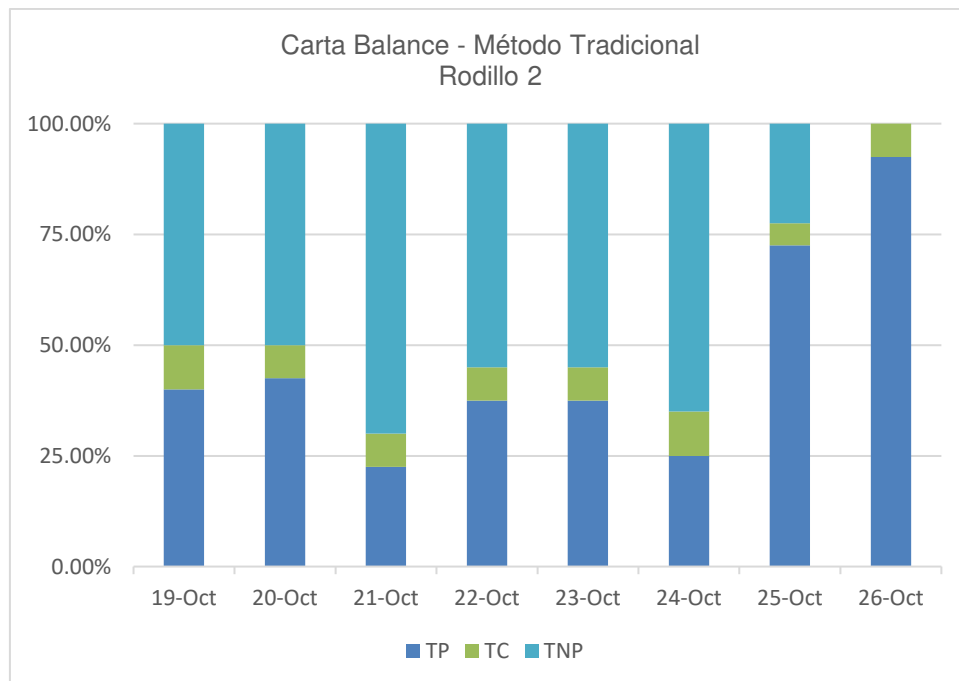


Figura 33. Carta balance - Método tradicional rodillo 2

5.2 Aplicación de la metodología *Lean Construction*

El trabajo de investigación se centra en la aplicación e implementación de las herramientas *Lean Construction* en el desarrollo de la construcción de la vía Carneloz – II Etapa.

5.2.1 Sectorización

Para la sectorización se debe contar con el metrado de todas las partidas del proyecto, para poder dividir de forma proporcional cada sector.

En este caso, y para cuestión de la investigación, la sectorización se realizó de las partidas a investigar: conformación de material de relleno y compactación de relleno.

El procedimiento para realizar la sectorización se describe a continuación:

- a) Se plantea un número tentativo de sectores, el cual depende de las extensiones del proyecto, de la cantidad de personal con el que se espera contar en obra y de las técnicas y procesos constructivos que se utilizarán en obra.

Extensión lineal : 700 ml

Ancho promedio : 28 ml

Sectores : 10 sectores por capa de 150 ml de largo x 14 ml de ancho.

- b) Se procede a delimitar los sectores de la vía en la siguiente figura:

| CAPA | LADO | 1+900 - 2+050 | 2+051 - 2+200 | 2+201 - 2+350 | 2+351 - 2+500 | 2+501 - 2+600 |
|--------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Capa 3 | IZQUIERDO | C3-S1 | C3-S2 | C3-S3 | C3-S4 | C3-S5 |
| | DERECHO | C3-S6 | C3-S7 | C3-S8 | C3-S9 | C3-S10 |
| Capa 4 | IZQUIERDO | C4-S1 | C4-S2 | C4-S3 | C4-S4 | C4-S5 |
| | DERECHO | C4-S6 | C4-S7 | C4-S8 | C4-S9 | C4-S10 |

Figura 34. Sectorización de vía

- c) Luego de ajustar la sectorización con los puntos indicados en el paso anterior, se procedió a revisar que el metrado de las otras partidas (partidas abastecedoras), que en este caso será el transporte y preparación de material, esto se realiza desde los acopios ubicados en los lados laterales de la vía, incluyendo el llenado de los sectores de 150 ml x 14 ml de vía, para una capa

de 0.30 metros, que resulta en 788 m³ de material o su equivalente de 36 viajes.

d) Se sabe que la extensión del sector (de 150 ml) no podrá ser culminada en un día de trabajo (experiencia de la empresa en trabajos previos), por lo que se presentan dos opciones:

- La primera es controlar los avances por días de trabajo.
- La segunda es acortar el sector en 100 ml, lo que implicaría que la motoniveladora trabaje en un área más reducida, lo cual dificulta su manipulación y reduce el rendimiento del equipo.

Debido a estos inconvenientes se optó por la primera opción.

5.2.2 Designación del tren de trabajo

En el proyecto en mención, el trabajo es repetitivo pues los recursos designados a una actividad específica pasan de sector a sector. La realización del tren de trabajo es para las partidas que intervienen en el relleno de material: desde la descarga de material en la plataforma (partida abastecedora), hasta las actividades de conformación y compactación del material.

Por fines del estudio, solo se consideraron las actividades que involucraron trabajos con maquinaria pesada, por lo que los ensayos de liberación de campo no serán considerados en el tren de trabajo (ver Figura 35).

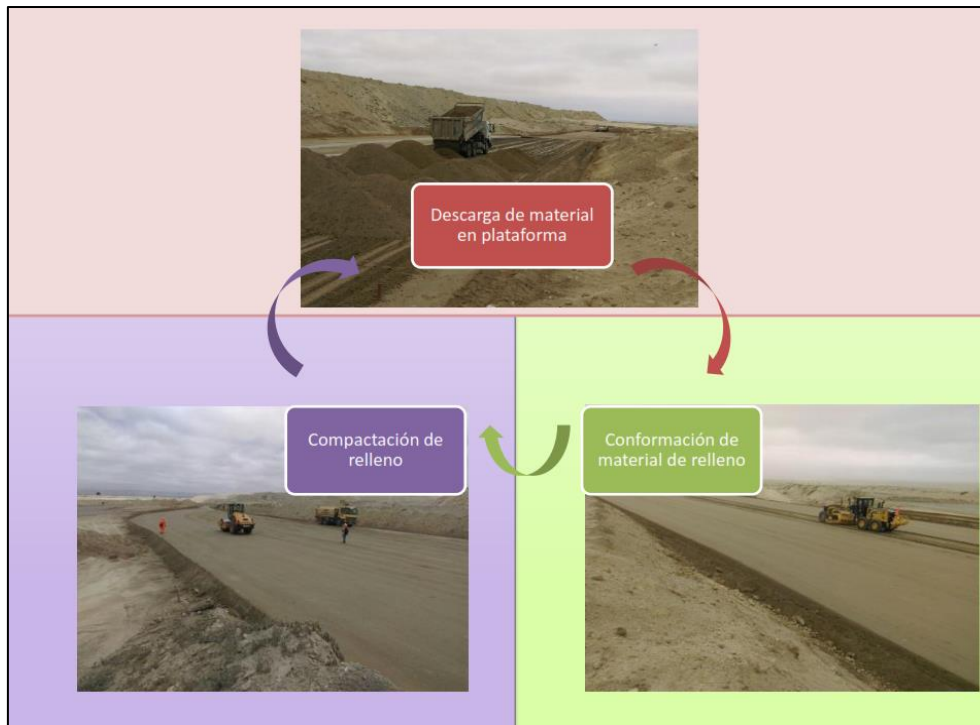


Figura 35. Tren de trabajo del estudio del proyecto

5.2.3 Asignación de recursos

Para el desarrollo de los trabajos designados y de acuerdo con el proceso constructivo se realiza la asignación de recursos, en dos cuadrillas de acuerdo con lo estimado dentro de la planificación inicial.

- a) Conformación de material de relleno: dos motoniveladoras
- b) Compactación de material de relleno: dos rodillos vibratorios de 12 t.

Cada cuadrilla deberá culminar dos sectores en un plazo de tres días de trabajo.

5.2.4 Last Planner

1. Planificación maestra

La elaboración del plan maestro señala los principales acontecimientos para el desarrollo del proyecto. Se tiene en consideración el inicio de los trabajos con el tratamiento de la subrasante (que incluye los trabajos de corte, nivelación, conformación y compactación a nivel de subrasante).

De acuerdo con lo indicado anteriormente; los trabajos de explotación de cantera y traslado de material a acopios temporales se realizaron desde el inicio de actividades, por lo que no se encuentran en la ruta crítica del proyecto.

El proyecto tuvo como fecha inicial el 15 de agosto de 2018 y fecha de término el 12 de diciembre de 2018, con un plazo contractual de 120 días calendario.

Las actividades que se encuentran dentro del estudio son la conformación y compactación de material de relleno, que cuenta con un plazo de 70 días, desde el 28 de septiembre de 2018 al 29 de noviembre de 2018, tal como se detalla en la Figura 36.

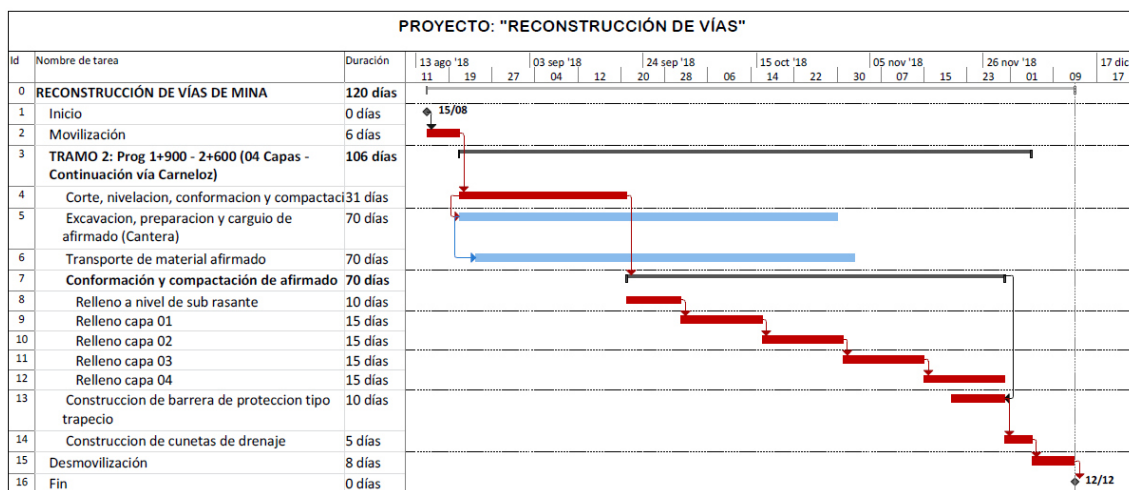


Figura 36. Plan Maestro del Proyecto. Tomada de planeamiento inicial

2. Planificación Lookahead

Para la planificación *Lookahead*, es necesario considerar la sectorización realizada anteriormente y definir en qué sector se trabajará cada día, lo cual simplifica la organización diaria de trabajo.

Se presenta cada sector dividido por capas y se considera que un sector tomará tres días de trabajo.

| ITEM | DESCRIPCION | Unidad | Metrado Contrato | Sem 11 | | | | | | | Sem 12 | | | | | | | Sem 13 | | | | | | | Sem 14 | | | | | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------|--------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | | | 30-oct-18 | 31-oct-18 | 01-nov-18 | 02-nov-18 | 03-nov-18 | 04-nov-18 | 05-nov-18 | 06-nov-18 | 07-nov-18 | 08-nov-18 | 09-nov-18 | 10-nov-18 | 11-nov-18 | 12-nov-18 | 13-nov-18 | 14-nov-18 | 15-nov-18 | 16-nov-18 | 17-nov-18 | 18-nov-18 | 19-nov-18 | 20-nov-18 | 21-nov-18 | 22-nov-18 | 23-nov-18 | 24-nov-18 | 25-nov-18 | 26-nov-18 |
| 3 | COMPACTACIÓN Y RELLENO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.10 | Conformación y compactación de afirmado (base, sub base y capa de rodadura) | m3 | 31,240.76 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Relleno a nivel de sub rasante | m3 | 4,456.91 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Relleno capa 01 | m3 | 6,951.13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Relleno capa 02 | m3 | 6,756.05 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Relleno capa 03 - Lado derecho | m3 | 6,612.04 | C3-S1 | C3-S2 | C3-S3 | C3-S4 | C3-S5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Lado Izquierdo | | | C3-S6 | C3-S7 | C3-S8 | C3-S9 | C3-S10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Relleno capa 04 - Lado derecho | m3 | 6,464.64 | | | | | | | | | | | | C4-S1 | C4-S2 | C4-S3 | C4-S4 | C4-S5 | | | | | | | | | | | | |
| | Lado Izquierdo | | | | | | | | | | | | | | C4-S6 | C4-S7 | C4-S8 | C4-S9 | C4-S10 | | | | | | | | | | | | |

Figura 37. Planificación Lookahead

3. Análisis de restricciones

Se presenta en la Tabla 14, el análisis de restricciones aplicable al proyecto, donde se describe cuáles son las restricciones a las actividades programadas. Es importante definir qué tipo de restricción se presenta, para comprometer a un área el levantamiento de esta y la propuesta de cambio o mejora debe estar acorde a los recursos contemplados para el proyecto.

Tabla 14: Análisis de restricciones

| Actividad | Restricción | Tipo de restricción | Propuesta de cambio y/o mejora |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Conformación y compactación de afirmado | | | |
| Relleno de la capa 2 - Lado derecho | Labores inician tarde (media hora después) | Seguridad / Operaciones | Por la extensión del proyecto, no se logra firmar los documentos de gestión a tiempo. Se ha solicitado a la supervisión considerar un tiempo prudente para la firma de la documentación |
| Relleno de la capa 2 - Lado izquierdo | Se viene trabajando los sectores no definidos Poco control de avance diario | Operaciones | Se realizará una adecuada sectorización |
| | Se viene realizando trabajos en sectores pequeños, lo cual dificulta los trabajos de los equipos. Principalmente de la motoniveladora | Seguridad / Operaciones | Se tendrá longitudes mínimas de 10 metros lineales |
| Abastecimiento de combustible | Se quita tiempo en abastecimiento de combustible | Administrativo | Se dará otro horario para el abastecimiento de los principales equipos (excavadora y motoniveladora) |

4. Carta balance

A continuación, se presentan los datos obtenidos de las muestras recogidas entre los días 28 de octubre al 4 de noviembre. Anexo 3.

a) Motoniveladora 2:

Cantidad de muestras: 8

Duración de la observación: 10 horas

Resultados: descritos en la Tabla 15 y Figura 38

Tabla 15. Resumen de porcentaje de trabajos de Motoniveladora 2 con metodología Lean Construction

| <i>Día</i> | <i>TP</i> | <i>TC</i> | <i>TNP</i> |
|------------|-----------|-----------|------------|
| 28-oct | 80.00% | 7.50% | 12.50% |
| 29-oct | 52.50% | 22.50% | 25.00% |
| 30-oct | 80.00% | 7.50% | 12.50% |
| 31-oct | 70.00% | 7.50% | 22.50% |
| 01-nov | 65.00% | 7.50% | 27.50% |
| 02-nov | 75.00% | 7.50% | 17.50% |
| 03-nov | 42.50% | 25.00% | 32.50% |
| 04-nov | 62.50% | 7.50% | 30.00% |

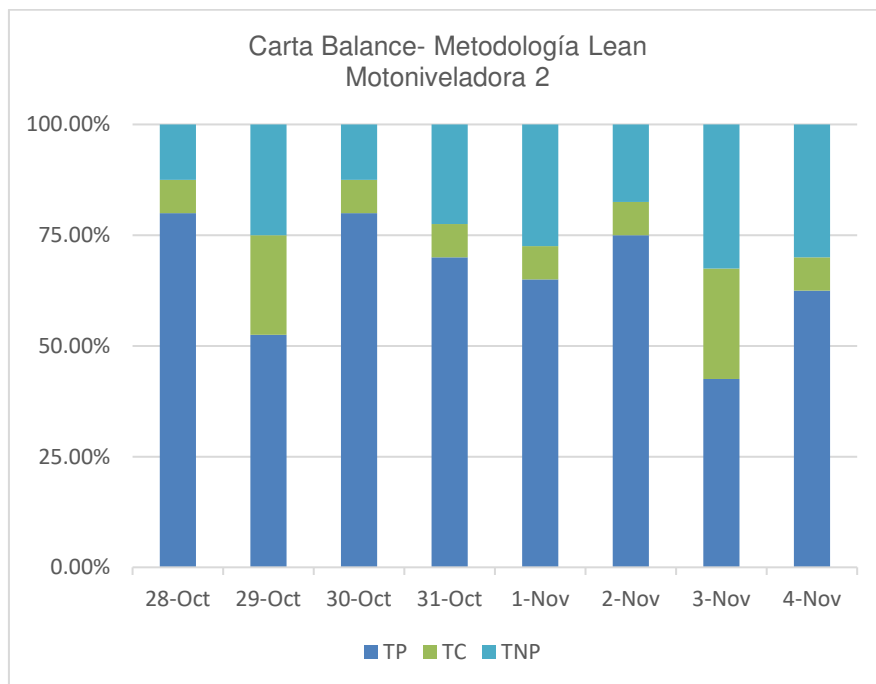


Figura 38. Carta balance - Metodología Lean, motoniveladora 2

b) Motoniveladora 4:

Cantidad de muestras: 8

Duración de la observación: 10 horas

Resultados: descritos en la Tabla 16 y Figura 39.

Tabla 16. Resumen de porcentaje de trabajos de Motoniveladora 4 con metodología Lean Construction

| <i>Día</i> | <i>TP</i> | <i>TC</i> | <i>TNP</i> |
|------------|-----------|-----------|------------|
| 28-oct | 72.50% | 5.00% | 22.50% |
| 29-oct | 67.50% | 20.00% | 12.50% |
| 30-oct | 70.00% | 5.00% | 25.00% |
| 31-oct | 0.00% | 0.00% | 100.00% |
| 01-nov | 77.50% | 5.00% | 17.50% |
| 02-nov | 70.00% | 5.00% | 25.00% |
| 03-nov | 55.00% | 22.50% | 22.50% |
| 04-nov | 62.50% | 5.00% | 32.50% |

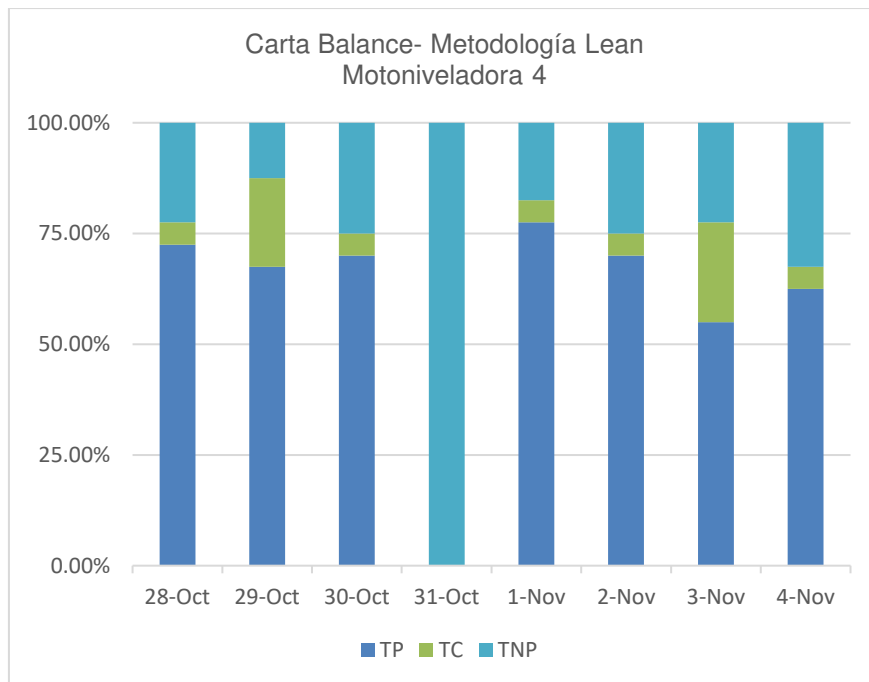


Figura 39. Carta balance - Metodología Lean, motoniveladora 4

c) Rodillo 1:

Cantidad de muestras: 8

Duración de la observación: 10 horas

Resultados: descritos en la Tabla 17 y Figura 40.

Tabla 17. Resumen de porcentaje de trabajos de Rodillo 1 con metodología Lean Construction

| <i>Día</i> | <i>TP</i> | <i>TC</i> | <i>TNP</i> |
|------------|-----------|-----------|------------|
| 28-oct | 77.50% | 7.50% | 15.00% |
| 29-oct | 55.00% | 22.50% | 22.50% |
| 30-oct | 72.50% | 7.50% | 20.00% |
| 31-oct | 55.00% | 10.00% | 35.00% |
| 01-nov | 60.00% | 10.00% | 30.00% |
| 02-nov | 65.00% | 7.50% | 27.50% |
| 03-nov | 77.50% | 7.50% | 15.00% |
| 04-nov | 70.00% | 7.50% | 22.50% |

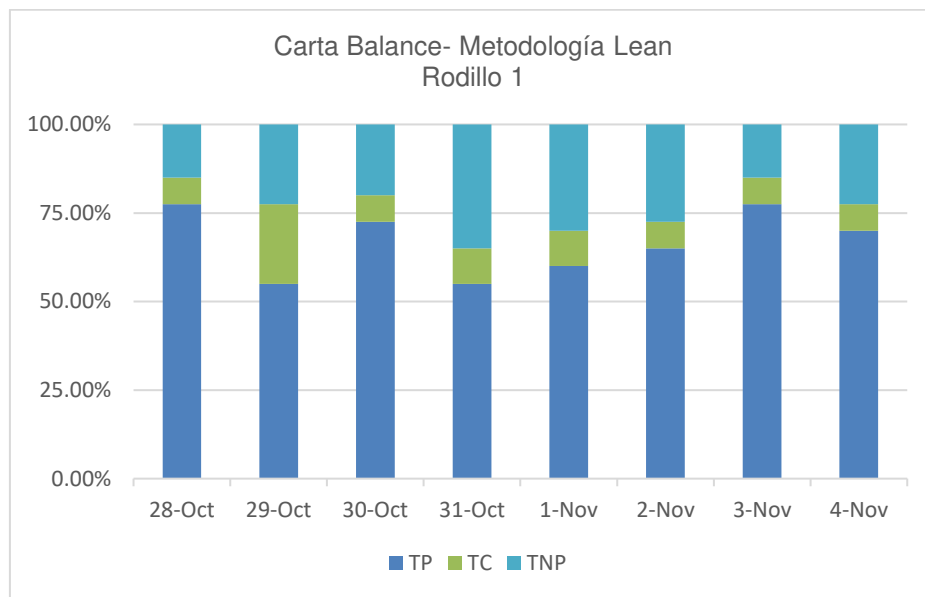


Figura 40. Carta balance - Metodología Lean, rodillo 1

d) Rodillo 2:

Cantidad de muestras: 8

Duración de la observación: 10 horas

Resultados: Descritos en la Tabla 16 y Figura 41. **Carta balance - Metodología Lean, rodillo 2**

Tabla 18. Resumen de porcentaje de trabajos de Rodillo 2 con metodología Lean Construction

| Día | TP | TC | TNP |
|-----------------|---------------|--------------|---------------|
| 28-oct | 72.50% | 7.50% | 20.00% |
| 29-oct | 75.00% | 25.00% | 0.00% |
| 30-oct | 70.00% | 7.50% | 22.50% |
| 31-oct | 32.50% | 7.50% | 60.00% |
| 01-nov | 60.00% | 7.50% | 32.50% |
| 02-nov | 62.50% | 7.50% | 30.00% |
| 03-nov | 77.50% | 7.50% | 15.00% |
| 04-nov | 70.00% | 7.50% | 22.50% |
| Promedio | 65.00% | 9.69% | 25.31% |

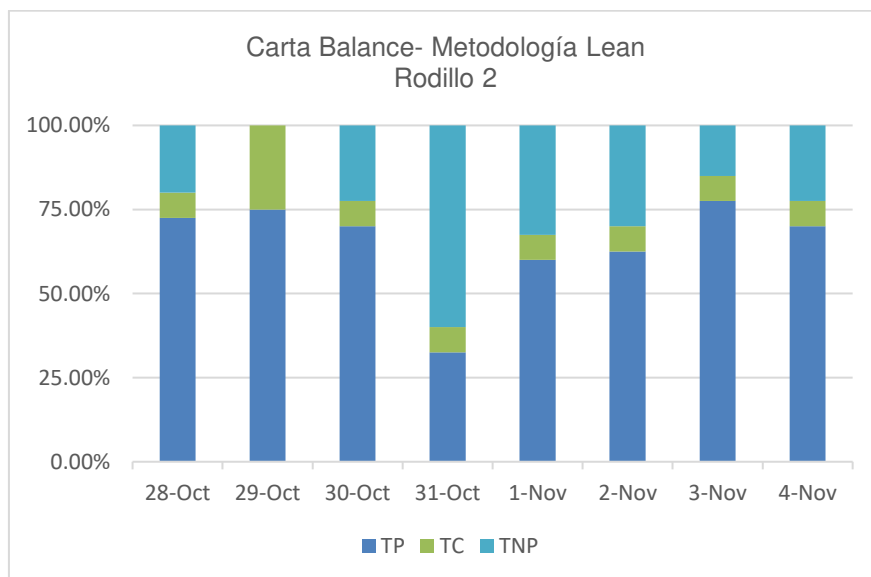


Figura 41. Carta balance - Metodología Lean, rodillo 2

5. Programación y control semanal

La planificación semanal refleja que la actividad de preparación y mezcla de material para relleno logró superar el metrado comprometido en la semana, así mismo la actividad de relleno de capa superó en 8% el programado semanal.

| Proyecto: Reconstrucción de Vías de Acceso Mina 4ta Etapa | | | | Planificación Semanal | | |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------|-----------------------|-------|----------------|
| Item / Código | Descripción de la Tarea | Responsable | Unidad | Cumplimiento | | "1" Logrado |
| | | | | Comprometido | Real | "0" No Logrado |
| | Preparación y mezcla de material para relleno | A. Albuja | m3 | 3,780 | 4,000 | 1 |
| | Transporte interno de material (desde acopio hacia plataforma) | A. Albuja | m3 | 3,780 | 4,104 | 1 |
| | Conformación y compactación de afirmado (base, sub base y capa de rodadura) | | | | | |
| | Relleno de la capa 02 - Lado derecho | A. Albuja | m3 | 1,575 | 1,710 | 1 |
| | Relleno de la capa 02 - Lado izquierdo | A. Albuja | m3 | 1,575 | 1,710 | 1 |
| | | Total Logrado (Suma de "1") | | | | 4 |
| | | % de Cumplimiento PPC (suma de "1"/Nº total de actividades) | | | | 100% |
| | | | | | | 4 |

Figura 42. Plan semanal con metodología Lean Construction

Se adjunta en los anexos los reportes semanales del proyecto, que presentan el desenvolvimiento del avance general y principalmente muestra los cambios en el rendimiento programado versus el rendimiento ejecutado de la partida de conformación y compactación de material de relleno en vía.

6. Porcentaje de plan cumplido (PPC)

La aplicación de las herramientas del *Lean Construction*, permite alcanzar las estimaciones realizadas del planeamiento de actividades para la presente semana de control. En la Figura 43 se observa que, de las 4 actividades programadas, se han cumplido las 4 satisfactoriamente. Por lo tanto, se obtiene un 100% de cumplimiento, indicador que expresa una alta confiabilidad en el cumplimiento de actividades (ver Figura 44).

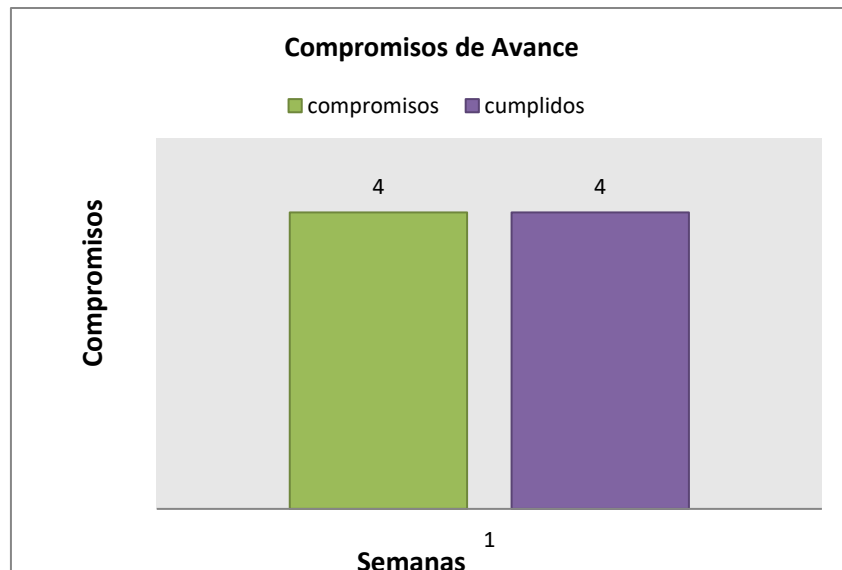


Figura 43. Compromisos de avance

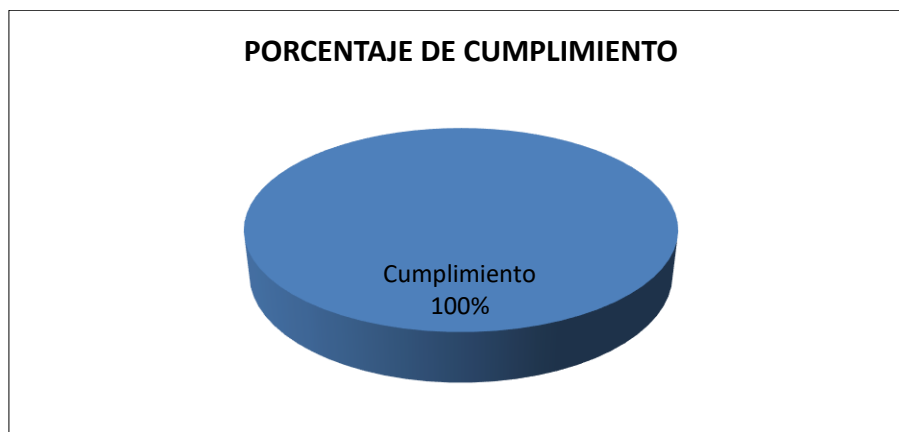


Figura 44. Porcentaje de cumplimiento

7. Control de avance por lote de producción

A continuación, se presenta el cuadro de avance por lotes de producción, donde se obtiene, de acuerdo con los sectores establecidos anteriormente, que la capa 3 de la vía culminó en 14 días de trabajo, con un relleno total de 6612 m³ de material, obteniendo un rendimiento de 472 m³/día.

| CAPA | LADO | 1+900 - 2+050 | 2+051 - 2+200 | 2+201 - 2+350 | 2+351 - 2+500 | 2+501 - 2+600 |
|--------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Capa 3 | IZQUIERDO | 28/10 al 30/10 | 30/10 al 01/11 | 02/11 al 03/11 | 04/10 al 07/11 | 08/11 al 10/11 |
| | DERECHO | 28/10 al 29/10 | 29/10 al 31/10 | 31/10 al 02/11 | 03/11 al 05/11 | 06/11 al 09/11 |

Figura 45. Avance por lote de producción

5.3 Resumen de resultados

La determinación de la prueba estadística para el análisis estadístico a emplearse en la presente investigación determina la evaluación preliminar de las muestras en función a que siguen una distribución normal.

Prueba de Normalidad: para probar que las variables en estudio están distribuidas normalmente se aplicó la prueba de *Shapiro Wilks* debido a que la muestra es menor a 25, al 5% de nivel de significancia (α), planteando las siguientes hipótesis estadísticas:

Ho: las variables en estudio siguen una distribución normal.

H1: las variables en estudio no siguen una distribución normal.

Tabla 19. Prueba no paramétrica de Shapiro- Wilk

| Proceso | Método | Shapiro-Wilk | | | |
|----------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|---------|---------|
| | | Estadístico | gl | Sig. | |
| Conformación | Tradicional | Rendimiento | ,932 | 7 ,566 | |
| | <i>Lean Construction</i> | Rendimiento | ,552 | 5 ,000 | |
| | Tradicional | Tiempo productivo | ,895 | 16 ,066 | |
| | | Tiempo contributorio | ,717 | 16 ,000 | |
| | | Tiempo no productivo | ,943 | 16 ,385 | |
| | <i>Lean Construction</i> | Tiempo productivo | ,746 | 16 ,001 | |
| | | Tiempo contributorio | ,770 | 16 ,001 | |
| | | Tiempo no productivo | ,577 | 16 ,000 | |
| | Compactación | Tradicional | Tiempo productivo | ,920 | 16 ,168 |
| | | | Tiempo contributorio | ,703 | 16 ,000 |
| | | | Tiempo no productivo | ,930 | 16 ,241 |
| | | <i>Lean Construction</i> | Tiempo productivo | ,850 | 16 ,014 |
| Tiempo contributorio | | | ,487 | 16 ,000 | |
| Tiempo no productivo | | | ,887 | 16 ,050 | |

Como se observa en la Tabla 19 la prueba de normalidad de *Shapiro Wilks* realizada a los datos de la investigación determinan que las variables de rendimiento, tiempo productivo y no productivo de los procesos de conformación y compactación del método tradicional siguen una distribución normal. Del mismo modo, se determina por el valor de significancia que todos los demás datos de la investigación no siguen una distribución normal.

Estadística Descriptiva. Se analizaron los resultados en cada uno de los tiempos: productivo, contributorio y no productivo y en cada uno de los procesos de conformación y compactación con la aplicación del método tradicional y con la aplicación del *Lean Construction*.

Proceso de conformación

En la dimensión **tiempo productivo** se observó (ver Tabla 20) que, aplicando el método tradicional, el tiempo promedio fue de 39,22% y la distribución de las puntuaciones es dispersa (coeficiente de variación = 73,15%) y al aplicar *Lean Construction* el tiempo promedio aumenta a 62.66% y se concentran las puntuaciones (coeficiente de variación = 31,3%). Estos resultados indican que con la aplicación de *Lean Construction* mejora significativamente el tiempo productivo en el proceso de conformación (ver Figura 46).

Tabla 20. Proceso de conformación: medidas descriptivas

| | Método | | | | | |
|----------------------|-------------|---------------------|---------------------------|-------------------|---------------------|---------------------------|
| | Tradicional | | | Lean construction | | |
| | Media | Desviación estándar | Coefficiente de variación | Media | Desviación estándar | Coefficiente de variación |
| Tiempo productivo | 39.22 | 28.69 | 73.15% | 62.66 | 19.59 | 31.3% |
| Tiempo contributorio | 22.34 | 25.67 | 87.03% | 10 | 7.75 | 77.5% |
| Tiempo no productivo | 38.44 | 24.9 | 64.78% | 27.34 | 20.46 | 74.8% |

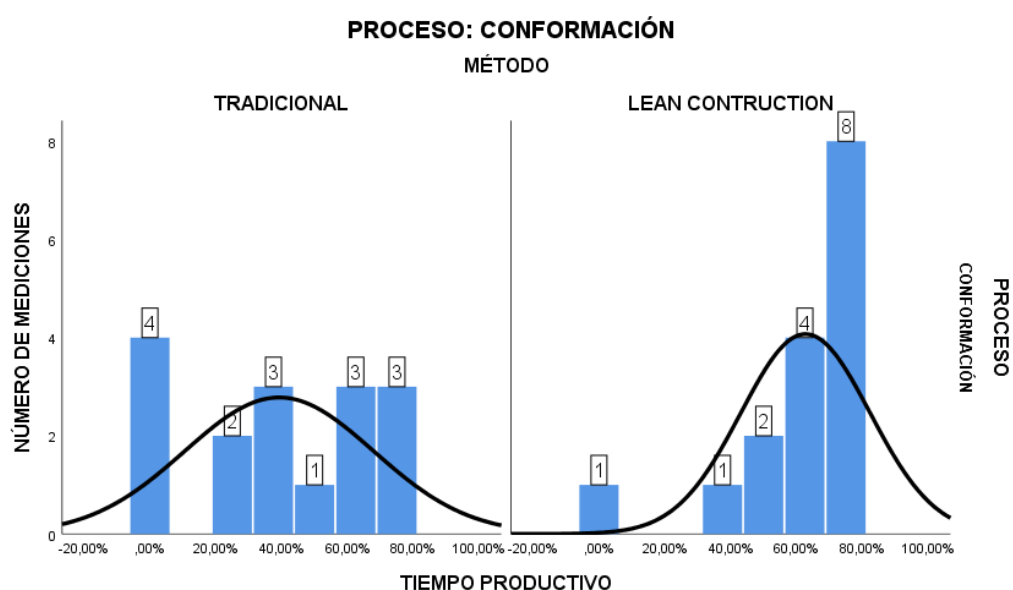


Figura 46. Proceso de conformación: histograma de frecuencias de tiempo productivo

En la segunda dimensión, **tiempo contributorio**, se observó (ver Tabla 20) que, al aplicar el método tradicional, el tiempo promedio fue de 22,34% y la distribución de las puntuaciones es también dispersa (coeficiente de variación = 87,03%); además, se encontró que 31%, 5 de 16 observaciones, han obtenido tiempos mayores al promedio. Al aplicar *Lean Construction* el tiempo promedio disminuye a 10,00% y se concentran las puntuaciones (coeficiente de variación = 77,5%) a puntuaciones menores. Estos resultados indican que con la aplicación de *Lean Construction* se mejora significativamente el tiempo contributorio en el proceso de conformación (ver Figura 47).

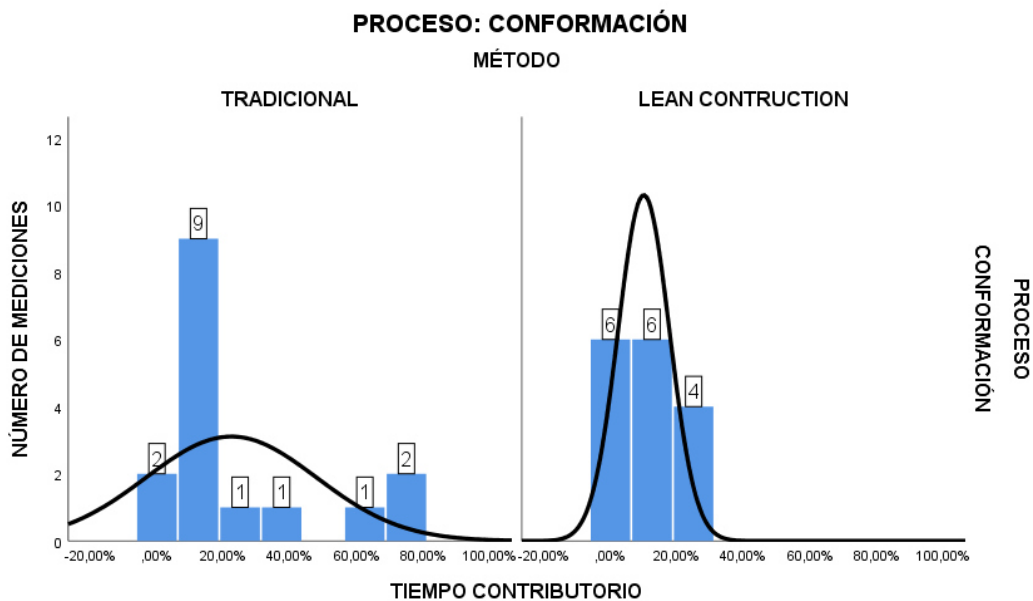


Figura 47. Proceso de conformación: histograma de frecuencias de tiempo contributorio

En la tercera dimensión, **tiempo no productivo**, se observó (ver Tabla 20) que, al aplicar el método tradicional, el tiempo promedio fue de 38,44% y la distribución de las puntuaciones es también dispersa (coeficiente de variación = 64,78%); además, se encontró que 69%, 11 de 16 observaciones, han obtenido tiempos mayores al promedio.

Al aplicar *Lean Construction* el tiempo promedio disminuye a 27,34% y se concentran en puntuaciones menores a 40%. Estos resultados indican que con la aplicación de *Lean Construction* se mejora significativamente el tiempo no productivo en el proceso de conformación (ver Figura 48).

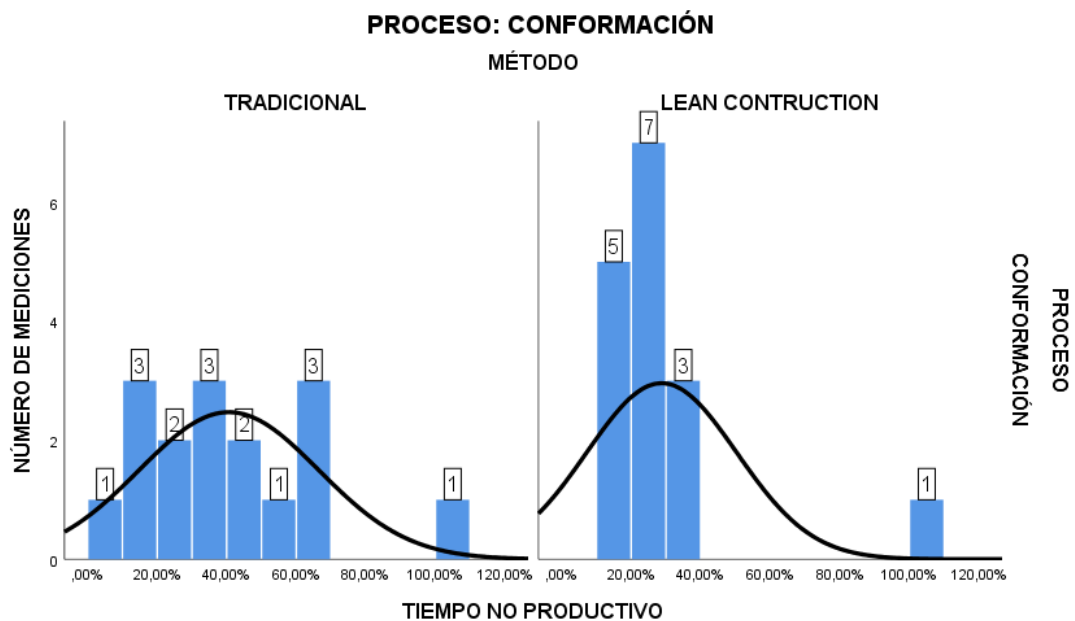


Figura 48. Proceso de conformación: histograma de frecuencias de tiempo no productivo

Proceso de compactación

En la dimensión, **tiempo productivo**, (ver Tabla 20.) el tiempo promedio fue de 27,67% aplicando el método tradicional, la distribución de las puntuaciones es dispersa (coeficiente de variación = 64,15%) y al aplicar *Lean Construction* el tiempo promedio aumenta a 65,78% y se concentran las puntuaciones (coeficiente de variación = 17,8%). Estos resultados indican que con la aplicación de *Lean Construction* se mejora significativamente el tiempo productivo en el proceso de compactación (ver Figura 49).

Tabla 21. Proceso de compactación: medidas descriptivas

| | Método | | | | | |
|----------------------|-------------|---------------------|-------------------------|-------------------|---------------------|-------------------------|
| | Tradicional | | | Lean Construction | | |
| | Media | Desviación estándar | Coficiente de Variación | Media | Desviación estándar | Coficiente de variación |
| Tiempo productivo | 43.13 % | 27.67% | 64.15% | 65.78% | 11.72% | 17.8% |
| Tiempo contributorio | 6.88% | 2.96% | 43.0% | 9.84% | 5.51% | 56.0% |
| Tiempo no productivo | 50.00 % | 29.05% | 58.11% | 24.38% | 12.73% | 52.2% |

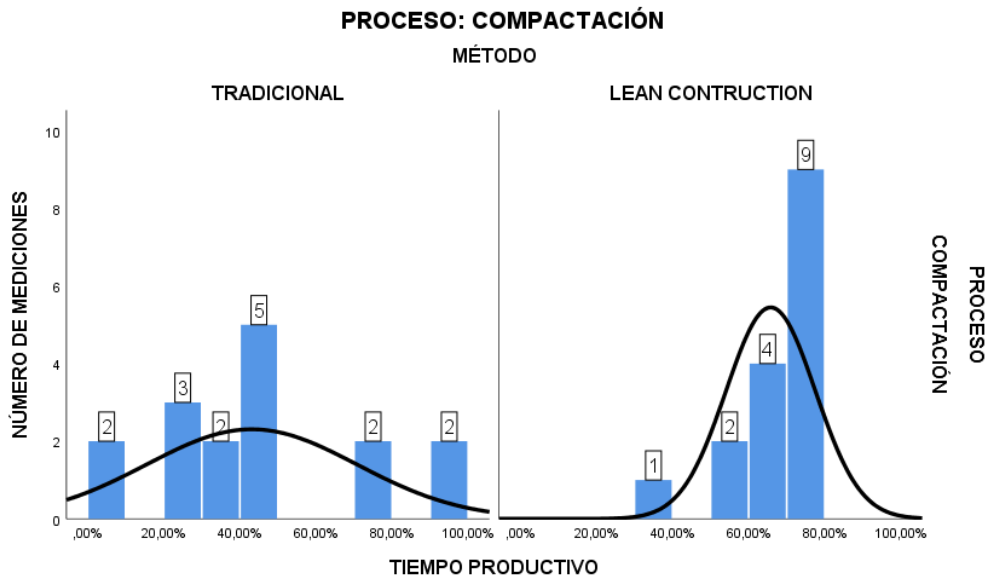


Figura 49. Proceso de compactación: histograma de frecuencias de tiempo productivo

El tiempo promedio fue de 6,88% en la dimensión **tiempo contributorio** (ver Tabla 21), al aplicar el método tradicional, la distribución de las puntuaciones es poco dispersa (coeficiente de variación = 43%) y al aplicar *Lean Construction* el tiempo promedio aumenta a 9,84% y se dispersan más las puntuaciones (coeficiente de variación = 56%). Estos resultados indican que con la aplicación de *Lean Construction* no se mejora significativamente el tiempo productivo en el proceso de conformación (ver Figura 50).

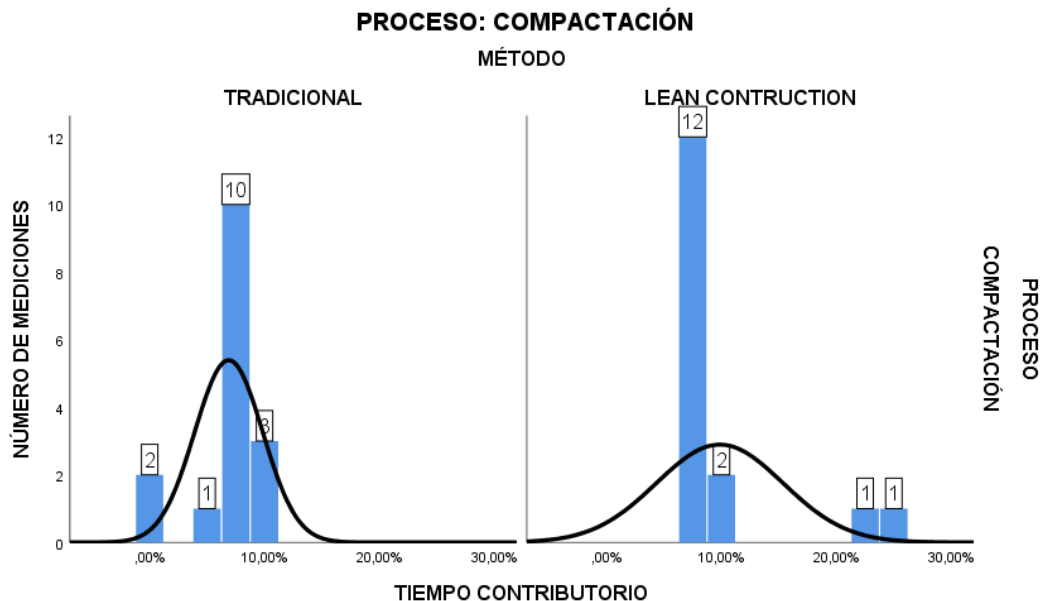


Figura 50. Proceso de compactación: histograma de frecuencias de tiempo contributorio

En la dimensión **tiempo no productivo** (ver Tabla 21), el tiempo promedio fue de 50% aplicando el método tradicional, la distribución de las puntuaciones es dispersa (coeficiente de variación = 58,11%) y al aplicar *Lean Construction* el tiempo promedio disminuye a 24,38% y se concentran las puntuaciones (coeficiente de variación = 52,2%).

Estos resultados indican que con la aplicación de *Lean Construction* se mejora significativamente el tiempo productivo en el proceso de compactación (ver Figura 51).

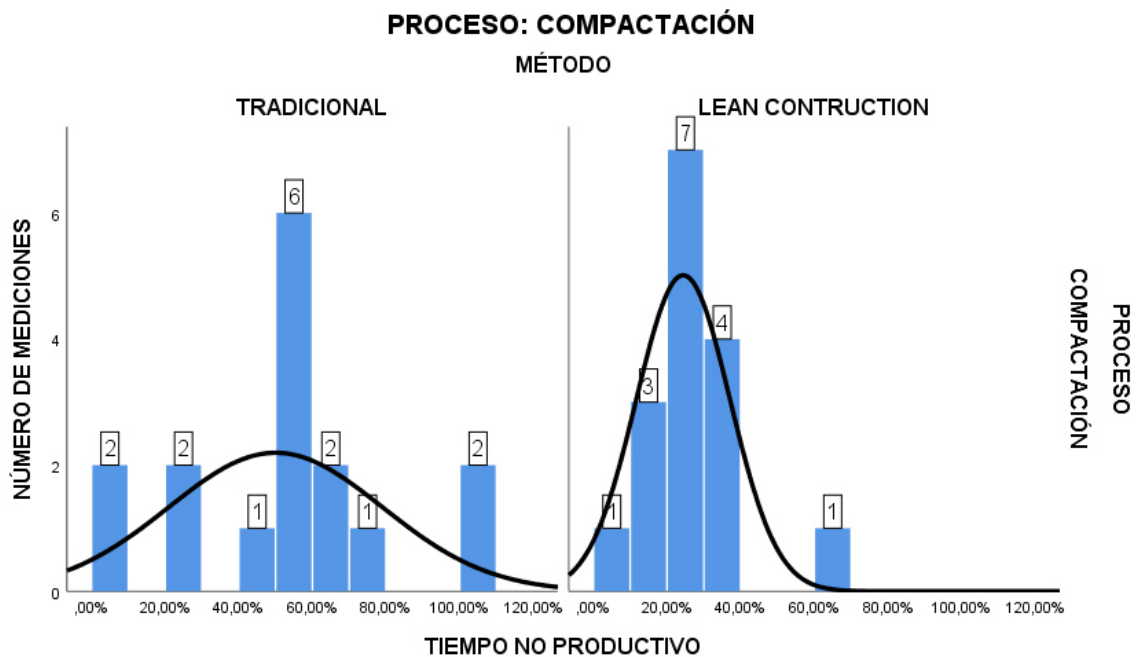


Figura 51. Proceso de compactación: histograma de frecuencias de tiempo no productivo

5.4 Prueba de hipótesis

5.4.1. Prueba de hipótesis general

La hipótesis general planteada como “La aplicación de la metodología *Lean Construction* mejora en el rendimiento de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar”, se aplicó la prueba no paramétrica U de Mann Whitney, dado que una de las variables no sigue distribución normal (ver Anexo 1). Se plantearon las siguientes hipótesis estadísticas:

Ho: el proceso de la metodología *Lean Construction* no mejora en el rendimiento de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar ($\mu_1 \leq \mu_2$)

H1: el proceso de la metodología *Lean Construction* sí mejora en el rendimiento de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar ($\mu_1 > \mu_2$).

Con los resultados que se muestran en la Tabla 22, que concluye al 5% de significancia, existe evidencia significativa para afirmar que el proceso de la metodología *Lean Construction* sí mejora en el rendimiento de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar (Valor $p = 0,005 < \alpha = 0,05$, se rechaza Ho).

Tabla 22. Estadísticos de prueba

| | Rendimiento |
|-------------------------------|-------------------|
| U de Mann-Whitney | 1,500 |
| Z | -2,655 |
| Valor p [2*(sig. unilateral)] | ,005 ^b |

a. Variable de agrupación: método

b. No corregido para empates.

En la Tabla 23 se observa que con la aplicación de *Lean Construction* el rendimiento promedio es significativamente mayor, la distribución (ver Figura 52) y dispersión de sus mediciones se reduce significativamente, de 42% (146/347%) en el método tradicional a 16%, (101/630%) con *Lean Construction*, y más del 50% de las mediciones son mayores que el promedio (mediana = 675m³). Con estos resultados se muestra la mejora significativa del rendimiento con la aplicación de *Lean Construction*.

Tabla 23. Rendimiento: medidas descriptivas

| | | Método | | |
|-------------|--------------------------|--------|---------------------|---------|
| | | Media | Desviación estándar | Mediana |
| Rendimiento | Tradicional | 347 | 146 | 360 |
| | <i>Lean Construction</i> | 630 | 101 | 675 |

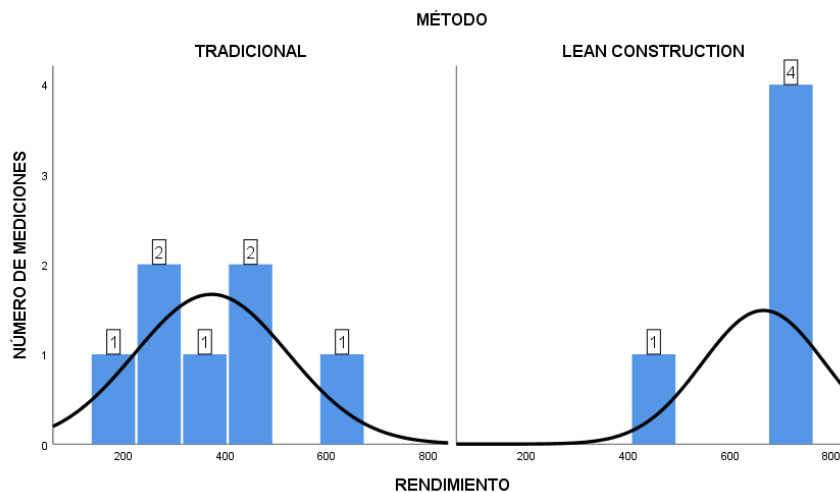


Figura 52. Histograma de frecuencias de rendimiento (m³)

Prueba de hipótesis específicas

La primera hipótesis estadística “La aplicación de la metodología *Lean Construction* mejora el tiempo productivo de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar”, se contrastó con la prueba no paramétrica U de Mann Whitney de la diferencia de dos medias de muestras independientes, debido que una de las variables no sigue distribución normal (ver Anexo 2). Se plantearon las siguientes hipótesis:

Ho: el proceso de la metodología *Lean Construction* no mejora el tiempo productivo de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar.

H1: el proceso de la metodología *Lean Construction* sí mejora el tiempo productivo de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar.

Los resultados de la prueba se muestran en las Tabla 24 y 25 donde se concluye al 5% de significancia (α) que el proceso de la metodología *Lean Construction* sí mejora significativamente en el tiempo productivo de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar (valor $p < \alpha = 0,05$ se rechaza Ho).

| | Tiempo productivo |
|-----------------------------------|-------------------|
| U de Mann-Whitney | 64,000 |
| Z | -2,421 |
| Valor p [2*(sig. unilateral)] | ,015 ^c |
| a. Proceso = conformación | |
| b. Variable de agrupación: método | |
| c. No corregido para empates. | |

| | Tiempo productivo |
|-----------------------------------|-------------------|
| U de Mann-Whitney | 61,000 |
| Z | -2,532 |
| Valor p [2*(sig. unilateral)] | ,011 ^c |
| a. Proceso = compactación | |
| b. Variable de agrupación: método | |
| c. No corregido para empates. | |

La segunda hipótesis estadística “La aplicación de la metodología *Lean Construction* mejora en el tiempo contributivo de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar”, se contrastó con la prueba no paramétrica U de Mann Whitney de la diferencia de dos medias de muestras independientes debido que una de las variables no sigue distribución normal (ver Anexo 2). Se plantearon las siguientes hipótesis:

Ho: el proceso de la metodología *Lean Construction* no mejora el tiempo contributivo de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar.

H1: el proceso de la metodología *Lean Construction* sí mejora el tiempo contributivo de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar.

Los resultados de la prueba se muestran en las Tabla 26 y 27 donde se concluye al 5% de significancia (α) que el proceso de la metodología *Lean Construction* no mejora significativamente el tiempo contributivo de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar (valor p > $\alpha = 0,05$ no se rechaza Ho).

| | Tiempo contributivo |
|-----------------------------------|---------------------|
| U de Mann-Whitney | 88,000 |
| Z | -1,581 |
| Valor p [2*(sig. unilateral)] | ,138 ^c |
| a. Proceso = conformación | |
| b. Variable de agrupación: método | |
| c. No corregido para empates. | |

| | Tiempo contributivo |
|-----------------------------------|---------------------|
| U de Mann-Whitney | 99,000 |
| Z | -1,334 |
| Valor p [2*(sig. unilateral)] | ,287 ^c |
| a. Proceso = compactación | |
| b. Variable de agrupación: método | |
| c. No corregido para empates. | |

La tercera hipótesis estadística “La aplicación de la metodología *Lean Construction* mejora en el tiempo no productivo de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar”, se contrastó con la prueba no paramétrica U de Mann Whitney de la diferencia de dos medias de muestras independientes debido que una de las variables no sigue distribución normal (ver Anexo 2). Se plantearon las siguientes hipótesis:

Ho: el proceso de la metodología *Lean Construction* no disminuye el tiempo no productivo de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar.

H1: el proceso de la metodología *Lean Construction* sí disminuye el tiempo no productivo de los trabajos de conformación y compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar.

Los resultados de la prueba se muestran en las Tabla 28 y 29 donde se concluye al 5% de significancia (α) que el proceso de la metodología *Lean Construction* no mejora significativamente en el tiempo no productivo de los trabajos de conformación (valor $p = 0,08 > \alpha = 0,05$ no se rechaza Ho) y sí mejora significativamente el tiempo no productivo de los trabajos de compactación de relleno en carreteras de la mina Bayóvar (valor $p = 0,007 < \alpha = 0,05$ se rechaza Ho).

| | Tiempo no productivo |
|-----------------------------------|----------------------|
| U de Mann-Whitney | 81,000 |
| Z | -1,776 |
| Sig. asintótica(bilateral) | ,076 |
| Valor p [2*(sig. unilateral)] | ,080 ^c |
| a. Proceso = conformación | |
| b. Variable de agrupación: método | |
| c. No corregido para empates. | |

| | Tiempo no productivo |
|-----------------------------------|----------------------|
| U de Mann-Whitney | 57,000 |
| Z | -2,687 |
| Sig. asintótica(bilateral) | ,007 |
| Valor p [2*(sig. unilateral)] | ,007 ^c |
| a. Proceso = compactación | |
| b. Variable de agrupación: método | |
| c. No corregido para empates. | |

5.5 Discusión de resultados

Los hallazgos obtenidos a partir de los resultados en la presente investigación permiten evidenciar que la aplicación de un proceso planificado, controlado y

centrado en la reducción de pérdidas que te permite el *Lean Construction* ofrece implicancias positivas en la mejora en el rendimiento de los procesos de conformación y compactación en la construcción de la vía Carneloz para la mina Bayóvar.

Teniendo en cuenta los valores en porcentaje del tiempo productivo (TP), el tiempo contributorio (TC) y el tiempo no productivo (TNP) obtenidos a partir de mediciones directas en campo respecto a labores de conformación, empleando tanto la metodología del *Lean Construcción* así como el método tradicional; se obtienen que, aplicando el método tradicional, el *tiempo productivo (TP)* promedio fue de 39,22% y la distribución de las puntuaciones es dispersa (coeficiente de variación = 73,15%) y, al aplicar la metodología *Lean Construction* el tiempo promedio aumenta a 62.66 % y se concentran las puntuaciones (coeficiente de variación = 31,3%). Estos resultados indican que con la aplicación de *Lean Construction* mejora significativamente el tiempo productivo en el proceso de conformación (ver Tabla 30).

Tabla 30: Resumen de porcentaje de tiempo productivo (TP) en conformación

| Método | Porcentaje (TP) |
|--------------------------|-----------------|
| Tradicional | 39.22% |
| <i>Lean Construction</i> | 62.66% |

Estos resultados indican que con la aplicación de la metodología *Lean Construction* se mejora en más de 30% en el tiempo productivo del proceso de conformación respecto al tiempo productivo empleado en el proceso de conformación con el método tradicional.

De los resultados obtenidos, se comprueba lo señalado por Revilla, que manifiesta la importancia de contar con un adecuado control de actividades teniendo en cuenta los niveles de productividad y eficiencia en los procesos constructivos aplicando la metodología del *Lean Construction*.

Respecto al **tiempo contributorio (TC)** en las labores de conformación se obtiene que al aplicar el método tradicional el tiempo promedio fue de 22,34% y la distribución de las puntuaciones es también dispersa (coeficiente de variación

= 87,03%), además se encontró que 31%, 5 de 16 observaciones, han obtenido tiempos mayores al promedio. Al aplicar *Lean Construction* el tiempo promedio disminuye a 10,00% y se concentran las puntuaciones (coeficiente de variación = 77,5%) a puntuaciones menores. Estos resultados indican que con la aplicación de la metodología *Lean Construction* se disminuye significativamente el tiempo contributorio en el proceso de conformación respecto a la aplicación del método tradicional.

Tabla 31: Resumen porcentaje de tiempo contributorio (TC) en conformación

| Método | Porcentaje (TC) |
|--------------------------|-----------------|
| Tradicional | 22.34% |
| <i>Lean Construction</i> | 10.00% |

En relación con el *tiempo no productivo (TNP)* se determinó que, al aplicar el método tradicional, el tiempo promedio fue de 38,44% y la distribución de las puntuaciones es también dispersa (coeficiente de variación = 64,78%); además, se encontró que 69%, 11 de 16 observaciones, han obtenido tiempos mayores al promedio. Al aplicar la metodología *Lean Construction* el tiempo promedio disminuye a 27,34% y se concentran en puntuaciones (coeficiente de variación = 74,8%) a puntuaciones menores. Estos resultados indican que con la aplicación de *Lean Construction* se disminuye significativamente el tiempo no productivo en el proceso de conformación.

Tabla 32: Resumen porcentaje de tiempo no productivo (TNP) en conformación

| Método | Porcentaje (TNP) |
|--------------------------|------------------|
| Tradicional | 38.44% |
| <i>Lean Construction</i> | 27.34% |

Los resultados indican que con la aplicación de la metodología de *Lean Construction* se disminuye significativamente el tiempo contributorio y el tiempo no productivo en el proceso de conformación, respecto a los resultados obtenidos empleando el método tradicional.

En relación a los resultados, se refrenda lo indicado por Ribon, quien señala que la implementación y aplicación de la metodología de *Lean Construction*

arrojó resultados favorables en cuanto a la gestión administrativa, proceso de planeación y ejecución del proyecto; se evidenció una reducción considerable en las pérdidas generadas durante el proceso constructivo y, por consiguiente, una mejora en la productividad. (3)

En el proceso de compactación, el promedio del **tiempo productivo** fue de 43,13% aplicando el método tradicional, la distribución de las puntuaciones es dispersa (coeficiente de variación = 64,15%) y, al aplicar la metodología de *Lean Construction* el tiempo promedio aumenta a 65,78% y se concentran las puntuaciones (coeficiente de variación = 17,8%). Estos resultados indican que con la aplicación de *Lean Construction* se mejora significativamente el tiempo productivo en el proceso de compactación frente al tiempo productivo empelando el método tradicional en el proceso de compactación.

Tabla 33: Resumen porcentaje de tiempo productivo (TP) en compactación

| Método | Porcentaje (TP) |
|--------------------------|-----------------|
| Tradicional | 43.13% |
| <i>Lean Construction</i> | 65.78% |

Estos resultados indican que con la aplicación de la metodología de *Lean Construction* se mejora en más de 25% en el tiempo productivo del proceso de compactación, respecto al tiempo productivo empleado en el proceso de compactación con el método tradicional.

Se refrenda lo manifestado por Canturin y Siucho, cuyos resultados en su investigación determinaron que la aplicación de la metodología de *Lean Construction* ha permitido elevar la productividad de los equipos en función a la disminución del tiempo de operaciones. (4)

Respecto al *tiempo contributorio* en las labores de compactación se obtiene que, al aplicar el método tradicional, el tiempo promedio fue de 6,88% y la distribución de las puntuaciones es poco dispersa (coeficiente de variación = 43%) y al aplicar la metodología de *Lean Construction* el tiempo promedio aumenta a 9,84% y se dispersan más las puntuaciones (coeficiente de variación

= 56%). Estos resultados nos indican que con la aplicación de la metodología de *Lean Construction* el tiempo contributorio no muestra una variación significativa en el proceso de conformación respecto al método tradicional.

Tabla 34: Resumen porcentaje de tiempo contributorio (TC) en compactación

| Método | Porcentaje (TC) |
|--------------------------|-----------------|
| Tradicional | 6.88% |
| <i>Lean Construction</i> | 9.84% |

En relación con el **tiempo no productivo** se determinó que, al aplicar el método tradicional, el tiempo promedio fue de 50% y la distribución de las puntuaciones es dispersa (coeficiente de variación = 58,11%). Al aplicar *Lean Construction* el tiempo promedio disminuye a 24,38% y se concentran las puntuaciones (coeficiente de variación = 52,2%). Estos resultados indican que con la aplicación de *Lean Construction* se disminuye significativamente el tiempo no productivo en el proceso de compactación.

Tabla 35: Resumen porcentaje de tiempo no productivo (TNP) en compactación

| Método | Porcentaje (TNP) |
|--------------------------|------------------|
| Tradicional | 50.00% |
| <i>Lean Construction</i> | 24.38% |

Los resultados indican que con la aplicación de la metodología del *Lean Construction* se disminuye significativamente el tiempo no productivo y en el caso del tiempo contributorio mantiene una diferencia no significativa en el proceso de compactación.

Respecto al rendimiento representado en metros cúbicos de material conformado y compactado en los 700 metros del alcance de esta investigación, se obtiene que, con la aplicación de la metodología de *Lean Construction*, el rendimiento promedio es significativamente mayor, la distribución y dispersión de sus mediciones se reducen significativamente de 42%, (146/347%) en el método tradicional a 16%, (101/630%) con *Lean Construction*, y más del 50% de las mediciones son mayores que el promedio (mediana = 675m³). Con estos

resultados se muestra la mejora significativa del rendimiento con la aplicación de *Lean Construction*.

Los resultados obtenidos en la mejora en el rendimiento empleando la metodología de *Lean Construction* coinciden con lo señalado por Gonzales, respecto al enfoque de la metodología de *Lean Construction* que sigue parámetros necesarios a implantar en los procesos constructivos que permitan realizar seguimientos a las actividades internas, reducir los tiempos de ciclos en los procesos constructivos y evitar atrasos en la planificación del proyecto. Del mismo modo Guzmán, concluye que la aplicación de la metodología de *Lean Construction* muestra resultados favorables en el desarrollo de un proyecto de construcción, tanto en la productividad como en el plazo y costo. (6)

CONCLUSIONES

1. La metodología *Lean Construction* mejoró el rendimiento de los trabajos de compactación y conformación de rellenos en carreteras de la mina Bayóvar. Mejorando el rendimiento de 6300 m³/19 días mediante el método tradicional a 6300 m³/14 días.
2. Se mejoró el tiempo productivo (TP) para las labores de conformación de rellenos obteniendo valores promedio mediante el método tradicional de 39,22% y una clara mejora del 62.66 % interviniendo con la metodología *Lean Construction*. Del mismo modo, para las labores de compactación de rellenos se obtuvieron valores del 43.13% empleando el método tradicional y del 65.78% interviniendo con la metodología *Lean Construction*.
3. Se mejoró el tiempo contributorio (TC) para las labores de compactación de rellenos de 6.88% mediante el método tradicional y a un 9.84% interviniendo con la metodología *Lean Construction*. Para las labores de conformación de rellenos se obtuvieron valores mediante el método tradicional de 22,34% y con la intervención de *Lean Construction* del 10.00%.
4. Se disminuyó el tiempo no productivo (TNP) para las labores de conformación de rellenos mediante el método tradicional de 38,44% a un 27.34% interviniendo con la metodología *Lean Construction*. Para las labores de compactación de rellenos, mediante el método tradicional de 50.00% a un 24.38% interviniendo con la metodología *Lean Construction*.
5. Es posible intervenir con la metodología *Lean Construction* en los trabajos de compactación y conformación de rellenos en carreteras de la mina Bayóvar para lograr la mejora del rendimiento que influye directamente en la productividad del proyecto.
6. Con la aplicación de la metodología *Lean Construction* se logró mejorar el tiempo productivo y controlar o disminuir los tiempos contributorios y no productivos.

RECOMENDACIONES

La presente investigación fue desarrollada con la intención de presentar los beneficios del uso de la metodología *Lean Construction* y contrastar con los métodos tradicionales que aún se usan en las construcciones en el Perú. A partir de dicha experiencia se pueden realizar las siguientes recomendaciones:

1. El diseño de la Carta Balance deberá realizarse en base a la información que se requiere obtener. Por lo que se puede optar por una medición parcial o total de la jornada de trabajo.
2. Es importante la capacitación constante al personal que recolectará los datos para el estudio, pudiendo ser un observador; como en el caso de la presente investigación son los operadores de los equipos involucrados. El tener la información correcta nos garantiza que los datos procesados serán acordes a la realidad del proyecto.
3. La metodología *Lean Construction*, posee herramientas que permiten mejorar el control de los procesos de construcción, la forma de aplicar estas herramientas dependerá de la experiencia del proyecto y/o empresa. Es decir, la metodología *Lean Construction* es un conjunto de herramientas que se encuentra en un constante proceso evolutivo, donde la experiencia de cada proyecto retroalimenta su base de datos.

REFERENCIAS

1. **CAPECO.** *Cámara de Comercio de Huancayo.* Lima : Capeco, 2018.
2. **BULEJE REVILLA, Kenny Ernesto.** *Productividad en la construcción de un condominio aplicando conceptos de la filosofía Lean Construction.* Lima : PUCP, 2012.
3. **MARTÍNEZ RIBÓN, Tercero.** *Propuesta de metodología para la implementación de la Filosofía Lean (Construcción Esbelta) en proyectos de construcción.* Colombia : Universidad Nacional de Colombia, 2011.
4. **CANTURÍN CANO, Ricardo y SIUCHO DEXTRE, Raúl.** *Aplicación de métodos de Productividad en las operaciones de equipos de movimiento de tierras (ejemplo práctico cantera de la fábrica de Cementos Lima).* Lima : UPC, 2004.
5. **ARAQUE GONZÁLEZ, Gustavo Andrés.** *Planeación e implementación de la filosofía Lean Construction en Base al estudio de pérdidas y Aplicación del Sistema Planner en un proyecto constructivo de la empresa Marval S.A.* Medellín, Colombia : Universidad Pontificia Bolivariana, 2001.
6. **GUZMÁN TEJADA, Abner.** *Aplicación de la filosofía Lean Construction en la planificación, ejecución y control de proyectos.* Lima, Perú : Pontificia Universidad católica del Perú, 2014.
7. **CASTILLO V., GHIO.** *Productividad en obras de construcción.* Lima, Perú : Pontificia Universidad Católica del Perú, 2001.
8. **COSI GUZMÁN, Jean Fritz.** *Diagnostico y evaluación de los niveles de productividad en la construcción mediante la filosofía Lean Construction en la Ciudad de Tacna.* Tacna : s.n., 2017.

9. **BALLARD, Glenn.** *Estructuración del trabajo.* s.l. : Lean Construction Institute White Paper, 1999.
10. **DEMING, William Edwards.** *Calidad, productividad y competitividad.* Cambridge : Edición Diaz Santos, 1982.
11. **SCHONBERGER, Richard.** *Técnicas de fabricación japonesas: nueve lecciones ocultas en simplicidad.* Nueva York : s.n., 1982.
12. **SCHONBERGER, Richard.** *The quality concept: Still evolving.* Nueva York : National Productivity Review, 1986.
13. **KOSKELA, Lauri.** *An exploration towards a production theory and its application to construction. Tesis doctoral.* Technical Research Centre of Finland : Espoo., 2000.
14. **WOMACK, James, JONES, Daniel y ROOS, Daniel.** *La máquina que cambió el mundo: La historia de la Producción Lean, el arma secreta de Toyota que revolucionó la industria mundial del automóvil.* Nueva York : Rawson Associates, Profit Editorial, 2017.
15. **GONZÁLES, Domingo.** *Aplicación de herramientas lean en la gestión de proyectos de edificación.* Valladolid : Universidad de Valladolid, 2013.
16. **PONS ACHELL, Juan Felipe.** *Introducción a Lean Construction.* Madrid : Fundación Laboral de la Construcción, 2014.
17. **SERPELL, Alberto.** *Administración de operaciones de construcción.* Santiago de Chile : Universidad Católica de Chile, 2002.
18. **DWINE, Bruce.** *Guidelines for mine haul road design.* 2001.
19. **AUSENCO, Vector.** *Expediente técnico de 2010.* 2010.