

**UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE  
APURÍMAC**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**“DISEÑO INTEGRADO DE VÍAS PARA LA EFICIENCIA Y VIDA ÚTIL DE  
NEUMÁTICOS EN CAMIONES KOMATSU 930E-4SE, EN LA MINA LAS BAMBAS  
S.A.”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO DE MINAS.**

**PRESENTADO POR:**

**BACH.: JONATHAN ARREDONDO PEDRAZA.**

**ABANCAY, OCTUBRE DEL 2017  
PERÚ**



Ing. David D. Sánchez Castillo  
DOCENTE EMPLER  
UNIVERSIDAD NACIONAL MICHAELA BASTIDAS DE APUJINAC

DOCENTE  
Gloria F. Sánchez Lirio  
UNIVERSIDAD NACIONAL MICHAELA BASTIDAS DE APUJINAC

Dr. Leoncio Carmen Carrero  
DOCENTE  
UNIVERSIDAD NACIONAL MICHAELA BASTIDAS DE APUJINAC



**“DISEÑO INTEGRADO DE VÍAS PARA LA EFICIENCIA Y VIDA ÚTIL DE LOS  
NEUMÁTICOS EN CAMIONES KOMATSU 930E-4SE, EN LA MINA LAS BAMBAS  
S.A.”**



## DEDICATORIA

*La presente tesis está dedicada a Dios, ya que gracias a él he logrado concluir mi carrera.*

*A mis familiares, principalmente a mi madre quien ha sido un pilar fundamental en mi formación profesional, por brindarme la confianza, consejos, oportunidad y recursos para lograrlo.*

*A mis compañeros y amigos presentes y pasados, quienes sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, alegrías y tristezas y a todas aquellas personas que durante estos cinco años estuvieron a mi lado apoyándome y motivándome para seguir adelante.*

*Gracias a todos.*

## AGRADECIMIENTO

*A mis padres por su incansable amor y ternura, a mis hermanos por su apoyo, por su paciencia y por su amor incondicional, y sobre todo por su comprensión; por entender el sacrificio que uno tiene que hacer para así lograr las metas planteadas en el transcurso de nuestra vida, haciendo que cada día valore más la vida de todos mis seres queridos.*

*A los ingenieros quienes día a día comparten sus experiencias, enseñándome a trabajar en equipo, logrando de esa manera los objetivos de la empresa y promoviendo de esa forma la unanimidad a las demás áreas pertenecientes a esta formidable empresa.*

*A mi Alma Mater "UNIVERSIDAD NACIONAL MICHAELA BASTIDAS DE APURJMAC", la cual está compuesta por una excelente plana de ingenieros y alumnos forjadores, quienes me enorgullecen por formar parte de nuestro centro de estudios.*

## ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABLAS

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

LISTA DE SÍMBOLOS

RESÚMEN

“ABSTRACT”

INTRODUCCIÓN .....	1
EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.1 Descripción de la Realidad Problemática.....	3
1.2 Formulación del Problema.....	4
1.2.1 Problema General.....	4
1.2.2 Problema Específico.....	5
1.3 Justificación .....	5
1.4 Objetivos de la Investigación.....	6
1.4.1 Objetivos Generales.....	6
1.4.2 Objetivos Específicos.....	6
1.5 Hipótesis de la Investigación.....	7
1.5.1 Hipótesis General.....	7
1.5.2 Hipótesis Específico.....	7
1.6 Variables.....	7
CAPÍTULO II .....	8
MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Antecedentes de la Investigación.....	8

2.2 Generalidades.....	9
2.2.1 Localización Geográfica y Política de la Minera Las Bambas.....	9
2.2.1.1 Ubicación Geográfica.....	9
2.2.1.2 Ubicación Política.....	10
2.2.1.3 Ubicación Geodésica.....	10
2.2.1.4 Accesibilidad.....	11
2.2.2 Recursos.....	11
2.2.2.1 Clima.....	11
2.2.2.2 Flora.....	12
2.2.2.3 Fauna.....	12
2.2.2.4 Topografía.....	13
2.2.3 Reseña Histórica.....	14
2.2.4 Geología.....	15
2.2.4.1 Geomorfología.....	15
2.2.4.2 Geología Regional.....	16
2.2.4.3 Geología Local.....	16
2.2.4.4 Geología del Tajo Ferrobamba.....	17
2.2.4.5 Geología Estructural.....	18
2.2.4.6 Geología Económica.....	19
2.3 Diseño de Mina.....	20
2.3.1 Vías de Transporte en Las Bambas.....	20
2.3.2 Enfoque Empírico del Diseño de Vías en Las Bambas.....	21
2.3.3 Enfoque de Diseño Integrado.....	23
2.3.3.1 Tipos de Diseño de un Enfoque Integrado.....	24
2.3.4 Importancia de Diseñar una Vía Minera.....	27
2.3.5 Tipos de Capas Estructurales que se Utilizan para Construir Vías Mineras.....	28



2.3.5.1 Sub-Grado/Capa "In situ".....	28
2.3.5.2 Capa Sub-Base.....	29
2.3.5.3 Capa Base.....	29
2.3.5.4 Capa de Rodamiento.....	29
2.3.6 Equipos Necesarios para la Construcción de Vías Mineras.....	30
2.3.6.1 Tractor de Orugas "Bulldózer".....	30
2.3.6.2 Rodillo Vibrador.....	30
2.3.6.3 Motoniveladora.....	30
2.3.6.4 Camiones Cisterna con Barra Aspersora.....	31
2.3.7 Materiales para la Construcción de Vías Mineras.....	32
2.3.7.1 Material "In situ".....	32
2.3.7.2 Capa Base y Sub Base.....	33
2.3.7.3 Superficie de Rodadura.....	33
2.3.8 Clasificación de Vías de Transporte.....	34
2.3.9 Criterios para el Diseño de Vías Mineras.....	36
2.3.9.1 Capacidad de Pendiente de un Camión.....	36
2.3.9.2 Retardo o Frenado.....	36
2.3.9.3 Dimensiones.....	37
2.3.9.4 Cargas.....	38
2.3.10 Neumático.....	38
2.3.10.1 Construcción de Neumáticos.....	39
2.3.10.2 Tipos de Gomas.....	41
2.3.10.3 Profundidades de Cocadas.....	42
2.3.10.4 Funcionamiento de un Neumático.....	42
2.3.10.5 Principales Causas de Deterioro de un Neumático.....	44
2.3.10.6 Factores que Influyen en la Duración de la Vida Útil de los Neumáticos.....	44

<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>50</b>
<b>GEOMETRÍA DE VÍAS Y MANTENIMIENTO.....</b>	<b>50</b>
3.1 Distribución del Peso del Camión en las Vías.....	50
3.2 Diseño Geométrico.....	51
3.2.1 Diseño Geométrico para Las Bambas.....	52
3.2.1.1 Diseño del Ancho de Vía Según Varios Autores.....	52
3.2.1.2 Criterios para Curvas Horizontales.....	56
3.2.1.3 Criterios para Curvas Verticales.....	64
3.2.1.4 Pendientes.....	66
3.2.1.5 Peralte de la Curva.....	67
3.2.1.6 Curvatura o Vía en Zigzag.....	73
3.2.1.7 Pendiente Transversal (Bombeo o Abovedado).....	74
3.2.1.8 Berma de Seguridad.....	75
3.2.1.9 Cunetas.....	78
3.2.2 Diseño Estructural para Las Bambas.....	81
3.2.2.1 Carga de Tráfico.....	82
3.2.2.2 Resistencia de la Capa de Asiento.....	82
3.2.2.3 Resistencia del Material Base.....	85
3.2.2.4 Proceso del Diseño Estructural de las Calzadas.....	90
3.2.3 Diseño Funcional para Las Bambas.....	94
3.2.3.1 Selección del Material de la Carpeta de Rodado.....	96
3.2.4 Diseño de Mantenimiento.....	105
3.2.4.1 Plan de Mantenimiento de Vías - Corto Plazo.....	106
3.2.4.2 Plan de Mantenimiento de Vías - Mediano Plazo.....	107
3.2.4.3 Plan de Mantenimiento de Vías - Largo Plazo.....	109
3.2.4.4 Mantenimiento Rutinario o Preventivo.....	110



3.2.4.5 Mantenimiento Correctivo.....	111
3.2.5 Propiedades Ideales del Material en la Capa de Rodadura.....	111
3.2.5.1 Naturaleza del Material Inicialmente Disponible para su Posible Modificación para Usarlo como Material de Superficie.....	112
3.2.5.2 Naturaleza de los Materiales de Grano Fino Disponibles para Posible Combinación con Roca Triturada.....	116
3.2.6 Evaluación de la Calzada y de los Materiales.....	118
3.2.6.1 Pozos de Prueba.....	118
3.2.6.2 Perforación/DCP.....	120
3.2.7 Propuesta Metodológica para la Implementación de un Diseño Integrado de Vías.....	124
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>125</b>
<b>RENDIMIENTO DE NEUMÁTICOS DE CAMIONES KOMATSU 930E-4SE.....</b>	<b>125</b>
4.1 Análisis de la Situación Actual.....	125
4.1.1 Goma Usada en Neumáticos Dados de Baja.....	126
4.1.2 Bajas de Acuerdo a la Posición del Neumático.....	128
4.2 Análisis en las Bajas de los Neumáticos.....	129
4.2.1 Arrancamiento de Goma (A).....	132
4.2.2 Corte Pasante en la Banda de Rodamiento (B).....	133
4.2.3 Desgaste Acelerado por Deslizamiento (C).....	133
4.3 Análisis e Interpretación de Datos.....	135
4.3.1 Análisis de la Vida Útil de los Neumáticos.....	135
4.3.2 Diseño de una Mezcla para la Carpeta de Rodadura.....	135
4.3.3 Costos de Construcción de la Carpeta de Rodadura.....	138
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>140</b>
<b>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>140</b>

5.1 Implementación del Diseño Integrado de Vías en Las Bambas.....	140
5.1.1 Velocidades.....	140
5.1.2 Ancho de Vía.....	140
5.1.3 Grados Longitudinales.....	141
5.1.4 Distancia de Visibilidad y Distancia de Frenado.....	142
5.1.5 Curvas Verticales.....	143
5.1.6 Curvas Horizontales.....	144
5.1.7 Cruce y Super-elevación.....	145
5.1.8 Bermas.....	146
5.1.9 Diseño del Pavimento.....	146
5.1.9.1 Diseño Recomendado para la Capa de Rodadura.....	147
5.2 Incremento de la Vida Útil de los Neumáticos.....	149
5.2.1 Diagrama Causa – Efecto de la Vida Útil del Neumático.....	149
5.2.2 Distribución de Cargas en los Camiones Komatsu 930E-4SE.....	150
5.2.3 Rendimiento de los Neumáticos – Flota Komatsu 930E-4SE.....	151
5.2.4 Costos de Neumáticos.....	153
5.3 Incremento de la Productividad.....	155
5.3.1 Análisis del Ciclo de Acarreo en la Flota de Camiones Komatsu.....	155
5.4 Prueba de Hipótesis.....	159
5.5 Ventajas Significativas en la Implementación de un Diseño Integrado de Vías.....	159
CONCLUSIONES.....	161
RECOMENDACIONES.....	163
BIBLIOGRAFÍA.....	164
ANEXOS.....	167



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1. Ubicación de la Mina Las Bambas. ....	9
FIGURA 2-2. Modelo Geológico del Skarn Ferrobamba. ....	17
FIGURA 2-3. Vista Panorámica del Tajo Ferrobamba. ....	18
FIGURA 2-4. Gráfica de Incidencia - Costos de Camiones Gigantes. ....	21
FIGURA 2-5. Optimización de costos en el mantenimiento de vías. ....	22
FIGURA 2-6. Modelo del Diseño Integrado de Vías. ....	24
FIGURA 2-7. Sección Longitudinal de una vía Minera. ....	27
FIGURA 2-8. Partes de un Neumático. ....	39
FIGURA 2-9. Distintas Profundidades de cocadas para Neumáticos Michelin. ....	42
FIGURA 2-10. Pérdida de Rendimiento en Función al Inflado del Neumático. ....	45
FIGURA 3-1. Diseño Geométrico para Las Bambas. ....	51
FIGURA 3-2. Anchos de Vía para un Camión de 3.66 m. ....	52
FIGURA 3-3. Anchos de Vía para un Camión Komatsu 930E4-SE. ....	54
FIGURA 3-4. Ancho de vía para un camión Komatsu 930E4-SE. ....	55
FIGURA 3-5. Distancia de Frenado vs Distancia de Visibilidad en Curvas Horizontales. ....	57
FIGURA 3-6. Distancia de Frenado vs Distancia de Visibilidad en Curvas Verticales. ....	58
FIGURA 3-7. Distancia de Frenado para Equipos con Peso Bruto > 180.000 kg. ....	59
FIGURA 3-8. Distancia de frenado en función a la velocidad para una pendiente de 8% aplicado en las vías de acarreo de Las Bambas. ....	63
FIGURA 3-9. Distancia "Layback". ....	64
FIGURA 3-10. Longitud de una curva vertical en función de la distancia de frenado, la diferencia de pendientes y la altura del ojo del conductor. ....	65
FIGURA 3-11. Pendiente de una vía de acarreo. ....	66
FIGURA 3-12. Peralte de curvas de caminos de acarreo minero. ....	69
FIGURA 3-13. Radio de giro y radio de despeje de los camiones mineros. ....	70

FIGURA 3-14. Cálculo del ensanche alrededor de curvas. ....	71
FIGURA 3-15. Distribución del ensanche alrededor de una curva.....	72
FIGURA 3-16. Diseños de pendientes transversales para drenaje de agua en las vías.....	75
FIGURA 3-17. Ubicación de las bermas de seguridad para vías.....	76
FIGURA 3-18. Diseño estándar de la berma lateral. ....	77
FIGURA 3-19. Diseño Estándar de una Berma Intermedia.....	77
FIGURA 3-20. Relación para Estimar el Módulo de Resiliencia Basándose en un CBR Conocido.83	
FIGURA 3-21. Relación para Estimar el CBR Basándose en un Módulo de Resiliencia Conocido.84	
FIGURA 3-22. Diagrama del Material de Tipo 1. ....	86
FIGURA 3-23. Diagrama del Material de Tipo 2.....	87
FIGURA 3-24. Diagrama del Material de Tipo 3.....	88
FIGURA 3-25. Diagrama de Flujo del Proceso de Diseño de Calzadas.....	90
FIGURA 3-26. Curvas de Relación Originales RJ Thompson para Microdeformación Limitante Versus Carga de Tráfico (volumen). ....	91
FIGURA 3-27. Carga de Tráfico (kton/día) vs Curva de Microdeformación Limitante para Vías de Acarreo Categoría III.....	92
FIGURA 3-28. Espesor de la Capa Base para Cumplir con la Microdeformación Limitante de la Carga de Tráfico.....	94
FIGURA 3-29. Tabla SP vs. GC Aplicables a Vías de Acarreo.....	102
FIGURA 3-30. El PSD Ideal Resultante se Muestra a Continuación.....	104
FIGURA 3-31. PSD Inicial de Acuerdo con el Contratista.....	112
FIGURA 3-32. PSD de la Muestra Relacionada con la Nueva Envolvente Ideal para Superficie. 114	
FIGURA 3-33. Ubicación del GC y SP de la Muestra en la Tabla de Desempeño del GC y SP. ..	115
FIGURA 3-34. Ubicación del GC y SP de la Muestra en la Tabla de Desempeño del GC y SP. ..	115
FIGURA 3-35. Prueba DCP de la Capa de Asiento a Través de la Capa de la Calzada Existente. 121.	
FIGURA 3-36. Flujo de Implementación del Diseño Integrado de Vías para Las Bambas. ....	124

FIGURA 4-1. Neumáticos Dados de Baja por Mes (2016-2017).....	126
FIGURA 4-2. Cantidad de Neumáticos Desechados vs % Utilización.....	126
FIGURA 4-3. Fallas de los Neumáticos vs % Goma Usada.....	127
FIGURA 4-4. Cocadas en los Neumáticos Nuevos y para Desecho.....	128
FIGURA 4-5. Ubicación de las Posiciones de los Neumáticos en los Camiones Mineros.....	129
FIGURA 4-6. Daño por Posiciones en los Neumáticos.....	129
FIGURA 4-7. Diagrama de Pareto de Causas del Retiro de los Neumáticos.....	130
FIGURA 4-8. Tipo de Baja en los Neumáticos.....	130
FIGURA 4-9. Promedio de Vida Útil de los Neumáticos.....	135
FIGURA 4-10. Tabla de PSD de Cada Material Constitutivo Individual y PSD de la Mezcla Lograda.....	136
FIGURA 4-11. Ubicación del GC y SP de la Mezcla Combinada de Diseño.....	137
FIGURA 4-12. Ubicación del GC y SP de la Mezcla Combinada de Diseño.....	137
FIGURA 5-1. Capas Básicas Planteadas para el Diseño de las Vías en Las Bambas.....	148
FIGURA 5-2. Profundidades de las Capas para la Carpeta de Rodadura.....	148
FIGURA 5-3. Diagrama de Pescado Causa-Efecto.....	149
FIGURA 5-4. Distribución de cargas en la flota de camiones komatsu.....	151
FIGURA 5-5. Tasa de desgaste de los neumáticos (2016 – 2017).....	152
FIGURA 5-6. Rendimiento de los Neumáticos en el Año 2016.....	152
FIGURA 5-7. Rendimiento de los Neumáticos en el Año 2017.....	153
FIGURA 5-8. Pérdidas por Desecho de Neumáticos en el Año 2016.....	154
FIGURA 5-9. Pérdidas por Desecho de Neumáticos en el Año 2017.....	154
FIGURA 5-10. Evolución de la Velocidad Media vs Distancia del Ciclo.....	155
FIGURA 5-11. Ciclos por Hora vs Distancia Total del Ciclo.....	156
FIGURA 5-12. Evolución del Tonelaje Transportado por Ciclo.....	156
FIGURA 5-13. Evolución del tonelaje vs velocidad media y el ciclo.....	157

FIGURA 5-14. Tonelaje Movido en el Año 2016. ....	158
FIGURA 5-15. Tonelaje Movido en el Año 2017. ....	158
FIGURA 6-1. Microdeformación limitante vs volumen de tráfico. ....	174
FIGURA 6-2. Microdeformación limitante vs espesor de la capa base. ....	174
FIGURA 6-3. Prueba de laboratorio – Flujo de procesos. ....	175
FIGURA 6-4. Proceso de utilización del DCP. ....	175

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1-1. Causas de Desecho de los Neumáticos Gigantes.....	5
TABLA 2-1. Coordenadas de Ubicación de la Mina Las Bambas.....	10
TABLA 2-2. Área de la Concesión en la Mina Las Bambas.....	11
TABLA 2-3. Distancias y Tiempo de Recorrido a la Minera Las Bambas.....	11
TABLA 2-4. Valores que se Utilizaran en el Diseño del Tajo en Las Bambas.....	20
TABLA 2-5. Jerarquía de las Vías de la Mina.....	35
TABLA 3-1. Distribución del peso del camión Komatsu 930E-4SE (vacío y cargado).....	50
TABLA 3-2. Tabla de Anchos Recomendados Desde una Vía Hasta 4 Vías de Tránsito.....	52
TABLA 3-3. Ancho de Vía para un Camión Komatsu 930E-4SE.....	53
TABLA 3-4. Anchos de Vía de Acuerdo al Número de Carriles.....	53
TABLA 3-5. Factores para el Cálculo del Ancho de Vía.....	54
TABLA 3-6. Anchos de vía por el número de carriles.....	54
TABLA 3-7. Anchos de Vía por el Número de Carriles.....	55
TABLA 3-8. Anchos de Vía de Acuerdo a la Velocidad del Equipo.....	56
TABLA 3-9. Relación Entre el Peso y Tiempo de Reacción.....	60
TABLA 3-10. Equivalencia de las Pendientes de Porcentajes a Ángulos.....	60
TABLA 3-11. Cálculo de Valores para la Distancia de Frenado.....	62
TABLA 3-12. Peralte sugerido según el radio de la curva / velocidad del camión.....	68
TABLA 3-13. Intensidad de Lluvia Durante los Períodos de Retorno Mencionados.....	80
TABLA 3-14. Valores de Carga de Capa de Asiento.....	84
TABLA 3-15. Clasificación de resistencia del material de base para cada tipo de material.....	85
TABLA 3-16. Categorías de Vías de Acarreo Minero para Propósitos de Diseño de Calzada.....	88
TABLA 3-17. Ejemplo de la Combinación de la Carga de Tráfico (kton/día) y del Índice de Desempeño.....	89
TABLA 3-18. PSD Ideal en Formato Tabular.....	105

TABLA 3-19. PSD del Contratista en Formato Tabular.....	113
TABLA 3-20. PSD y Naturaleza de Plasticidad Evaluados en la Muestra del Contratista.....	114
TABLA 3-21. Resumen de las Características de Estos Materiales de Grano Fino. ....	117
TABLA 4-1. Diferencias de Goma Utilizada Antes de ser Retirado el Neumático.....	127
TABLA 4-2. % de Goma Remanente en los Neumáticos.....	132
TABLA 4-3. % de Goma Remanente en los Neumáticos.....	133
TABLA 4-4. % de Goma Remanente en los Neumáticos.....	134
TABLA 4-5. Distancias de los Tramos en el Tajo Ferrobamba.....	138
TABLA 5-1. Anchos Estándar de las Vías de Acarreo.....	141
TABLA 5-2. Grados Estándar de las Vías de Acarreo.....	141
TABLA 5-3. Parámetros Estándar para Calcular la Distancia Mínima de Parada.....	143
TABLA 5-4. Desviaciones Estándar y Elevación Superior.....	145
TABLA 5-5. Dimensiones Estándar de la Berma.....	146
TABLA 5-6. Parámetros Geo-material del Pavimento.....	147
TABLA 5-7. Planes de Acción para Incrementar la Vida Útil de los Neumáticos.....	150
TABLA 5-8. Ciclos con Respecto a la Distancia Recorrida.....	157

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

FOTOGRAFÍA 3-1. La falta de profundidad, perfil, pendiente y capacidad de drenaje ha ocasionado un exceso de agua sobre la vía. ....	78
FOTOGRAFÍA 3-2. Excavación de un Pozo de Prueba en la Calzada de una Vía de Acarreo Existente. ....	119
FOTOGRAFÍA 3-3. Pozo de Prueba que Muestra la Excavación a Través de toda la Calzada hasta el Nivel de la Capa de Asiento Natural. ....	119
FOTOGRAFÍA 3-4. Muestra de Material de Cada Horizonte de Capa. ....	120
FOTOGRAFÍA 3-5. Muestras Identificadas por Pozo y Profundidad (relacionadas con el horizonte de capa). ....	120
FOTOGRAFÍA 3-6. Orificio de Acceso Perforado Previamente con Taladro para Roca a Través de la Calzada Existente. ....	122
FOTOGRAFÍA 3-7. Orificio de Acceso Perforado Previamente a Través de la Estructura de la Calzada. ....	122
FOTOGRAFÍA 3-8. Cuidadosa Alimentación del DCP con Varillas de Extensión a Través del Orificio de Acceso Antes de la Prueba DCP. ....	123
FOTOGRAFÍA 3-9. Prueba DCP del Material de la Capa de Asiento Debajo de la Estructura Existente de la Calzada. ....	123
FOTOGRAFÍA 4-1. Arrancamiento de Goma en Banda de Rodamiento. ....	132
FOTOGRAFÍA 4-2. Corte Pasante en Banda de Rodamiento. ....	133
FOTOGRAFÍA 4-3. Desgaste Acelerado en Banda de Rodamiento. ....	134
FOTOGRAFÍA A10-1*. Lastrado de vías en el Tramo I. ....	1766
FOTOGRAFÍA A10-2. Control de niveles de diseño de vías (3%). ....	176
FOTOGRAFÍA A10-3. Control de calidad en el Tramo I – Funcionamiento de cunetas. ....	176
FOTOGRAFÍA A10-4. Mantenimiento de vías en el Tramo I. ....	177
FOTOGRAFÍA A10-5. Mantenimiento de vía en el Tramo III y Tramo IV. ....	177

FOTOGRAFÍA A10-6. Mantenimiento de vías con motoniveladora.....	178
FOTOGRAFÍA A10-7. Lastrado de vías en el Tramo III.....	178



## LISTA DE SÍMBOLOS

CBR	: California Bearing Ratio
DCP	: Dynamic Cone Penetrometer
GC	: Coeficiente de Graduación
Ha	: Hectáreas
hrs	: Horas
HV	: Vehículo Pesado
Km	: Kilómetros
Kn	: Kilo Newton
Kph	: Kilómetros por Hora
Kton/día	: Kilo Toneladas por Día
LL	: Límite Líquido
LS	: Contracción Lineal de Barra
LV	: Vehículo Liviano
m	: Metros
mm	: Milímetros
msnm	: Metros Sobre el Nivel del Mar
NO	: Noreste
PI	: Índice de Plasticidad
PSD	: Distribución del Tamaño de las Partículas
SE	: Sureste
SP	: Producto Contraíble
Umin	: Coeficiente de Fricción entre la Vía y el Neumático
USD	: Dólares Americanos
UTM	: Universal Transversal Mercator

## RESUMEN

El “diseño integrado de vías” es el proceso de construcción de una vía minera, la cual comprende cuatro componentes importantes: el diseño geométrico, el diseño estructural, el diseño funcional y el diseño de mantenimiento. Si un componente del diseño es deficiente, los otros componentes no funcionarán en su máximo potencial y muchas veces se comprometerá la seguridad, el buen funcionamiento de la vía y la vida útil de los neumáticos.

El estudio muestra los distintos procesos de construcción de una vía minera, la cual se determina por los diferentes componentes de un diseño integrado de vías. La misma que inicia con el diseño geométrico, cuyo objetivo es producir un diseño óptimamente eficiente y de geometría segura; el diseño estructural, brindará a las vías la resistencia para transportar las cargas impuestas durante la vida útil de la vía sin necesidad de mantención excesiva; el diseño funcional, centrado en la selección de materiales de la carpeta de rodadura donde se requiere la selección, aplicación y estrategia de mantención más apropiadas, para maximizar la resistencia a la rodadura y la formación de defectos en la superficie de la vía; y por último, el diseño de mantenimiento que identifica la frecuencia óptima de mantenimiento para cada sección de la vía.

Una vez definido los componentes del diseño de vías, se procedió a analizar la influencia de esta en la vida útil de los neumáticos en los camiones Komatsu 930E-4SE, para lo cual se utilizó información (data) de los neumáticos enviados a desecho en los años 2016 y 2017.



Palabras claves: **Diseño integrado, Vías, Diseño Geométrico, Diseño Estructural, Diseño Funcional, Diseño de Mantenimiento, y Neumático.**



## ABSTRACT

The "integrated road design" is the process of construction of a mining road, which includes four important components: geometric design, structural design, functional design and maintenance design. If a component of the design is deficient, the other components will not work at their maximum potential and many times the safety, the proper functioning of the track and the useful life of the tires will be compromised.

The study shows the different construction processes of a mining road, which is determined by the different components of an integrated road design. The same one that starts with the geometric design, whose objective is to produce an optimally efficient and safe geometry design; the structural design will provide the roads with the resistance to transport the loads imposed during the useful life of the road without the need for excessive maintenance; the functional design, focused on the selection of rolling folder materials where the most appropriate selection, application and maintenance strategy is required, in order to maximize the rolling resistance and the formation of defects in the surface of the track; and finally, the maintenance design that identifies the optimal maintenance frequency for each section of the road.

Once the components of the road design were defined, the influence of this on the tire life on the Komatsu 930E-4SE trucks was analyzed, using information (data) of the tires sent to Scrap in the 2016 and 2017.

**Key words:** Integrated design, Road, Geometric Design, Structural Design, Functional Design, Maintenance Design, and Tyre.

## INTRODUCCIÓN

Los caminos mineros forman parte de la operación diaria y rutinaria de cualquier mina, siendo un componente esencial del punto de vista de la eficiencia de la operación.

De las condiciones de los caminos de acarreo dependen la velocidad, el consumo de combustible, la vida útil de los neumáticos, la seguridad y la cantidad de toneladas que se transportan anualmente. Si las superficies están limpias y son uniformes, la vida útil de los neumáticos de los camiones mineros de acarreo es mayor y hay menos posibilidades de que se produzcan daños en la máquina o accidentes debido a peligros de los caminos.

Por otro lado, si los caminos de acarreo se diseñan o mantienen de forma errónea, esto puede derivar en un aumento significativo de los costos, como consecuencia del tiempo de producción perdido, una menor vida útil de los neumáticos, un mayor consumo de combustible, un desgaste excesivo de los componentes, una mayor cantidad de reparaciones y reemplazos de los equipos, y problemas de seguridad.

En Las Bambas, el diseño, la construcción y el mantenimiento de las vías mineras no ha recibido la atención necesaria de acuerdo a su incidencia en los costos y cumplimiento de metas de producción, por ello este trabajo de investigación pretende dar directrices para estandarizar y optimizar este proceso de acuerdo a las condiciones técnicas y equipos

disponibles en el tajo, con el objetivo final de aumentar la vida útil de los neumáticos y mejorar la productividad de la mina.

El Capítulo I trata de la descripción de la realidad problemática encontrada en la Minera Las Bambas S.A. y la justificación de la investigación.

El Capítulo II trata del marco teórico y generalidades de la mina, así como las bases y conceptos utilizados en la investigación.

El Capítulo III se ocupa sobre la influencia del diseño integrado de vías para la eficiencia y vida útil de los neumáticos en Las Bambas.

El Capítulo IV involucra el estudio del rendimiento del neumático efectuado a la flota de camiones Komatsu 930E-4SE.

El Capítulo V trata sobre el análisis y discusión de resultados obtenidos en la investigación, y prueba de hipótesis del incremento de la vida útil de los neumáticos y las mejoras en la productividad de la mina.

## CAPÍTULO I

### EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 1.1 Descripción de la Realidad Problemática.

Antes, los neumáticos eran simplemente un costo más en las actividades comerciales. Los propietarios de las minas estaban acostumbrados a gastar el precio equivalente a la compra inicial de un camión grande de minería en costos relacionados con los neumáticos a lo largo de la duración de la máquina. Hoy, con una demanda sin precedentes y una producción que no logra estar a su altura, los neumáticos ya no se consideran un simple costo, sino que son indispensables para mantener la flota de transporte en condiciones operativas.

Inicialmente en la etapa de construcción de Las Bambas, no se contaba con un diseño adecuado de vías, puesto que solo se realizó en base a la experiencia ganada en otras operaciones, lo cual conllevó a que estas se deterioren rápidamente, por el paso de los equipos pesados, las constantes lluvias y la mala infraestructura de las vías, ocasionando desgaste prematuro de los neumáticos de equipos de acarreo, uso excesivo de equipos auxiliares y pérdida de producción.

Un diseño de vías bien estructurado, con un buen diseño geométrico y una superficie vial bien construida y mantenida mejoran las operaciones de acarreo de la mina reduciendo los riesgos de impacto entre equipos, el desgaste prematuro de neumáticos en los camiones, los costos de mantenimiento, el uso excesivo de equipos auxiliares y mejoran la producción.

“Los cortes y los golpes en su mayoría son producto de materiales arrojados en las vías de transporte”, explica el consultor de aplicaciones de Caterpillar, Kent Clifton. “Para alguien que conduce un automóvil, no es difícil esquivar una piedra de gran tamaño. Pero con un camión de minería, para cuando uno ve la piedra ya es demasiado tarde”.

El problema nace de la necesidad de obtener mayor tiempo de vida útil en los neumáticos de gran tamaño utilizados por los camiones Komatsu 930E-4SE que operan actualmente en Las Bambas, ya que hoy en día existe escasez de estos y esto hace que los precios de los neumáticos se eleven en el mercado; además los gastos por transporte representan un porcentaje alto con respecto al costo de producción, por tal motivo es muy importante tener un buen diseño, construcción y mantenimiento de las vías para minimizar los costos de acarreo e incrementar la vida útil de los neumáticos.

## 1.2 Formulación del Problema.

### 1.2.1 Problema General.

- ❖ ¿En qué medida el enfoque de diseño integrado de vías influenciará en la vida útil de los neumáticos de los camiones Komatsu 930E-4SE en la mina Las Bambas?



### 1.2.2 Problemas Específicos.

- ❖ ¿Qué relación existe entre el diseño, construcción y mantenimiento de vías mineras con respecto al desgaste de los neumáticos en los camiones Komatsu 930E-4SE?
- ❖ ¿Cuáles son los beneficios de tener una mejor infraestructura de vías mineras?
- ❖ ¿Cómo un buen diseño, construcción y mantenimiento de vías mineras puede contribuir en la productividad de la mina?
- ❖ ¿Cómo la frecuencia del mantenimiento de las vías garantizaran el menor desgaste y aumentar la vida útil de los neumáticos, su eficiencia y reducción de los costos de transporte?

### 1.3 Justificación

Alrededor del 80% de los neumáticos presentan fallas antes de gastarse por completo. Cerca del 47% de las pérdidas se deben a arrancamiento de goma, mientras que los cortes son responsables de alrededor del 29%, por desgaste acelerado un 12% y otras causas en conjunto representan en total un 12% (ver Tabla 1-1).

TABLA 0-1. Causas de Desecho de los Neumáticos Gigantes.

Causas	%
Arrancamiento de goma	47.3 %
Corte pasante en la banda de rodamiento	22 %
Desgaste acelerado por deslizamiento	12.4 %
Corte pasante en el flanco	6.9 %
Separación mecánica	3.1 %
Impacto	2.9 %
Separación térmica	2.4 %
Otros	3.1 %

Fuente: Minera Las Bambas.

Una de las medidas más importantes que puede adoptar una mina para prevenir estas pérdidas prematuras es cuidar sus vías de transporte.

Por tal motivo se plantea que la tesis se justifica porque propone un “DISEÑO INTEGRADO DE VÍAS PARA LA EFICIENCIA Y VIDA ÚTIL DE NEUMÁTICOS EN CAMIONES KOMATSU 930E-4SE, EN LA MINA LAS BAMBAS S.A.”, en el que se demuestra la importancia del diseño estructural de las vías mineras y su repercusión directa en el desgaste de los neumáticos, así como su influencia indirecta con la seguridad, productividad, uso de equipos auxiliares y costos de mantenimiento.

#### **1.4 Objetivos de la Investigación.**

##### **1.4.1 Objetivo General.**

- ❖ Determinar la influencia del diseño integrado de vías en la vida útil de los neumáticos de los camiones Komatsu 930E-4SE en la mina Las Bambas.

##### **1.4.2 Objetivos Específicos.**

- ❖ Evitar el desgaste prematuro de los neumáticos mediante un enfoque de diseño integrado de vías.
- ❖ Proveer mejor infraestructura vial para garantizar las operaciones de transporte minero.
- ❖ Incrementar la productividad de la mina, con la mayor disposición de vehículos de transporte de minerales.
- ❖ Mejorar las condiciones de todas las vías mineras para garantizar la vida útil de los neumáticos, su eficiencia y reducción de costos de transporte.

## 1.5 Hipótesis de la Investigación.

### 1.5.1 Hipótesis General.

- ❖ Si el Diseño Integrado de Vías tiene influencia en el desgaste de los neumáticos, entonces podremos incrementar la vida útil de los neumáticos en todos los camiones Komatsu 930E-4SE, de la mina Las Bambas.

### 1.5.2 Hipótesis Específico.

- ❖ Tener vías en buen estado garantizaran el aumento de la vida útil de los neumáticos en los camiones mineros.
- ❖ Tener un buen diseño de vías nos dará como resultado muchos beneficios económicos.
- ❖ Una vía bien diseñada, construida y mantenida contribuye en el incremento de la productividad de la mina.
- ❖ Ningún aumento en la frecuencia de mantenimiento podrá arreglar una vía mal diseñado.

## 1.6 Variables.

**Variable Independiente:** Diseño Integrado de Vías.

**Variable Dependiente:** Vida Útil de Neumáticos de Camiones Mineros en Las Bambas.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes de la Investigación.

Se ha encontrado trabajos en las consultas bibliográficas referentes al diseño y construcción de vías mineras en manuales publicados como “Design of Surface Mine Haulage Roads – A Manual” de Walter W. Kaufman y James C. Ault en el año 1977. Posteriormente investigadores de Canadá como Dwayne D. Tannant y Bruce Regensburg con su publicación “Guidelines for Mine Haul Road Design” (2001) y de Australia RJ Thompson con su publicación “Mine Haul Road Design, Construction and Maintenance Management” (2005), que han aportado grandes avances junto a otros investigadores sobre el diseño, construcción y mantenimiento de vías mineras con el fin de minimizar los riesgos en la seguridad, los equipos de acarreo, la productividad y los costos de operación en una mina a tajo abierto.

En el Perú pocos trabajos se han realizado sobre el diseño, construcción y mantenimiento de vías mineras, puesto que estas solo se realizaban de manera empírica y sin darle la importancia adecuada. Hoy en día las diferentes empresas mineras están dando mucha importancia en la ejecución de investigaciones, puesto

que en el ciclo de minado el transporte significa un alto porcentaje en el costo de producción y por ende los neumáticos significan en el transporte la base del ciclo de minado. Con esa premisa, los titulares mineros están formando departamentos de seguimiento de los mismos para que realicen investigaciones de mejora continua en vehículos de acarreo de mineral.

## 2.2 Generalidades.

### 2.2.1 Localización Geográfica y Política de la Minera Las Bambas.

#### 2.2.1.1 Ubicación Geográfica.

La empresa minera Las Bambas tiene sus derechos mineros que se ubica, entre los distritos de Challhuahuacho, Tambobamba y Ccoyllurqui, en la provincia de Cotabambas y el distrito de Progreso en la Provincia de Grau, región Apurímac, a 75 km al suroeste de la ciudad de Cusco, entre las cuencas de los ríos Vilcabamba y Santo Tomás, específicamente en la cuenca del río Ferrobamba, a una altitud que varía entre los 3,800 y 4,600 msnm. Ver figura 2-1.



FIGURA 2-1. Ubicación de la Mina Las Bambas.

Fuente: Captura de Pantalla Google Maps.

### 2.2.1.2 Ubicación Política.

Las Bambas se encuentran dentro de 19 comunidades. Las comunidades asentadas dentro del "Área de admisión de Petitorios" son: Fuerabamba, Huncuire, Chicñahuiz, Pamputa, Ceonecacca, Chucuni, Pumamarca, Choquecca Antio, Manuel Seoane Corrales, Quehuira, Allahui, Asaccasi, Sorcco, Patrón Santiago, Progreso, Palca Picosayhuas, Escohorno, Ccahuapirhua y Carmen Alto de Challhuahuacho.

### 2.2.1.3 Ubicación Geodésica.

Elipsoide : WGS8

Datum horizontal: WGS84

Datum vertical : Nivel del Mar

Proyección : Universal Transversal Mercator (UTM)

Zona : 18 SUR

Franja : L

TABLA 2-1. Coordenadas de Ubicación de la Mina Las Bambas.

Coordenadas Geográficas	Coordenadas UTM	Cota	Datum
72°17'1.65" Longitud	E793388	4200	WGS84
14° 5'31.18" Latitud	N8440530	4200	WGS84

Fuente: Earth Google

## A) CONSESIONES MINERAS

Las Bambas cuenta con un derecho especial denominado "área de no admisión de petitorios" de 33,063 Ha, dentro de la cual existen cuatro concesiones mineras que corresponden a Activos Mineros S.A.C. (antes Centromin Perú) que tienen una extensión total de 1,800 Ha.

TABLA 2-2. Área de la Concesión en la Mina Las Bambas.

Concesión	Área (ha)
FERROBAMBA	400
CHALCOBAMBA	600
SULFOBAMBA	400
CHARCAS	400

Fuente: Estudio Técnico Las Bambas.

#### 2.2.1.4 Accesibilidad.

El acceso por vía terrestre es presentado en la Tabla 2-3.:

TABLA 2-3. Distancias y Tiempo de Recorrido a la Minera Las Bambas.

Ciudad		Distancia (km)	Tiempo (horas)	Tipo de Acceso
Cusco	Chalhuhahuacho	220	7	Carretera Asfaltada
Chalhuhahuacho	Las Bambas	15	0.5	Carretera Afirmada
Abancay	Chuquibambilla	105	6	Asfaltado
Chuquibambilla	Las Bambas	80	5	Carretera Afirmada

Fuente: Estudio de Tiempos.

#### 2.2.2 Recursos.

##### 2.2.2.1 Clima.

Las características climáticas en la zona andina se manifiestan mediante fenómenos de sequías, heladas y lluvias intensas, de manera diferente en cada uno de sus pisos ecológicos. Las temperaturas están condicionadas por factores de altitud y relieve oscilando en promedio entre 6 °C y 16 °C, y disminuyendo por debajo de 0 °C durante las heladas meteorológicas. En cuanto a las precipitaciones, están principalmente influenciadas por circulaciones atmosféricas de superficie (Baja Amazónica) y de altura (Alta de Bolivia y Baja del noreste de

Brasil) que traen humedad desde la cuenca amazónica. Por esta razón, los registros pluviales pueden variar anualmente de 500 a 2 000 mm.

Las precipitaciones en el Área Las Bambas se deben a las masas húmedas de aire provenientes de la cuenca Amazónica las cuales son transportadas, principalmente, por vientos provenientes del oeste. Estas masas de aire húmedo encuentran en su recorrido a la Cordillera de los Andes la cual fuerza su ascenso, alcanzando eventualmente altitudes y temperaturas que favorecen su condensación y precipitación.

#### **2.2.2.2 Flora.**

Se identificaron un total de 32 especies diferentes de aves en el área de influencia de la Mina Las Bambas. En el área de la mina existen vizeachas, perdices, wallatas, patos silvestres, zorros y venados; así como también ganados domésticos como vacuno, ovino y auquénidos.

En el área de estudio existen 5 lagunas, reportándose la presencia de avifauna acuática en tres de ellas, Estas fueron las lagunas de Quelloacocha, Casanacocha y Totoracocha. En las dos lagunas restantes, Llancope y Jalancere, no se reportó su presencia.

De las cinco lagunas, es la Laguna Casanacocha la que presentó una mayor riqueza de especies, número de individuos y diversidad, con respecto a la avifauna estrechamente relacionada a ambientes acuáticos.

#### **2.2.2.3 Fauna.**

Se identificó un total de 32 especies diferentes de aves en el área de influencia del Proyecto Minero Las Bambas. Estas especies han sido determinadas durante la estación seca, por lo que sería necesaria una posterior evaluación en la

temporada húmeda. En el área del proyecto existen vizcachas, perdices, wallatas, patos silvestres, zorros y venados; así como también ganados domésticos como vacuno, ovino y auquénidos.

En el área de estudio existen 5 lagunas, reportándose la presencia de avifauna acuática en tres de ellas, Estas fueron las lagunas de Quelloacocha, Casanacocha y Totoracocha. En las dos lagunas restantes, Llancope y Jalancere, no se reportó su presencia.

De las cinco lagunas, es la Laguna Casanacocha la que presenta una mayor riqueza de especies, número de individuos y diversidad, con respecto a la avifauna estrechamente relacionada a ambientes acuáticos.

#### **2.2.2.4 Topografía.**

El área de la mina presenta una topografía bastante irregular, caracterizada por cumbres, quebradas poco profundas, llanuras y laderas de relieve suave. Las cumbres más altas son el cerro Chonta en Sulfobamba (4,682 msnm) y Pichacani en Chalcobamba (4,663 msnm); el relieve más bajo lo constituye las márgenes del Río Challhuahuacho (3,700 msnm).

Los relieves elevados y las superficies irregulares generalmente corresponden a afloramientos de calizas y rocas intrusivas y los relieves suaves corresponde a morrenas y rocas intrusivas de grano grueso; mientras que las llanuras están conformadas por sedimentos fluvio-glaciales en el sector norte del proyecto (Pamputa) y Noreste (Pumamarca), lo cual es propio de la Cordillera Oriental.



### 2.2.3 Reseña Histórica.

Los yacimientos de Las Bambas fueron descubiertos en 1911, época desde la cual se han realizado diversos estudios.

- 1911 - Las exploraciones fueron realizadas por la Empresa Ferrobamba Ltd. en el sector Las Bambas, se realizaron perforaciones con seis taladros diamantinos.
- 1942 – La Empresa Jenks realizó estudios geológicos en la zona de Las Bambas.
- 1952 - Se realizaron 366 estudios de comprobación de los metales para verificar sus leyes en la zona de Las Bambas, la empresa a cargo se llamaba Kruger.
- 1966 – La Empresa Cerro de Pasco Corporation realizó el mapeo geológico y perforaciones con taladros, llegando a 914 metros de profundidad, en la zona de Chalcobamba.
- 1993 – La Empresa Tintaya realizó ensayos químicos del mineral, con presencia de oro y plata. El estudio se realizó en las zonas de Chalcobamba y Ferrobamba.
- 1996 – La Empresa Cyprus hizo estudios en la zona de Chalcobamba, realizando perforaciones con seis taladros (933 metros).
- 1997 - La Empresa Phelps Dodge realizó perforaciones con ocho taladros (1,390 metros) en las zonas de Chalcobamba y Ferrobamba. Posteriormente Teck-Cominco realizó perforaciones con cuatro taladros (875 metros) en Chalcobamba. Al finalizar el año, BHP Tintaya, se ubicó en las zonas de Chalcobamba y Ferrobamba, realizando perforaciones con siete taladros (1,024 metros).
- 2002 – Centromín retoma el proyecto realizando 35 ensayos químicos por oro y plata en la zona de Las Bambas.
- 2003 – El proyecto pasa a Proinversión, en agosto se aprueba la estrategia de promoción y la convocatoria a precalificación. Durante los meses de setiembre a

diciembre se realizaron perforaciones con 11 taladros (2,328 metros) para actualizar información. Asimismo, en el mes de setiembre se realizó la suscripción del convenio de Promoción de la Inversión Privada en Apurímac (Gobierno Regional-Ministerio de Energía y Minas- Proinversión).

- 2004 – El 31 de agosto, Xstrata Copper (Suiza) ganó la licitación del proyecto las Bambas, ofreciendo US\$ 121 millones, el triple del precio base.
- 2010 - El 2 de setiembre, culminada ya la fase exploratoria, se suscribió el contrato en el que se le transfiere la titularidad de las concesiones mineras del proyecto a Xstrata Copper.
- 2013 - El grupo de minería y metales Glencore International PLC se fusiono con Xstrata PLC para formar la cuarta minera mundial y el mayor corredor de materias primas del mundo.
- 2014 - Glencore Xstrata, logró vender el 100% de participación en la mina de cobre Las Bambas, por cerca de US\$5,850 millones, a las compañías MMG Ltd, filial externa de China Minmetals Corp, el grupo de recursos naturales e infraestructura Guoxin Investment Corp International Ltd. (Sociedad Nacional de Minería Petróleo Y Energía, octubre, 2010).

#### **2.2.4 Geología.**

##### **2.2.4.1 Geomorfología.**

El área de Las Bambas se encuentra ubicada entre los 3800 a 4650 msnm en el área divisoria de las cuencas de los ríos Santo Tomas (hacia el Este) y Vilcabamba (hacia el Oeste) ambos pertenecientes a la cuenca del río Apurímac. El área está caracterizada por presentar un relieve montañoso y colinoso con pendientes que varían desde fuertes y moderadas a suaves. En las partes altas,

próximas a las divisorias de aguas, son cerrados, con un comportamiento acumulativo-erosivo, con predominancia de formación de terrazas aluviales la cual se alterna con socavación lateral.

#### **2.2.4.2 Geología Regional.**

La Mina Las Bambas se ubica en la franja de yacimientos de skarn de Cu (Mo-Au), asociados a sistemas tipo pórfido, ubicados en la parte sureste del Perú.

Esta franja metalogénica está controlada por el batolito Andahuaylas-Yauri del Eoceno- Oligoceno, que se ha emplazado en unidades sedimentarias del Mesozoico, siendo la de mayor importancia la formación Ferrobamba (Cretáceo inferior a superior). Las rocas intrusivas del batolito, en contacto con las calizas Ferrobamba, originaron metamorfismo de contacto y en algunos lugares cuerpos de skarn con mineralización de Cu (Mo-Au).

El batolito Andahuaylas-Yauri se ha emplazado al sur de la “Deflexión de Abancay”, con lineamientos de dirección NO-SE, NE-SO y otros que fueron generados principalmente por la Orogenia Andina.

#### **2.2.4.3 Geología Local.**

La mineralización de cobre en las Bambas está principalmente emplazada en los contactos de calizas de la formación Ferrobamba y las rocas intrusivas de la Era Terciaria (granodiorita, cuarzo monzonita y cuarzo diorita). Las calizas corresponden a la Era Cretácea, similar a los depósitos de Skarn en Tintaya, Antamina y Magistral.

La forma de mineralización más común es la calcopirita, que contiene oro y plata, asociados con cobre. La mineralización se distribuye en bloques fallados de granate y magnetita en Skarn. Las rocas con alteración potásica y

silicificación presentan calcopirita diseminada. La mineralización de enriquecimiento secundario es ligera, debido a la erosión glacial intensa y a la densidad de skarn. Las unidades litológicas ígneas y sedimentarias que afloran en el distrito minero de Las Bambas son las formaciones Hualhuani, Mara y Ferrobamba, cuyas eras van desde el Jurásico Superior al Cretáceo Superior.

#### 2.2.4.4 Geología del Tajo Ferrobamba.

La mineralización de cobre más común es la Calcopirita, que contiene oro y plata asociados con Cobre, el cual se encuentra principalmente emplazada en los contactos de calizas de la formación Ferrobamba y las rocas intrusivas de la Era Terciaria (granodiorita, cuarzo monzonita y cuarzo diorita). Las unidades litológicas ígneas y sedimentarias que afloran en el Distrito Minero, son las formaciones Hualhuani, Mara y Ferrobamba, cuyas eras van desde el Jurásico Superior al Cretáceo Superior; tiene una extensión con evidencias de mineralización de 300 Ha aproximadamente, presentados en la Figura 2.2 y 2.3.

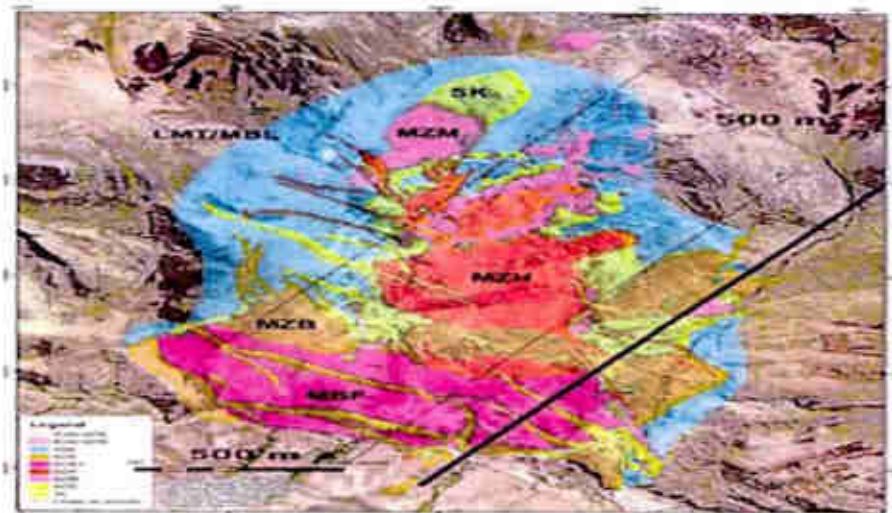


FIGURA 2-2. Modelo Geológico del Skarn Ferrobamba.

Fuente: Coffey Mining.



FIGURA 2-3. Vista Panorámica del Tajo Ferrobamba.

Fuente: Vista Extraída del Tajo Ferrobamba.

*A) Reservas y recursos.*

➤ Reserva de mineral:

6,9 millones de toneladas métricas de cobre (ley de cobre de 0,73 %).

➤ Recurso mineral:

10,5 millones de toneladas métricas de cobre (ley de cobre de 0,61 %).

**2.2.4.5 Geología Estructural.**

Las Bambas está regionalmente enmarcado en la margen sur de la deflexión de Abancay (12° a 14° Latitud Sur); esta estructura se caracteriza por evidenciar un cambio en el trend (tendencia) de los Andes Peruanos pasando de NO-SE a E-O por más de 200 km como consecuencia de la colisión diferencial de la Dorsal de Nazca con el margen litoral pacífico peruano predisponiendo su morfología actual (bayoneta).

Las Bambas, dentro de este contexto geológico regional, está localizado en el cinturón porfirítico/skarn Cu-Mo-Au denominado Skarn Andahuaylas-Yauri situado al SE del Perú, en una zona de anomalía atribuida a la orogénesis Inca del

Eoceno al Oligoceno temprano; este cinturón metalogénico está hospedado principalmente en el Batolito de Andahuaylas-Yauri, el cual presenta intrusiones múltiples de composición calcoalcalina. Las principales deformaciones en la región, causantes del fallamiento y plegamiento son asociadas a la fase Inca.

Localmente el área del yacimiento Las Bambas presenta rocas de naturaleza ácida (granodiorita) a intermedia (monzonita) que intruyen a las rocas sedimentarias y entre ellas a las calizas de la Formación Ferrobamba. Las monzonitas asociadas a los yacimientos de Ferrobamba, Chalcobamba, Charcas, Sulfobamba y Azuljaja obedecen a un alineamiento estructural NO de la misma dirección que el trend del batolito Andahuaylas – Yauri.

#### **2.2.4.6 Geología Económica.**

La mineralización de cobre en Las Bambas esta principalmente emplazada en los contactos de calizas de la formación Ferrobamba y las rocas intrusivas de la Era Terciaria (granodiorita, cuarzo monzonita y cuarzo diorita).

La forma de mineralización más común es la Calcopirita, que contiene oro y plata asociados con Cobre. La mineralización se distribuye en bloques fallados de granate y magnetita en skarn.

Las rocas con alteración potásica y silicificación presentan calcopirita diseminada. La mineralización de enriquecimiento secundario es ligera debido a la erosión glacial intensa y a la densidad de skarn.

Aunque varios minerales metálicos se han encontrado en Las Bambas, solamente algunos minerales ocurren en cantidades económicas y casi exclusivamente en el cuerpo skarn.

## 2.3 Diseño de Mina.

El plan de minado en el Área Las Bambas incluirá el desarrollo de tres tajos abiertos. El Tajo Ferrobamba tendrá una huella final de aproximadamente 311 Ha, el Tajo Chalcobamba de 130 Ha y el Tajo Sulfobamba de 75 Ha. Los tajos se excavarán mediante la conformación de una serie de bancos, los que hacen necesaria la construcción de un conjunto de rampas, taludes y bermas.

TABLA 2-4: Valores que se Utilizarán en el Diseño del Tajo en Las Bambas.

<b>Altura de Banco:</b>	15 m para banco simple y 30 m para banco doble
<b>Angulo de Talud Total:</b>	34° y ángulo de cara de banco de 65°
<b>Profundidad de los Tajos</b>	855 m para el Tajo Ferrobamba,
<b>Ancho de Rampa:</b>	35 m, basado en un camión típico de 300 ton.
<b>Ancho Mínimo de Expansión</b>	70 m por ambos costados y 45 m por un solo costado, considerando un radio de carguío de 30 metros
<b>Pendiente de Rampa:</b>	8% - 10%
<b>Altura de Berma (Vías):</b>	2.80 m

Fuente: Planeamiento Mina – Las Bambas.

La construcción de los tajos se llevará a cabo en fases, cuatro para el tajo Ferrobamba, dos para el tajo Chalcobamba y una para el tajo Sulfobamba.

### 2.3.1 Vías de Transporte en Las Bambas.

El sistema de transporte que se utiliza en Las Bambas está basado en camiones; la red de vías que se diseñaron obedecen a un componente crítico y vital dentro del proceso de producción. Por lo tanto, una vía con bajo rendimiento impactará inmediatamente en la productividad y los costos de producción. La seguridad de las operaciones, la productividad y la vida útil de los neumáticos son todos dependientes de vías de transporte bien diseñados, bien construidos y bien mantenidos.

Una vía de transporte bien construida permitirá que los camiones de transporte operen de manera segura y eficiente. Vías en malas condiciones pueden presentar problemas de seguridad no sólo para los camiones de transporte sino también para todos los usuarios de estas vías y de la misma manera disminuirán la vida útil de los neumáticos en los camiones mineros. Todo esto sin considerar que aproximadamente un tercio de los gastos de la operación son destinados a neumáticos. Ver la Figura 2-4 donde se tiene los costos de camiones gigantes.

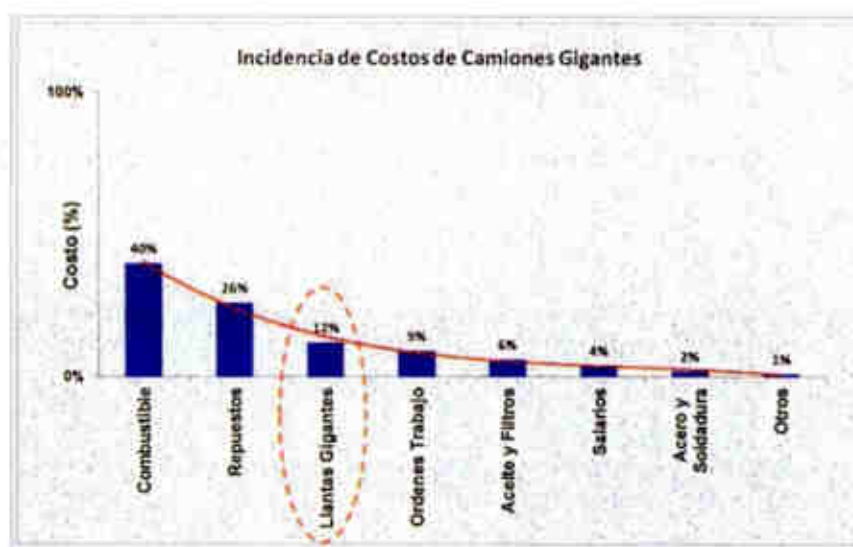


FIGURA 2-4. Gráfica de Incidencia - Costos de Camiones Gigantes.

Fuente: Guía de Aplicaciones de Máquinas para Minería – Caterpillar.

### 2.3.2 Enfoque Empírico del Diseño de Vías en Las Bambas.

Actualmente el diseño de vías de acarreo en Las Bambas se realiza en base a la experiencia ganada en otras operaciones mineras (prueba y error), las cuales son obtenidas en base al comportamiento observado de los materiales en campo. El estudio del problema de fatiga (deformación, ahuellamientos, etc.) de los materiales utilizados en la construcción de las vías no son tomados en cuenta, ya que, bajo un

gran número de aplicaciones de carga, los materiales tienden a fracturarse o bien a acumular deformación, dependiendo de su rigidez inicial, lo que causa algunos de los deterioros más significativos en la superficie de rodamiento de la vía, esto conlleva a la utilización de equipos auxiliares permanentemente para su mantenimiento, incrementando el costo operativo, desgaste prematuro de llantas y fatiga de los equipos; por ejemplo, la vida útil de las llantas de los camiones están en un promedio de 2,900 horas.

En este sentido, todo lo anterior manifestado lleva a la necesidad de profundizar en el conocimiento de los mecanismos de deformación de los materiales utilizados en las vías, con la finalidad de entenderlos y establecer entonces métodos de diseño que incorporen tal conocimiento a diseños más ajustados al comportamiento real de las estructuras de las vías, de tal manera que se pueda optimizar el negocio minero desde la perspectiva del comportamiento geotécnico de los materiales y por ende, aportar en la optimización de costos en el minado (ver Figura 2-5).

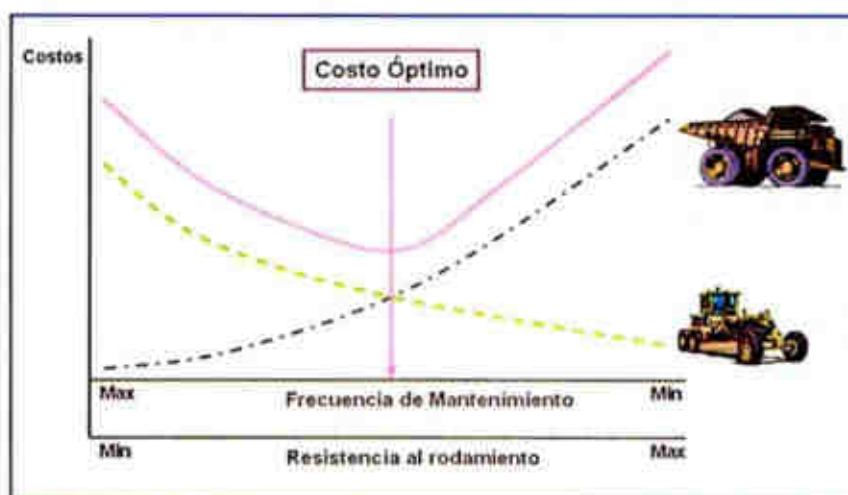


FIGURA 2-5. Optimización de costos en el mantenimiento de vías.  
Fuente: RJ Thompson (2015).

### 2.3.3 Enfoque de Diseño Integrado.

Thompson, RJ, (2015), menciona que muchos conceptos de la ingeniería de construcción de carreteras pueden ser adaptados en el diseño, construcción y mantenimiento de vías mineras. Sin embargo, diferencias significativas en las cargas aplicadas, los volúmenes de tráfico, la calidad y disponibilidad de los materiales de construcción, junto con las consideraciones de la vida del diseño y los costos definidos por el usuario de la vía, hace que el requisito para un diseño a la medida de las necesidades sea aparente.

Para diseñar una vía de transporte confiable y seguro, para obtener un rendimiento óptimo solo puede ser alcanzando a través de un **Enfoque de Diseño Integrado**.

Si uno de los componentes del diseño es deficiente, los otros componentes no funcionarán a su máximo potencial, y el desempeño de la vía se ve con frecuencia comprometido. Esto se ve más a menudo como “mantenimiento intensivo” o como vía con alta resistencia al rodado, traduciéndose en un incremento en los tiempos muertos del equipo y un aumento en el total de los costos de operación. La solución, sin embargo, no es necesariamente sólo “aumento en la frecuencia de mantenimiento”.

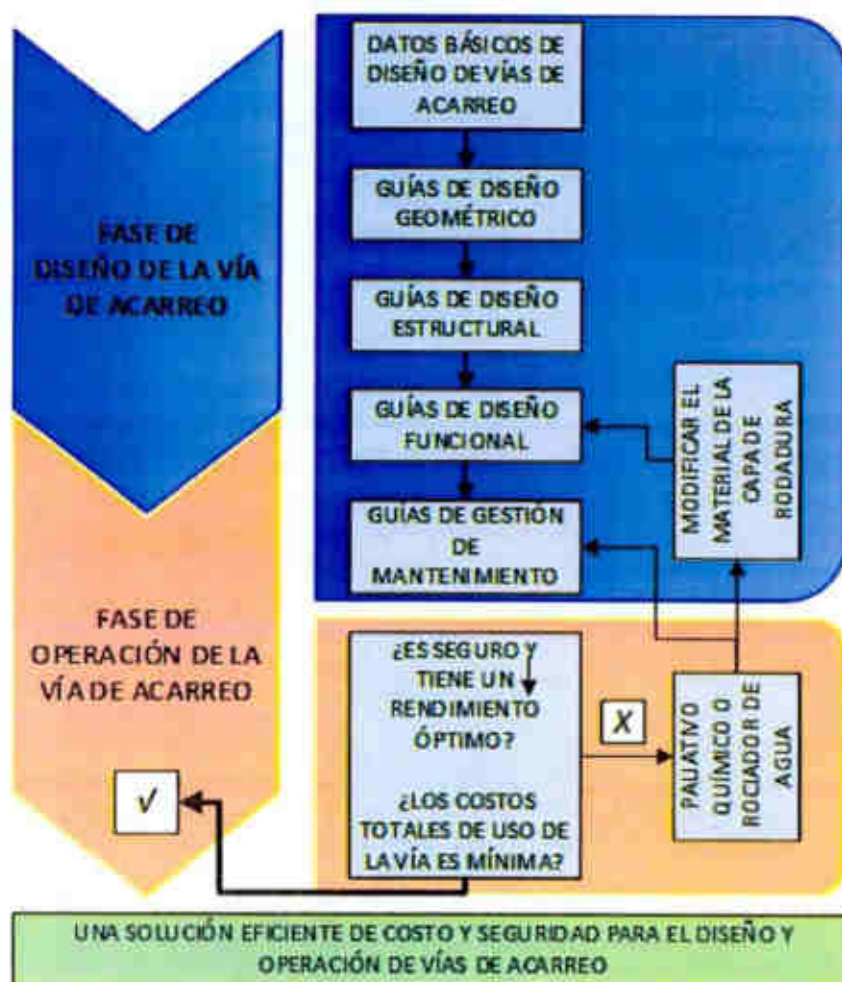


FIGURA 2-6. Modelo del Diseño Integrado de Vías.  
Fuente: RJ Thompson (2015).

### 2.3.3.1 Tipos de Diseño de un Enfoque Integrado.

#### A) Diseño Geométrico.

El diseño geométrico es comúnmente el punto de partida para cualquier vía de transporte y se refiere al trazado y alineamiento de la vía en ambas direcciones; plano horizontal (radio de curvatura, etc.) y plano vertical (inclinación, declive, gradiente de la rampa, cresta o corona, peralte de la curva), requerimiento de

distancias de frenado y de visibilidad, etc. dentro de los límites impuestos por el método de explotación.

Una vez que los datos del diseño de vías básico o los parámetros han sido establecidos, el diseño geométrico es el punto de partida del enfoque integrado para el diseño de vías.

El diseño geométrico se refiere al arreglo y alineamiento de la vía en:

- El plano vertical - aquí diseñamos para seguridad y eficiencia:
  - Distancias de visión y frenado, y
  - Gradientes de inclinación de rampa
- El plano horizontal - aquí diseñamos para seguridad y eficiencia:
  - Ancho de vía
  - Curvas
  - Peralte
  - Pendiente transversal o gradiente, y
  - Ubicación de intersecciones
- También se incluye en esta parte del diseño de:
  - Bermas, y
  - Drenaje.

El objetivo final es producir un diseño geométrico óptimamente eficiente y seguro.

#### **B) Diseño Estructural.**

Este se refiere al diseño de las capas que conforman la vía; normalmente este diseño se realiza una vez que el diseño geométrico se ha completado.



El diseño estructural proveerá a las vías de transporte la “resistencia” para soportar las cargas impuestas por las ruedas de los camiones durante la vida operativa de las vías, sin la necesidad de realizar un excesivo mantenimiento.

#### *C) Diseño Funcional.*

Este se refiere a la carpeta o superficie de rodadura; o sea cómo elegir el mejor material para la carpeta de rodadura y cómo reaccionará a los recorridos de los camiones sobre la capa y al ambiente en el que opera.

Primordialmente aquí hay algunas consideraciones:

- Generación de polvo, visibilidad para todos los usuarios, resistencia de rodadura.
- Transitabilidad durante climas lluviosos.

#### *D) Diseño de Mantenimiento.*

El diseño de mantenimiento identifica la frecuencia óptima de mantenimiento para cada sección de la red de vías de transporte, por consiguiente, el mantenimiento puede ser planeado, programado y priorizado para obtener un rendimiento óptimo y un costo total mínimo en toda la red de vías.

Una vía en malas condiciones siempre requerirá de muchas reparaciones o mantenimiento y trabajos por hacer. Esto disminuirá el rendimiento de los camiones debido a las malas vías y también se verán afectados debido a los mismos trabajos de mantenimiento. Cuanto mejor construidos estén las vías, menor mantenimiento será requerido.

Un poco de tiempo y esfuerzo invertido en la construcción siguiendo las “especificaciones” resultará beneficioso a largo plazo reduciendo trabajos de reparación y mejorará el rendimiento.

### 2.3.4 Importancia de Diseñar una Vía Minera.

Para que se entienda mejor la importancia de diseñar y construir una vía minera se plantea un ejemplo:

La Figura 2-7, muestra una sección longitudinal a través de la vía construida, el cual es comenzado a usar por los camiones. ¿Cuánto tiempo le tomara al camión completar el ciclo usando esta rampa con estas condiciones?



FIGURA 2-7. Sección Longitudinal de una vía Minera.  
Fuente: RJ Thompson (2015).

Supongamos que un camión de 380 ton, recorriendo una rampa en subida como se muestra en el diagrama, donde la pendiente de la vía varía entre 8% y 13%, y con una resistencia al rodado del 3%. Con este diseño de vía, una flota de 7 camiones podría producir 340 ton/hora-camión. Sin embargo, un excesivo cambio de transmisión en el recorrido cargado (debido a los cambios de grado de inclinación) reducirá la vida efectiva del motor, del motor del tren de transmisión,

de los aros y los neumáticos y en el recorrido de regreso, podría ocurrir sobrecalentamiento.

Sin embargo, removiendo los cambios de grados (usando un grado de inclinación constante del 10.3% desde el inicio hasta la cima), con una resistencia al rodado idéntica del 3%, 470 ton/hora-camión podrían ser producidas sería un incremento del 38% o 500.000 ton por año. Si se estableciera un objetivo anual de extraer 10 M ton, utilizando un diseño de vía mejorado y mejores directrices, el mismo objetivo de producción podría ser alcanzado utilizando 5 camiones en lugar de 7. Este desempeño puede ser mejorado aún más, si la resistencia al rodado es reducida de 3% a 2%. El cómo la resistencia al rodado afecta la productividad de la flota de camiones de transporte depende de varios factores, incluyendo el grado de inclinación de las rampas de transporte, tipo y modelo (tipo de motor, eléctrico o mecánico) de camión y el peso de la carga transportada. Una buena regla para un camión, es que:

- Un incremento del 1% en la resistencia al rodado equivale a una disminución del 10% en la velocidad del camión en la rampa, o una disminución del 26% de la velocidad en plano.

### 2.3.5 Tipos de Capas Estructurales que se Utilizan para Construir Vías Mineras.

#### 2.3.5.1 Sub-Grado/Capa "In situ".

Este es el material "in situ" en el que la vía será construida. Mientras más suave sea la capa de material "in situ", más gruesas deberán ser las capas de la base que protegerá la capa "in situ". Una pobre protección o cubierta significa que el material "in situ" se deformará bajo la carga ejercida por las ruedas de los

camiones y la vía se volverá muy irregular y desnivelada. Debido a que esta capa está en la parte inferior de la vía, es muy costoso reparar este tipo de problemas.

#### **2.3.5.2 Capa Sub-Base.**

Esta es la capa encima de la capa “in situ”. La base de un vía bien drenado y estable es uno de los fundamentos más importantes en el diseño de vías. Si las capas inferiores de la vía no son lo suficientemente resistentes o rígidas, siempre ocurrirán hundimientos, baches y deformaciones.

#### **2.3.5.3 Capa Base.**

Esta es la capa inmediatamente debajo de la carpeta de rodamiento. Es importante porque protege el material suave debajo del peso del camión pasando sobre la carpeta de rodado. Cuando el peso (o carga) del camión de transporte, es aplicado a una capa débil, y suave del material “in situ” o el relleno, causará que este material se desplace y eventualmente se deforme, resultando en hundimientos, baches y otros defectos estructurales similares.

#### **2.3.5.4 Capa de Rodamiento.**

Esta es la capa de material en la parte superior de la vía, también llamada superficie. Para vías de minas comúnmente es utilizada una mezcla de grava porque la carpeta de rodamiento controla el cómo se desempeña la vía y controla cómo el usuario interactúa con la vía. Tanto la seguridad y la productividad son influenciadas por el desempeño de la carpeta de rodadura. Cuando una vía es “mantenida” o aplanada, es la carpeta de rodadura la que trabajamos.

### **2.3.6 Equipos Necesarios para la Construcción de Vías Mineras.**

#### **2.3.6.1 Tractor de Orugas "Bulldózer".**

Usado primariamente para nivelar y dar forma a la capa "in situ" y seleccionar roca estéril quebrada o fragmentada que servirá de base o las capas de material "in situ" (una vía es construida en una mina con material fragmentado). El "Bulldózer" deberá ser capaz de darle forma a la capa de roca (a la base) sobre la que la vía será construida. Para hacer esto, deberá de ser capaz de raspar y nivelar el material suelto si es requerido, empujarlo para perfilarlo (o nivelarlo) y remover rocas de gran tamaño.

También deberá de ser capaz de abrir y esparcir roca vaciada por los camiones como parte del proceso de construcción. Al hacer esto, el "Bulldózer" será también parte del proceso de compactación y formará una superficie lisa sobre la cual el vibrador o compactador de rodillo operará. Mientras más grande sea el "Bulldózer", mayor será la resistencia inicial de la capa de roca y los requerimientos de compactación serán reducidos (pero no eliminados).

#### **2.3.6.2 Rodillo Vibrador.**

Un rodillo vibrador grande (230kN de fuerza vibratoria) puede ayudar en la compactación de las capas especialmente en material "in situ" compuesto de grava, relleno, en la sub base, la base y en la superficie de rodado. Para compactar el material de la carpeta de rodado, un rodillo vibrador puede ser usado con o sin vibración. Este compactador es superior a cualquier otro tipo de equipos de compactación para esta capa.

#### **2.3.6.3 Motoniveladora.**

Una Motoniveladora es usada durante la construcción:

- Para separar y esparcir el material de roca triturada como un inicio o reducir la delgada capa superior de la capa base de roca quebrada.
- Para separar y esparcir los materiales seleccionados que serán usados como parte de la construcción de la superficie de rodadura.
- Completar el perfilado o corte final de la superficie de rodadura una vez que la compactación haya sido completada.
- Escarificar (“ripping” - rasgado superficial) el material “in situ” suave o de la superficie de rodadura.

El mantenimiento rutinario para nivelar (raspar) la superficie de rodadura de una vía y la redistribución de la capa de rodadura de forma homogénea a través de la vía.

#### **2.3.6.4 Camiones Cisterna con Barra Aspersora.**

Los camiones cisterna son muy importantes, especialmente durante la compactación de las capas. Debe de aplicar agua sobre el material suelto que ha sido compactado, para llevar el material hasta a lo que es referido como Contenido de Humedad Optimo. Este es el contenido de humedad en el material asociada con su máxima densidad, que se verá más adelante, máxima resistencia.

En vías terminadas, una boquilla con barra de rociado es una mejor solución para un regado efectivo que un regado por goteo. Las boquillas dan una cobertura más adecuada, menor saturación del material con agua y mejor eficiencia de los camiones cisterna. Un regado ligero mejora la productividad del camión cisterna y reduce la erosión de la vía.

### 2.3.7 Materiales para la Construcción de Vías Mineras.

Una vía puede ser construido casi sobre cualquier material “in situ” pero si ese material es particularmente poco resistente puede deformarse fácilmente cuando una carga es aplicada, entonces una capa de material mucho más gruesa será requerida para proteger el material “in situ” de la carga aplicada por los neumáticos del camión.

Similarmente, si los materiales que usamos para construir la misma vía minera fueran débiles, una serie de capas gruesas y más resistentes también serán requeridas.

En las especificaciones de un diseño estructural, se consideran tres tipos de materiales:

- a) El material “in situ” (sub-grado) en el cual la vía es construida,
- b) La sub base y la capa base,
- c) La capa o superficie de rodadura, la cual es colocada en la parte superior de la capa base.

#### 2.3.7.1 Material “In situ”.

Estos pueden ser cualquiera de los siguientes:

- 1) Suelos;
- 2) Cubierta de material erosionado;
- 3) Cubierta de roca dura quebrada y suelta
- 4) Cubierta de roca dura sólida.

Cuando se está planeando una nueva vía, la primera tarea es encontrar que tan duro o suave es el material sobre el que vamos a construir la vía.

Si la capa "in situ" es dura, cubierta de roca sólida, entonces generalmente no tendremos problemas. Esta es resistente y no necesita mucha protección de las cargas aplicadas por los neumáticos de los camiones. De manera similar, para una buena y resistente cubierta de roca quebrada, es a menudo suficiente acomodar y compactar los 300 mm de material de la parte superior antes de colocar la superficie de rodado.

Si el material "in situ" es una cubierta de material erosionado o de baja compactación, éste será mucho más suave y por lo tanto requerirá mayor protección o una sub base más gruesa y una capa base encima de ésta.

#### **2.3.7.2 Capa Base y Sub Base.**

Usando una metodología de diseño mecánicamente determinado, donde una cubierta de roca quebrada/material estéril de buena calidad (no-erosionado) está disponible, puede ser usada como la base y sub-base combinadas. Es importante que el bloque de roca quebrada seleccionada como fuente para esta capa no contenga roca erosionada, arcilla o tierra, ya que para esta capa necesitamos material en bloque y duro, con apenas un poco de materiales finos (menos del 20%). El tamaño del bloque más grande es idealmente 2/3 del espesor de la capa de diseño, la cual es normalmente entre 200-300 mm máximo.

#### **2.3.7.3 Superficie de Rodadura.**

Esta capa está hecha de uno solo, o una mezcla de materiales. Cuando los parámetros de la carpeta de rodadura son determinados, el resultado (de uno solo, o una mezcla de materiales) deben encontrarse dentro de estas recomendaciones. Si esto no es así, las especificaciones también dan una idea de los defectos que normalmente se producen como consecuencia de ello. Los límites recomendados

para la selección de estos materiales son establecidos tanto en términos de rendimiento y degradación minimizada (degradación equivale al aumento de la resistencia a la rodadura). Para lograr una capa de buena resistencia, el o los materiales para esta capa debe de ser seleccionada cuidadosamente.

### **2.3.8 Clasificación de Vías de Transporte.**

Todas las vías mineras deben satisfacer una función dentro de una jerarquía vial definida por el sitio, lo que se relaciona directamente con la importancia de la vía dentro de la operación minera. Cada tipo de jerarquía ayuda a especificar el tipo de tráfico vehicular que habitualmente utilizará la vía y para determinar la carga de tráfico. Esto brinda datos para el diseño de la calzada caminera, el criterio de diseño geométrico, el nivel de las instalaciones de gestión de tráfico requerido, el espesor de la calzada, los niveles de intervención de mantenimiento, etc.

En el caso de Las Bambas, se ha adoptado una jerarquía vial de cuatro niveles, la que se presenta en la Tabla 2-5. Cada nivel de la jerarquía de servicios satisface la operación de la mina de manera diferente y se define principalmente por el tipo de vehículo y el volumen de tráfico que lo utiliza.

Pueden existir ejemplos en que una vía de acarreo puede ser asignado a una categoría, y a medida que se desarrolla la mina, la vía de acarreo puede ser elevado a otra categoría. Con el correr del tiempo, los cambios de categoría pueden requerir ensanche, mejora de la calzada, cambio de señales viales, barreras laterales, etc., para cumplir con la nueva función de la vía.

TABLA 2-5. Jerarquía de las Vías de la Mina.

Clase de camino	Tipo de Camino	Tipo Dominante de Vehículo	Volúmen Habitual de Tráfico	Descripción
	Caminos de acarreo	Camiones mineros, por ej.: Komatsu 930Es y Cat 797F, carretones de agua, niveladoras y otros vehículos especializados de gran tamaño utilizados en operaciones de apoyo.		Caminos permanentes y de corto plazo que brindan acceso a camiones de acarreo como parte del desarrollo y la operación minera, incluyendo la construcción de la infraestructura y servicios de apoyo, tales como vertederos, presas, movimiento de escombros y mena, etc.
		Categoría I	> 750	Caminos de acarreo principales permanentes de alto volumen que conectan canteras activas con ROM, plantas trituradoras y vertederos activos de desecho.
		Categoría II	400 – 750	Caminos de acarreo semipermanentes de alto volumen que habitualmente conectan canteras activas con caminos de acarreo Categoría I, rampas de canteras.
		Categoría III	< 400	Caminos de acarreo semipermanentes de alto a bajo volumen que habitualmente conectan áreas de operación con caminos de acarreo Categoría I, por ej.: caminos de canteras, caminos de servicio de ROM, plantas trituradoras, presas de colas, etc.
B	Caminos de acceso para vehículos livianos	Camionetas de doble tracción, buses de traslado de personal, camiones tanque de combustible	> 250	Caminos permanentes que brindan acceso a vehículos livianos (únicamente) a áreas de operaciones mineras activas. Los caminos Clase B pueden cruzar caminos Clase A, pero su acceso está restringido únicamente para vehículos livianos.
C	Caminos de acceso a instalaciones del sitio	Depende de la Instalación. Puede incluir vehículos livianos, minibuses y camiones de traslado de remolques.	> 500	Caminos permanentes que brindan acceso a vehículos livianos entre campo / administración y áreas de operación minera, incluyendo plataformas de perforación, canteras activas, plantas trituradoras, presas y plantas de agua, canteras de calzada, etc.
D	Caminos de acceso público	Vehículos livianos y vehículos de uso público	> 250	Caminos permanentes que brindan acceso a vehículos livianos, tales como automóviles, buses y camiones utilizados por el público en general que vinculan espacios públicos y comunidades y que brindan acceso desde Las Bambas hasta pueblos y localidades cercanas y viceversa.
E	Zonas compartidas	Vehículos livianos, vehículo de uso público en general y peatones	> 250	Caminos permanentes dentro y alrededor de las áreas del campo y de oficinas de administración donde peatones circulan frecuentemente para llegar a instalaciones y vehículos livianos que pasan a través de las áreas de acceso a estacionamientos.

Fuente: Adaptado de Thompson (2011).

### 2.3.9 Criterios para el Diseño de Vías Mineras.

Una vez que las categorías de vías han sido determinadas, se necesitan establecer los datos clave de rendimiento de los camiones que usan las vías. A continuación, hay algunos puntos clave a considerar, y como cada pieza de los datos es integrada dentro de las 4 componentes de diseños discutidas anteriormente.

#### 2.3.9.1 Capacidad de Pendiente de un Camión.

La capacidad de un camión para subir una pendiente determinará la gradiente óptima de la vía. Las vías de transportes largos y planos pueden ser tan lentos como las vías de transportes cortos e inclinados, y hay un grado de inclinación óptimo (específicamente en términos de resistencia total al grado de inclinación más la resistencia a la rodadura) que minimiza el tiempo total de transporte.

Este grado de inclinación óptimo debe ser adoptado para la base del diseño geométrico (rampa) y cuidadosamente debe tomarse nota de los sensibles cambios en la resistencia a la rodadura. Como se mencionó anteriormente, una buena regla es que un incremento del 1% en la resistencia a la rodadura en una inclinación de 10% equivale a una pérdida en velocidad de alrededor del 10%-13%.

#### 2.3.9.2 Retardo o Frenado.

El rendimiento de frenado de un camión es una consideración clave en el diseño de vías, especialmente cuando el camión es usado en un grado de configuración de carga-favorable (cuesta abajo). Para más configuraciones convencionales de carga-desfavorable (cuesta arriba), el rendimiento de frenado es solo considerado una vez que el grado óptimo de inclinación o pendiente ha sido especificado y el impacto de esta decisión analizado en la velocidad del camión y la



geometría de la vía. En este caso, la resistencia total efectiva es el grado de inclinación de la rampa menos la resistencia al rodado.

### 2.3.9.3 Dimensiones.

Varias dimensiones clave son requeridas sobre todo para confirmar los requisitos de los componentes del diseño geométrico. Estos suelen ser:

- Diámetro de espacio del círculo de giro usado para especificar los radios de giro mínimos de las vías en zigzag o “switchbacks”;
- Altura de línea de visión de los conductores usada cuando se evalúa la distancia de visibilidad de los conductores en curvas verticales (especialmente en curvas cóncavas/verticales) y comparando con las distancias mínimas de frenado; cuando la distancia de frenado excede la distancia de visión, los límites de velocidad son aplicados para reducir la distancia de frenado de regreso dentro de las limitaciones de las distancias de visibilidad.
- Ancho total del equipo usado para determinar el ancho de carriles y carpeta de rodadura de la vía.
- Tamaño del neumático, usado para diseñar la berma.

Desde la perspectiva del diseño estructural, necesitamos considerar como la carga es aplicada a la vía en términos de la distancia entre ejes y el espacio de la línea central de los neumáticos, usando:

- Ancho de funcionamiento,
  - Ancho central de los neumáticos frontales,
  - Ancho central de los neumáticos dobles traseros,
- Ancho general de los neumáticos.

#### 2.3.9.4 Cargas.

Desde la perspectiva de diseño estructural, necesitamos considerar que carga es aplicada a la vía en términos de:

- Peso bruto de operación de la maquinaria opcionalmente usando la masa del vehículo vacío más 1.2 x la carga útil (para acomodar el límite de carga 10:10:20 del camión) esto datos podrían ser los limitantes del diseño estructural, usados para determinar la carga máxima de las ruedas aplicada sobre la vía, en conjunto con: la distribución del peso a través de los ejes frontal y trasero (vehículo cargado y sin carga);
- Volúmenes diarios de tráfico de camiones basado en toneladas transportadas y capacidad de los camiones, los datos son usados para determinar la categoría del transporte requerido, y también para modelar el cambio en la resistencia a la rodadura asociado con la deterioración de la capa de rodadura.

#### 2.3.10 Neumático.

Un neumático (relativo al pulmón, por el aire que lleva), también denominado cubierta o llanta en algunas regiones, es una pieza toroidal de caucho que se coloca en las ruedas de diversos vehículos y máquinas. Su función principal es permitir un contacto adecuado por adherencia y fricción con el pavimento o vía, posibilitando el arranque, el frenado y la guía.

Los neumáticos generalmente tienen hilos que los refuerzan. Dependiendo de la orientación de estos hilos, se clasifican en diagonales o radiales. Los de tipo radial son el estándar para casi todos los equipos modernos. Ver figura 2-8.

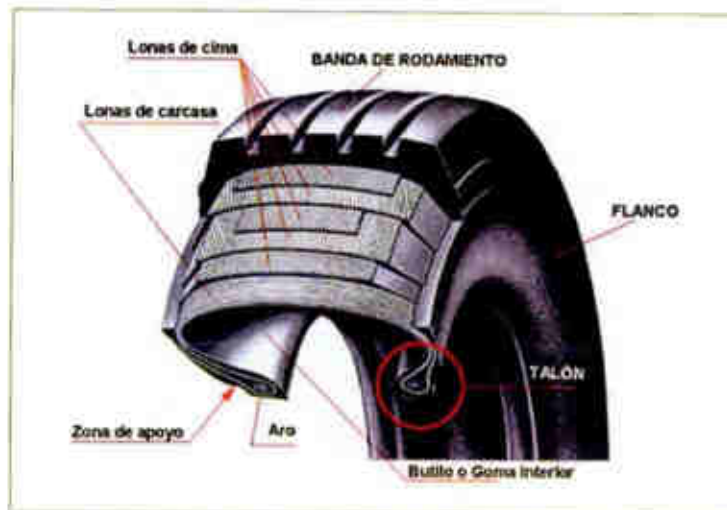


FIGURA 2-8. Partes de un Neumático.  
Fuente: Manual de Michelin.

### 2.3.10.1 Construcción de Neumáticos.

#### A) Neumático Macizo.

En las carretillas elevadoras, se utiliza el bandaje macizo desde hace tiempo. Consta de un apilado de gomas con distintas propiedades con objeto de dotarle de la adherencia y la tracción necesaria.

Se han podido ver sus limitaciones en una utilización intensiva: rápido desgaste, debido, tanto al importante calentamiento de la goma, como a riesgos de deterioro al paso de obstáculos. El neumático macizo se "rompe".

#### B) Neumático Convencional.

Un neumático convencional de estructura diagonal consta de capas textiles de "nylon" o de rayón, cruzadas unas con otras y unidas entre sí por una mezcla de gomas. El número de capas aumenta con la capacidad de carga exigida al neumático.

En un neumático diagonal, las fricciones entre las capas provocan calentamientos perjudiciales, mientras que se observa una deformación de la superficie de contacto con el suelo, debido a una fuerte unión flanco / cima. De ello se desprende un desgaste más rápido y una menor adherencia.

### **C) Neumático Radial.**

Asocia capas metálicas o textiles, que van de un talón al otro, a una cintura de lonas de acero indeformable que refuerza la cima del neumático.

En resumen, la arquitectura radial reduce el roce y el consumo de energía. Mejora la adherencia y reduce el desgaste, mientras que su cintura de acero resiste mejor a las perforaciones.

La carcasa del neumático radial está integrada por una o más capas metálicas que van de un talón al otro. Está ceñida por tres o cuatro capas en la cima de acero indeformable.

Esta estructura radial permite disociar el trabajo de la cima con el de los flancos. La separación de las funciones proporciona al neumático mayores prestaciones. Es por ello que el neumático radial permite obtener mayor adherencia minimizando el deslizamiento, reduciendo, de este modo, la velocidad de desgaste. La cima del neumático radial cinturada resiste mejor a las agresiones y perforaciones. Su gran espesor de goma le asegura una mayor longevidad. Sus flancos, más flexibles, proporcionan mayor "confort", sin que ello vaya en detrimento de la estabilidad, lo que aporta una mayor seguridad.

### **D) Neumático Radial de Tubeless.**

Un neumático radial Tubeless es un neumático que se monta sin cámara sobre una llanta especial provista de una válvula apropiada.

El neumático radial Tubeless se presenta, en su parte exterior, como un neumático tube tipo (montaje con cámara de aire). Su fabricación es idéntica desde el punto de vista arquitectónico; pero, por dentro de la cubierta, una capa de goma especial (butyl) garantiza su estanqueidad total.

Las ventajas son muchas:

- Desaparece el riesgo de pellizcar la cámara.
- No queda aire aprisionado entre el neumático y la cámara.
- Eliminación de un desinflado brutal (la pérdida de aire es lenta y no hace falta hacer la reparación in situ, ya que da tiempo a veces a llegar al taller de reparación).

Dado que el conjunto es perfectamente estanco, no hay riesgo de oxidación interior de la llanta.

#### 2.3.10.2 Tipos de Gomas.

##### A) Michelin.

- Tipo A4: Particularmente resistente a los cortes, arrancamientos y abrasión.
- Tipo A: Particularmente resistente a los cortes, arrancamientos, abrasión y a velocidades medias más elevadas que el tipo A4.
- Tipo B4: Compromiso entre la resistencia a la abrasión y al calentamiento sobre suelos de poca agresividad (a partir de 49 pulgadas).
- Tipo B: Resistencia al calentamiento sobre suelos poco agresivos.
- Tipo C4: Particularmente adaptado a los rodajes muy rápidos en cielos largos.
- Tipo C: Muy resistente al calentamiento durante largos trayectos y rodaje intenso.

### 2.3.10.3 Profundidades de Cocadas.

Se distinguen cuatro grandes categorías de neumáticos de Ingeniería, caracterizados por su profundidad de dibujo (o altura de banda de rodamiento) diferente, y que se eligen con arreglo a los usos y a las naturalezas del suelo. Ver figura 2-9.

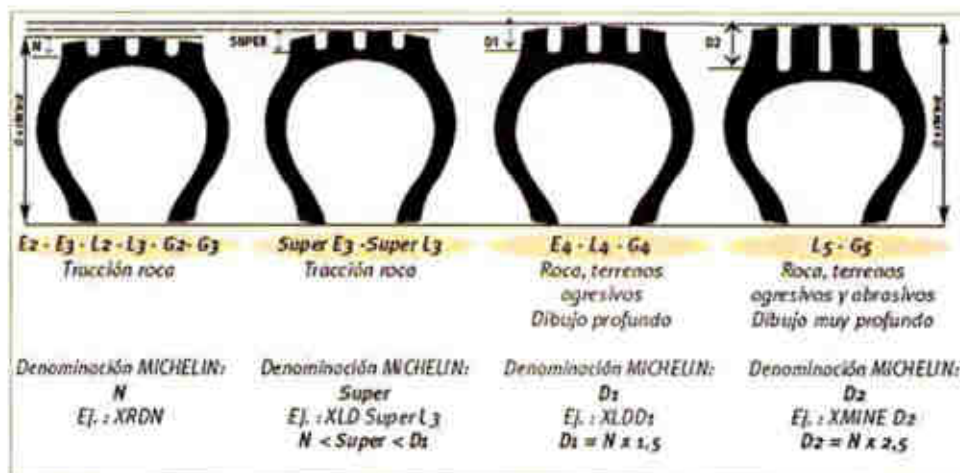


FIGURA 2-9. Distintas Profundidades de cocadas para Neumáticos Michelin.  
Fuente: Manual de Michelin.

### 2.3.10.4 Funcionamiento de un Neumático.

A un neumático se le exigen muchas cualidades, entre las que figuran:

- Resistencia al desgaste.
- Resistencia a los choques y a los cortes.
- "Confort".
- Adherencia.
- Flotación.
- Tracción.
- Estabilidad.

- Baja resistencia a la rodadura.
- Que se pueda renecauchar.
- Que se pueda reparar.
- Resistencia al calentamiento.
- Resistencia a la carga.
- Resistencia a la velocidad.

Por otra parte, la compra de los neumáticos siempre supone un presupuesto significativo. Ahora bien, la aplicación de normas sencillas permite utilizar los neumáticos a su mejor potencial e incrementar, de este modo, la productividad del centro de explotación.

El neumático, inflado con aire (o con nitrógeno), es el órgano de contacto entre el suelo y la máquina. Está sometido a numerosas tensiones:

- La presión.
- La carga.
- La velocidad.
- La temperatura.
- La naturaleza de los suelos.
- El estado de las pistas.

El tipo de neumático más adecuado será el que permita reducir el conjunto de dichas tensiones sin favorecer a ninguna. Se trata, por tanto, de encontrar el mejor compromiso posible.

#### *2.3.10.5 Principales Causas de Deterioro de un Neumático.*

##### *A) Inflado Insuficiente.*

Incremento de la flexión del neumático, de donde se deriva el incremento de la temperatura dentro del neumático.

##### *B) Sobre Inflado.*

Desgaste prematuro de la banda de rodamiento, y una mayor sensibilidad a los choques y a los cortes.

##### *C) Sobrecarga.*

Desgaste prematuro de la banda de rodamiento, sensibilización de los flancos e incremento de la flexión del neumático, lo que origina un aumento de la temperatura dentro del neumático.

##### *D) Velocidad Excesiva.*

Aumento de la temperatura dentro del neumático y desgaste prematuro de la banda de rodamiento.

#### *2.3.10.6 Factores que Influyen en la Duración de la Vida Útil de los Neumáticos.*

##### *A) La Temperatura Interna de Funcionamiento.*

Cuando un neumático rueda, se calienta debido a:

- El trabajo que efectúa.
- El calentamiento de los tambores de freno.
- El calentamiento de los reductores.

La temperatura crítica interna del aire en un neumático es el límite a partir del cual existe un peligro para el neumático. En ausencia de fuentes térmicas exteriores al neumático, se admite que dicha temperatura crítica se alcance cuando

el aire que se encuentra en el interior del neumático llega a 80° C (dicha temperatura es siempre más baja que la temperatura interna del propio neumático).

### B) *Influencia de la Presión en la Duración de un Neumático.*

La presión es uno de los factores esenciales para la duración de vida útil de un neumático y su rendimiento, presente en la Figura 2-10.

Por lo que podemos mencionar que:

- Un inflado insuficiente en un 10% reduce la duración del neumático en un 10%.
- Un inflado insuficiente en un 20% reduce la duración del neumático en un 25%.
- Un inflado insuficiente en un 30% reduce la duración del neumático en un 50%.
- Un sobre inflado de un 10% reduce la duración del neumático en un 5%.
- Un sobre inflado de un 20% reduce la duración del neumático en un 10%.
- Un sobre inflado de un 30% reduce la duración del neumático en un 20%.

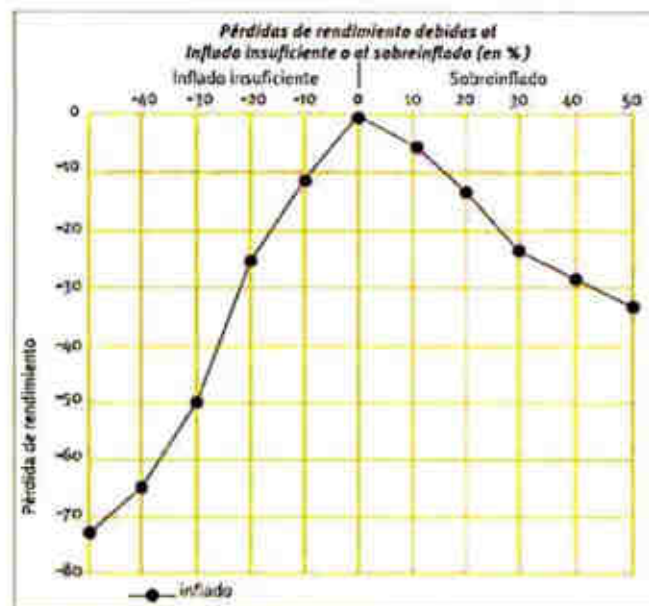


FIGURA 2-10. Pérdida de Rendimiento en Función al Inflado del Neumático.  
Fuente: Guía de Mantenimiento de los Neumáticos – Obras Públicas y Minería.

**C) *Influencia de las Condiciones Climáticas.***

Dependiendo de que la temperatura sea más o menos elevada o de que el clima sea seco o húmedo, el neumático soportará las consecuencias.

**D) *Posición de los Neumáticos en el Vehículo.***

Se admite que los neumáticos montados sobre ruedas motrices tienen una duración por desgaste inferior en un 25% en comparación con los montados sobre ruedas directrices.

**E) *Diferencia Entre los Diámetros de los Neumáticos.***

Un diámetro diferente (desgaste diferente, neumáticos de tipos o de marcas distintas) entre dos neumáticos de un conjunto de ruedas gemelas (máquinas de transporte) o entre eje delantero y eje posterior (cargadoras) genera un desgaste más rápido e irregular del conjunto de los neumáticos.

**F) *La Sobrecarga.***

A veces encontramos una sobrecarga en los neumáticos, sobrecarga que se debe, a veces, a la naturaleza y al estado del material transportado, así como a la forma en que se efectúa la carga.

Por lo que podemos mencionar que:

- Una sobrecarga del 10% reduce la duración del neumático en un 15%.
- Una sobrecarga del 20% reduce la duración del neumático en un 30%.
- Una sobrecarga del 30% reduce la duración del neumático en un 50%.

**G) *La Conducción de la Máquina.***

La manera de conducir la máquina influirá en la duración de los neumáticos.

En efecto, la frecuencia:



- De los frenazos brutales y repetitivos.
- De las bruscas aceleraciones.
- De las curvas tomadas a gran velocidad (aumento excesivo del calentamiento).
- Del patinazo de las ruedas motrices (caso de los “scrapers” durante la carga).
- De la mala conducción de una cargadora durante la carga (patinazo de las ruedas) se reduce de forma espectacular la vida de los neumáticos.

#### ***H) La Duración y la Longitud de los Ciclos.***

Unos ciclos largos, sobre todo en pistas acondicionadas, favorecen velocidades elevadas y, por tanto, importantes elevaciones de la temperatura en el interior de los neumáticos.

Lo mismo ocurre cuando es importante el tiempo de rodaje en comparación con el tiempo de reposo del vehículo.

#### ***I) El Mantenimiento Mecánico de los Equipos.***

El mal estado mecánico de una máquina puede influir en la duración de vida de los neumáticos.

- Unos frenos defectuosos, hacen que se calienten excesivamente las ruedas metálicas y, por tanto, los neumáticos.
- Un paralelismo incorrecto de las ruedas directrices de una máquina de transporte.
- Holgura en las manguetas, rótulas, pivote, etc.

En estos dos últimos casos, el neumático se desgastará de una forma anormalmente rápida. Para simplificar, los neumáticos de un mismo eje ya no estarán en paralelo y no rodarán sobre el suelo, sino que resbalarán por encima.



### *J) El Trazado y el Mantenimiento de las Vías.*

El perfil de las vías, longitudinal y transversal, la forma y el trazado de las curvas, así como la importancia de las pendientes, tienen una importancia significativa en la sobrecarga dinámica (en el caso de subida o bajada con carga) y en el ripado de los neumáticos, favoreciendo la separación de la banda de rodamiento de la carcasa.

- Una pendiente en descenso (descenso con carga de una máquina de transporte) incrementará la carga sobre el eje anterior con el valor de la pendiente.
- Una pista inclinada, en línea recta, o en curva con peralte incrementara de forma significativa la carga soportada por los neumáticos situados en el lado contrario al peralte.

Un mantenimiento regular de las pistas, la limpieza de las áreas de carga y la retirada de cualquier obstáculo (rocas caídas durante el transporte, residuos, etc.) preservan los neumáticos de accidentes tales como choques, cortes, perforaciones, etc.

La determinación de la presión y el asegurar su conservación son vitales para optimizar el servicio prestado por el neumático y la longevidad del mismo.

En una obra, las agresiones de todo tipo para el neumático son permanentes. Pero cualquier cambio en las condiciones de explotación, naturaleza del suelo, longitud de los ciclos y perfil de las pistas puede hacer inadecuado a un neumático que había dado resultados plenamente satisfactorios hasta entonces. Por lo general, es necesario volver a hacer un estudio de la obra.

*K) Estado de las Vías.*

El mal estado de las vías y la presencia de rocas genera desgaste prematuro de la banda de rodamiento, cortes en el flanco y la banda de rodamiento. Los daños pueden agravarse o producirse debido a las fuerzas mecánicas generadas por:

- Fuerzas laterales que aparecen en las curvas de muy bajo radio.
- Choques con los suelos mal mantenidos.
- Martilleo debido al estado de la superficie del suelo.

## CAPÍTULO III

### GEOMETRÍA DE VÍAS Y MANTENIMIENTO

#### 3.1 Distribución del Peso del Camión en las Vías.

Peso total del camión vacío incluye, el peso de lubricantes, líquido de refrigeración, tanque lleno de combustible y cuerpo estándar es de **215,308 Kg.**

Peso máximo del camión cargado incluye, lubricantes, líquido de refrigeración, tanque lleno de combustible y carga útil (290,302.00 kg), con llantas grandes instaladas, que es de **505, 611 Kg.** Ver Figura 3-1.

**TABLA 3-1.** Distribución del peso del camión Komatsu 930E-4SE (vacío y cargado).

Camión	Eje	Nº de Neumáticos	Distribución peso (%)	Peso (Kg)	Peso soportado por neumático	Presión del Neumático
Vacío	Delantero	2	48.5	104,460	52,230 kg- 52.23 Ton	758 Kpa-110 Psi
	Trasero	4	51.5	110, 848	27,712 kg- 27.71 Ton	758 Kpa-110 Psi
Cargado	Delantero	2	32.8	165,958	82,979 kg - 82.98 Ton	758 Kpa-110 Psi
	Trasero	4	67.2	339,653	84,913 kg - 84.91 Ton	758 Kpa-110 Psi

Fuente: Manual de Komatsu.

### 3.2 Diseño Geométrico.

El diseño geométrico de una vía de mina es dictado en gran parte por el método de explotación usado y por la geometría del área a explotar y del cuerpo mineralizado.

El trazado de la vía o alineación, tanto horizontal y vertical es generalmente el punto de partida del diseño geométrico. Cualquier desviación de las especificaciones ideales dará lugar a reducciones en el rendimiento de la vía y del equipo de transporte.

El proceso de diseño geométrico comienza con un objetivo simple de conectar dos puntos, y este objetivo es incrementalmente mejorado a medida que las especificaciones geométricas son aplicadas y cumplidas. Los pasos se muestran a continuación en la Figura 3-1:



FIGURA 3-1. Diseño Geométrico para Las Bambas.

Fuente: RJ Thompson (2015).

### 3.2.1 Diseño Geométrico para Las Bambas.

#### 3.2.1.1 Diseño del Ancho de Vía Según Varios Autores.

##### A) Según Ault and Kaufman.

##### a) Para una sola vía:

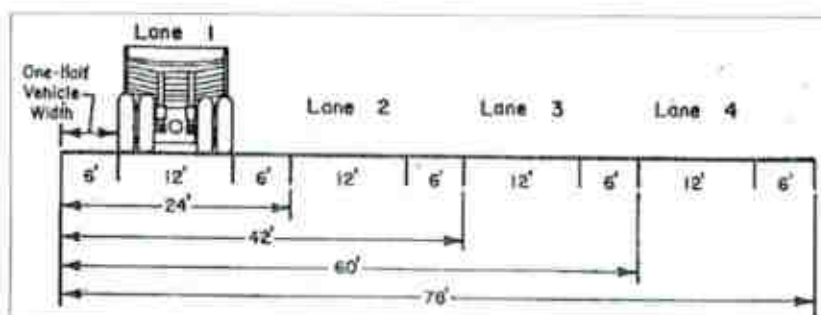


FIGURA 3-2. Anchos de Vía para un Camión de 3.66 m.

Fuente: Ault and Kaufman (1977).

TABLA 3-2. Tabla de Anchos Recomendados Desde una Vía Hasta 4 Vías de Tránsito.

**TABLE 9. - Recommended lane widths--tangent sections**

Vehicle width, feet	1 lane	2 lanes	3 lanes	4 lanes
8.....	16	28.0	40	52.0
9.....	18	31.5	45	58.5
10.....	20	35.0	50	65.0
11.....	22	38.5	55	71.5
12.....	24	42.0	60	78.0
13.....	26	45.5	65	84.5
14.....	28	49.0	70	91.0
15.....	30	52.5	75	97.5
16.....	32	56.0	80	104.0
17.....	34	59.5	85	110.5
18.....	36	63.0	90	117.0
19.....	38	66.5	95	123.5
20.....	40	70.0	100	130.0
21.....	42	73.5	105	136.5
22.....	44	77.0	110	143.0
23.....	46	80.5	115	149.5
24.....	48	84.0	120	156.0
25.....	50	87.5	125	162.5
26.....	52	91.0	130	169.0
27.....	54	94.5	135	175.5
28.....	56	98.0	140	182.0

Fuente: Ault and Kaufman (1977).

Según el diseño de Ault and Kaufman, dice que el ancho de vía debe ser igual al ancho del camión más la mitad del ancho del camión a cada lado (lado de la cuneta, lado del talud).

Para el Komatsu 930E4-SE, el diseño para una solo vía sería:

**TABLA 3-3.** Ancho de Vía para un Camión Komatsu 930E-4SE.

Ancho del Camión (m)	Ancho a cada lado de la vía (m)	Número de Carriles	Ancho de Vía (m)
8.69	4.35	1	17.39

Fuente: Elaboración Propia.

**b) Para Dos, Tres Cuatro Vías:**

Definamos un algoritmo para correr el ancho de vía:

$$A_{vía}(m) = (1.5 \cdot n + 0.5)A_c$$

**Dónde:**

A vía= Ancho de Vía (m)

A<sub>c</sub> =Ancho del camión (m)

n = número de Carriles (m)

**TABLA 3-4.** Anchos de Vía de Acuerdo al Número de Carriles.

Ancho del Camión (m)	Ancho a cada lado de la vía (m)	Número de Carriles	Ancho de Vía (m)
8.69	4.35	2	30.42
8.69	4.35	3	43.45
8.69	4.35	4	56.49

Fuente: Elaboración Propia.



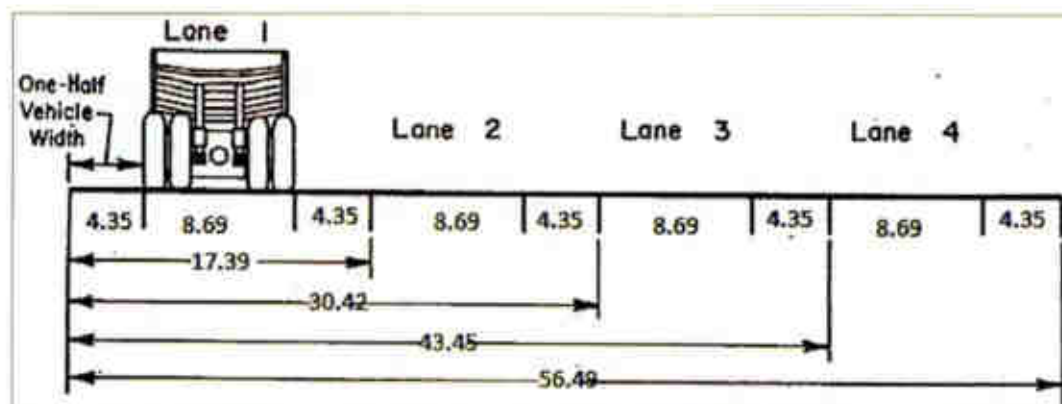


FIGURA 3-3. Anchos de Vía para un Camión Komatsu 930E4-SE.  
Fuente: Ault and Kaufman (1977).

Nota: el ancho no incluye la berma de seguridad ni la cuneta.

B) Según R.J. Thompson.

Thompson plantea los siguientes factores para el diseño del ancho de vía.

TABLA 3-5. Factores para el Cálculo del Ancho de Vía.

Número de carriles	Factor x ancho más grande del camión en la vía
1	2
2	3.5
3	5
4	6

Fuente: RJ Thompson (2015).

TABLA 3-6. Anchos de vía por el número de carriles.

Ancho del Camión (m)	Número de carriles	Factor x ancho más grande del camión en la carretera	Ancho de la Vía (m)
8.69	1	2x8.69	17.38
8.69	2	3.5x8.69	30.42
8.69	3	5x8.69	43.45
8.69	4	6x8.69	52.14

Fuente: RJ Thompson (2015).

Thompson recomienda que en zonas donde existe mucho flujo de vehículos y visibilidad limitada aumentar el factor para vías de dos carriles a 4, el ancho de vía no considere la berma de seguridad ni las cunetas.

**C) Según Komatsu.**

La recomendación de Komatsu para el ancho de vía del camión 930E4-SE con 2 carriles en función a la velocidad que se mueve es:

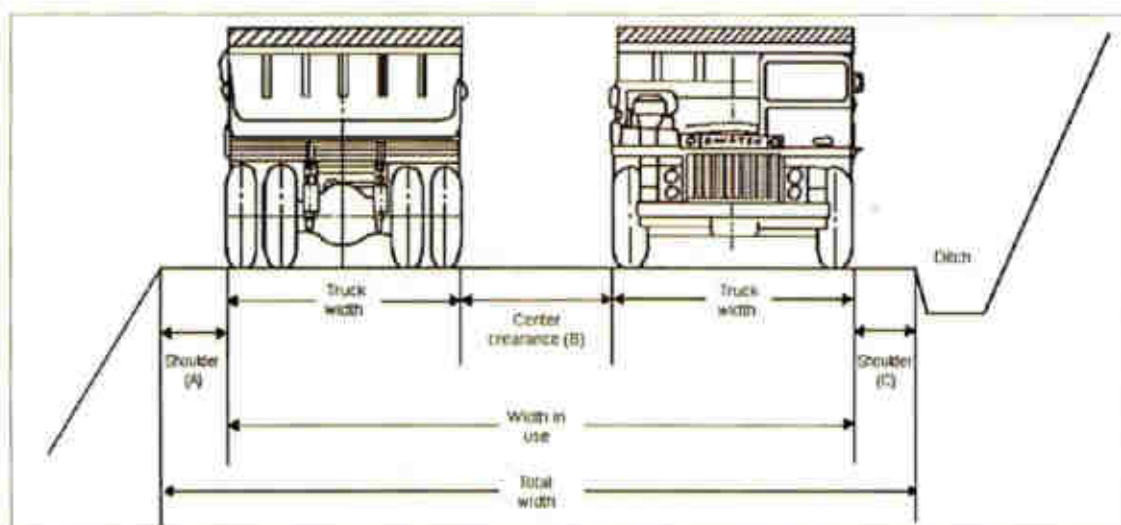


FIGURA 3-4. Ancho de vía para un camión Komatsu 930E4-SE.  
Fuente: Manual de Komatsu (2009).

TABLA 3-7. Anchos de Vía por el Número de Carriles.

Modelo	Velocidad (Km/h)	Espacio en el Centro (B)-m	Espacio en Pendiente: Cuesta Abajo(A) m	Espacio en Pendiente: Cuesta Arriba (C) m	Ancho Total del Vía (m)
930E-4 Ancho Camión 8.69 m	20	4.0	4.0	2.5	27.9
	30	4.5	5.0	2.5	29.4
	40	5.5	5.0	3.0	30.4

Fuente: Elaboración Propia.

**Nota:** Cuando los camiones van a 30 Km/h y con el fin de dar cabida en el carril en cada dirección, la vía recorrida debe ser por lo menos 4 veces el ancho de los camiones.

**En resumen,** los anchos de las vías serían:

**TABLA 3-8.** Anchos de Vía de Acuerdo a la Velocidad del Equipo.

Número de Carriles	Según Aulfand Kaufman (m)	Según RJ Thompson (m)	Según Komatsu (m)
1	17.39	17.38	-----
2	30.42	30.42	20 Km/h – 27.9 30 Km/h – 29.4 40 Km/h – 30.4
3	43.45	43.45	-----
4	56.49	52.14	-----

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.2.1.2 Criterios para Curvas Horizontales.

La condición de que el operador del equipo pueda ver delante de él a una distancia a la cual él pueda detener el equipo es la primera consideración. La distancia de frenado del equipo es un componente que debe ser evaluado para cada tipo de equipo en la flota de transporte para permitir al diseñador establecer el alineamiento horizontal y vertical de la vía. Asociado con la distancia de frenado del equipo está la distancia asociada al tiempo de reacción del operador. Es imperativo que, en todas partes, a lo largo de la vía, la distancia de visibilidad sea suficientemente tal que permita al equipo viajar a una velocidad segura de tránsito que se pueda detener antes de alcanzar un obstáculo o situación de peligro adelante.

La distancia medida desde el ojo del conductor hasta el peligro delante de él (distancia de visibilidad), de SIEMPRE ser igual o mayor que la distancia requerida para detener de manera segura el equipo (distancia de frenado), es decir:

$$\text{Distancia de VISIBILIDAD} \geq \text{Distancia de FRENADO}$$

- **Distancia de Frenado.** - Debe ser calculada para cada equipo y el alineamiento de la vía ajustado a los equipos con la mayor distancia de frenado.
- **Distancia de Visibilidad.** - Debe ser mayor o igual a la distancia de frenado del equipo. Este criterio debe ser considerado tanto en curvas verticales como horizontales.

Para las curvas horizontales puede ocurrir que la distancia de visibilidad sea limitada por bermas muy altos, cortes de roca pronunciados, estructuras, etc.

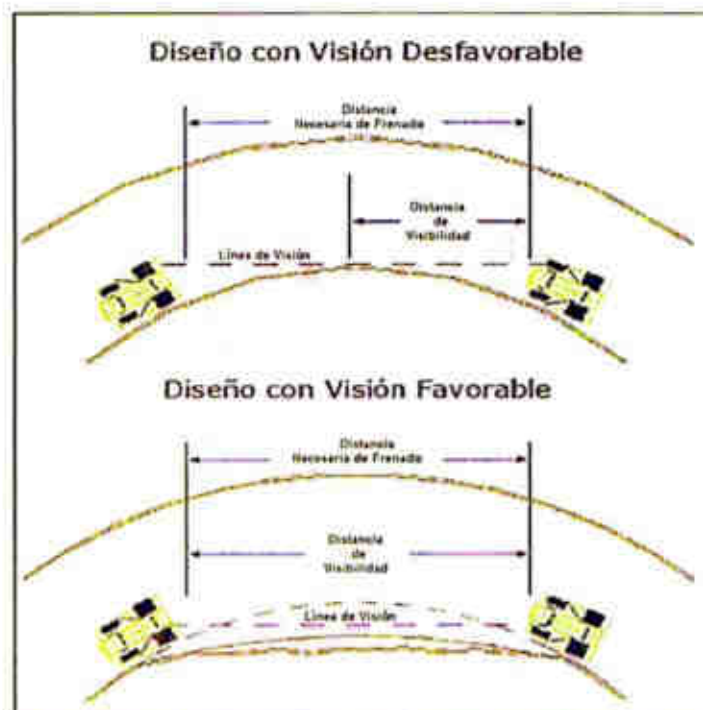


FIGURA 3-5. Distancia de Frenado vs Distancia de Visibilidad en Curvas Horizontales.  
Fuente: Ault and Kaufman (1977).

En la cresta de las curvas verticales la distancia de visibilidad está limitada por la superficie de la vía. El caso superior de la Figura 3-6 muestra una condición no segura. La distancia de visibilidad está restringida por la curva vertical y el equipo no puede detenerse a tiempo para evitar el peligro. En el caso inferior de la Figura 3-6 se muestra la condición resgosa remediada. La curva vertical ha sido alargada, creando así una distancia de visibilidad igual a la distancia de frenado requerida.

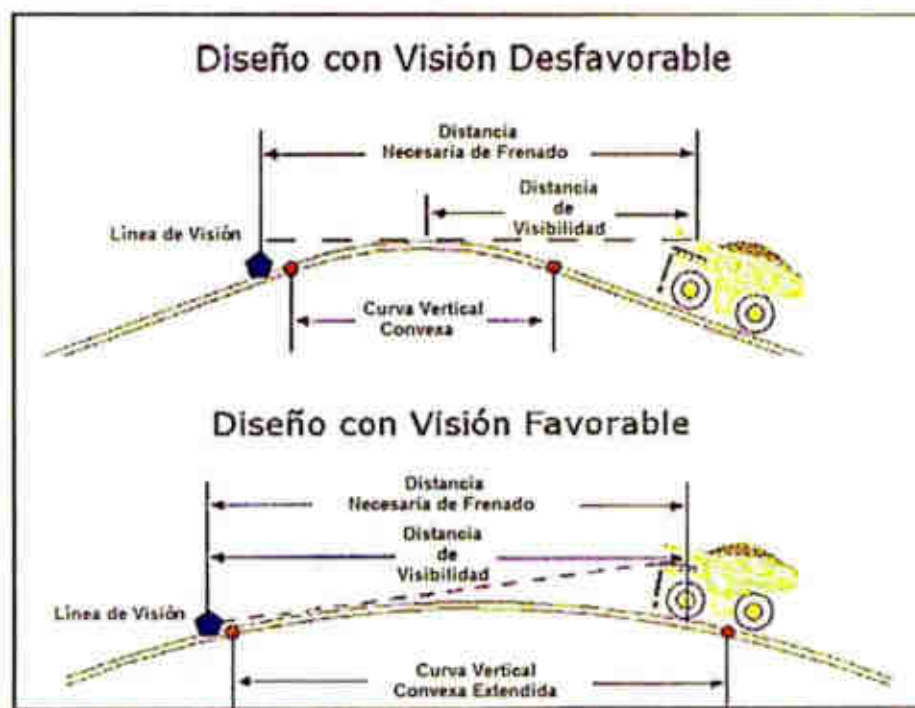


FIGURA 3-6. Distancia de Frenado vs Distancia de Visibilidad en Curvas Verticales.  
Fuente: Ault and Kaufman (1977).

Los parámetros de cálculo involucrados en este ítem deben considerar el vehículo de menor dimensión (camionetas) en cuanto a distancia de visibilidad, y la longitud mayor de distancia de frenado en los equipos mayores (camiones). Luego, lo que sea mayor debe prevalecer para conservar las mejores condiciones

de seguridad en el tráfico. Para determinar la distancia de frenado se tienen pruebas que indican que para equipos con Peso Bruto entre 180.000 y 300.000 kg que son con los camiones de extracción, la distancia de frenado considerando una velocidad inicial de 32 kph seria de 53 metros. También se puede recurrir a curvas que han investigado el comportamiento de este índice como los de la Figura 3-7.

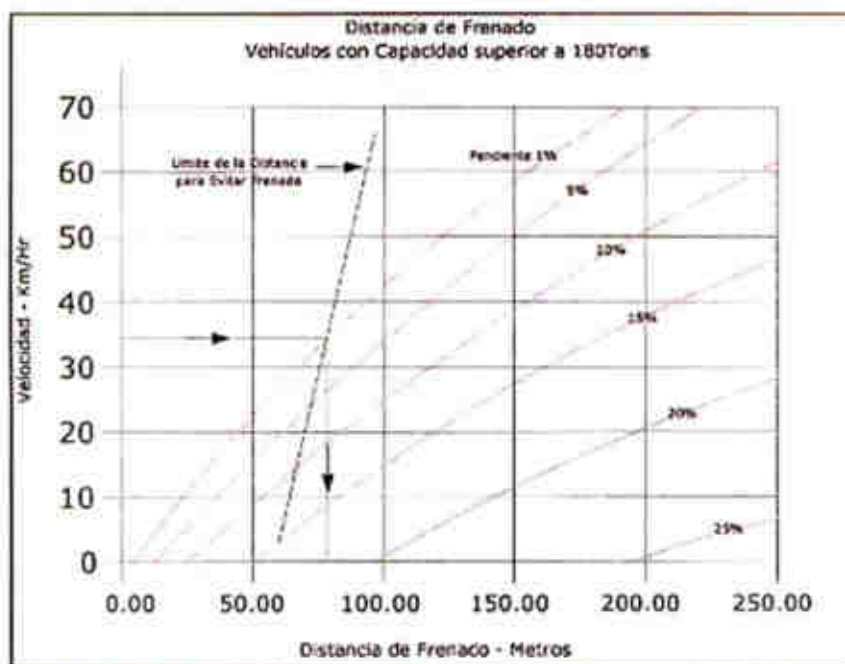


FIGURA 3-7. Distancia de Frenado para Equipos con Peso Bruto > 180.000 kg.  
Fuente: Ault and Kaufman (1977).

Para determinar la Distancia de Frenado (SD), se considera los siguientes parámetros involucrados en la siguiente ecuación:

$$SD = \left( \frac{gt^2}{2} \sin \Theta + V_f \right) + \left( \frac{[gt \sin \Theta + V_0]^2}{2g(U_{\min} - \sin \Theta)} \right)$$

Dónde:

$g$  = Aceleración debido a la gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

$t$  = Tiempo de frenado (s) ( $t = t_1 + t_2$ )

$\theta$  = Pendiente de la vía (en grados)

$U_{\min}$  = Coeficiente de fricción entre neumáticos y la vía, típicamente 0.3.

$V_0$  = Velocidad del vehículo (m/s)

“ $t_1$ ” es el tiempo necesario desde que el pedal es presionado hasta que los componentes de frenado son activados. Está dado por la Tabla 3-9.

TABLA 3-9. Relación Entre el Peso y Tiempo de Reacción.

Peso del vehículo, (ton)	Tiempo de reacción del freno $t_1$ (s)
Menor a 45	0.5
45 – 90	1.5
90 – 180	2.75
Mayor a 180	4.5

Fuente: Ault and Kaufman (1977).

“ $t_2$ ” es el tiempo atribuido al conductor entre la percepción y la reacción de frenado (2 segundos).

*A) Pendientes del Camión en Grados y Minutos.*

TABLA 3-10. Equivalencia de las Pendientes de Porcentajes a Ángulos.

%	Angles of gradient	%	Angles of gradient
1	0°54'	26	14°54'
2	1°00'	27	15°10'
3	1°03'	28	15°29'
4	2°10'	29	16°10'
5	2°52'	30	16°42'
6	3°26'	31	17°13'
7	4°00'	32	17°45'
8	4°54'	33	18°16'
9	5°00'	34	18°42'
10	5°03'	35	19°17'
11	6°17'	36	19°48'
12	6°51'	37	20°18'
13	7°25'	38	20°48'
14	7°58'	39	21°18'
15	8°32'	40	21°48'
16	9°00'	41	22°18'
17	9°38'	42	22°47'
18	10°12'	43	23°16'
19	10°45'	44	23°45'
20	11°19'	45	24°14'
21	11°52'	46	24°42'
22	12°24'	47	25°10'
23	12°57'	48	25°38'
24	13°30'	49	26°06'
25	14°02'	50	26°34'

Fuente: Ault and Kaufman (1977).

**B) Coeficiente de Fricción Vía - Neumático.**

Para el cálculo del coeficiente de fricción Ault and Kaufman (1977), plantean la siguiente formula:

$$u \text{ min} = \frac{v^2}{2gS}$$

**Dónde:**

V= Según la SAE<sup>1</sup> la velocidad de prueba 8.94 m/s,

g = Gravedad 9.81 m/s<sup>2</sup>,

S = Según la SAE, t<sub>1</sub> x 8.94, distancia recomendada para el frenado en función del peso del vehículo.

El valor mínimo y típico para el coeficiente de fricción es de 0.30.

Veamos algunos valores obtenidos con la fórmula de distancia de frenado para las vías mineras de Las Bambas, se tomaron en cuenta 4 rangos de velocidades.

---

<sup>1</sup> Sociedad de Ingenieros Automotrices

TABLA 3-11. Cálculo de Valores para la Distancia de Frenado.

Pendiente (%)	Angulo de inclinación (°)	velocidad (km/h)	velocidad (m/s)	Distancia de frenado 5D(m)
6.0	3.43	20	5.56	45.22
6.0	3.43	30	8.33	69.03
6.0	3.43	40	11.11	96.11
6.0	3.43	45	12.50	110.88
6.5	3.72	20	5.56	46.81
6.5	3.72	30	8.33	71.12
6.5	3.72	40	11.11	98.77
6.5	3.72	45	12.50	113.86
7.0	4.00	20	5.56	48.46
7.0	4.00	30	8.33	73.29
7.0	4.00	40	11.11	101.55
7.0	4.00	45	12.50	116.95
7.5	4.29	20	5.56	50.18
7.5	4.29	30	8.33	75.57
7.5	4.29	40	11.11	104.44
7.5	4.29	45	12.50	120.19
8.0	4.57	20	5.56	51.98
8.0	4.57	30	8.33	77.94
8.0	4.57	40	11.11	107.46
8.0	4.57	45	12.50	123.56
8.5	4.86	20	5.56	53.86
8.5	4.86	30	8.33	80.41
8.5	4.86	40	11.11	110.62
8.5	4.86	45	12.50	127.09
9.0	5.14	20	5.56	55.83
9.0	5.14	30	8.33	83.00
9.0	5.14	40	11.11	113.91
9.0	5.14	45	12.50	130.77
9.5	5.43	20	5.56	57.89
9.5	5.43	30	8.33	85.71
9.5	5.43	40	11.11	117.37
9.5	5.43	45	12.50	134.63
10.0	5.71	20	5.56	60.04
10.0	5.71	30	8.33	88.55
10.0	5.71	40	11.11	120.99
10.0	5.71	45	12.50	138.67
10.5	5.99	20	5.56	62.30
10.5	5.99	30	8.33	91.53
10.5	5.99	40	11.11	124.78
10.5	5.99	45	12.50	142.92
11.0	6.28	20	5.56	64.68
11.0	6.28	30	8.33	94.66
11.0	6.28	40	11.11	128.77
11.0	6.28	45	12.50	147.37
11.5	6.56	20	5.56	67.17
11.5	6.56	30	8.33	97.95
11.5	6.56	40	11.11	132.95
11.5	6.56	45	12.50	152.05

Fuente: Elaboración Propia.





**FIGURA 3-8.** Distancia de frenado en función a la velocidad para una pendiente de 8% aplicado en las vías de acarreo de Las Bambas.

Fuente: Elaboración Propia.

Al menos 150 m son requeridos, basados en los requerimientos típicos de las distancias de frenado. En una curva o giro en la vía esto podría ser difícil de lograr, como se muestra en el diagrama, cuando las curvas de la vía alrededor del borde de un banco, para poder mantener la distancia de visibilidad es utilizada una distancia hacia atrás "Layback"-LB (m) para mantener la vía lejos de la obstrucción de la vista. Esta distancia LB, es encontrada considerando la distancia mínima de frenado del camión SD y el radio de curva R.

$$LB = SD \left[ 1 - \cos \left( \frac{28.65R}{SD} \right) \right]$$

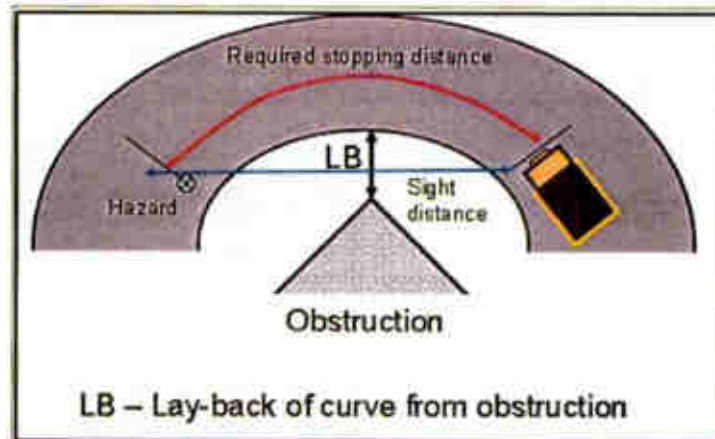


FIGURA 3-9. Distancia "Layback".  
Fuente: Ault and Kaufman (1977).

Para el diseño de las vías en la Bambas se tiene un LB de 47.35 m, con un SD de 107.46 m, con una velocidad de 40 km/h y con  $R = 210$  m.

### 3.2.1.3 Criterios para Curvas Verticales.

Las curvas verticales son usadas para proveer una transición suave desde una pendiente a otra. La longitud de estas curvas debe ser adecuada para la confortable conducción y además entregar amplias distancias de visibilidad en el diseño. Generalmente la longitud de las curvas verticales es mayor que lo deseable y resulta en grandes distancias de visibilidad. Sin embargo, excesivas longitudes en ellas pueden resultar en largas secciones planas que impiden un buen drenaje y frecuentemente conducen a puntos blandos y baches. La longitud de las curvas verticales que entregaran adecuadas distancias de visibilidad son las que describen en la siguiente ecuación.

$$L = 2S - \frac{200(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2}{A} \quad \text{Cuando } S \text{ es mayor que } L$$

$$L = \frac{100(\sqrt{2h_1} + \sqrt{2h_2})^2}{AS^2} \quad \text{Cuando } S \text{ es menor que } L$$

**Dónde:**

**L** = Longitud de la curva vertical (m)

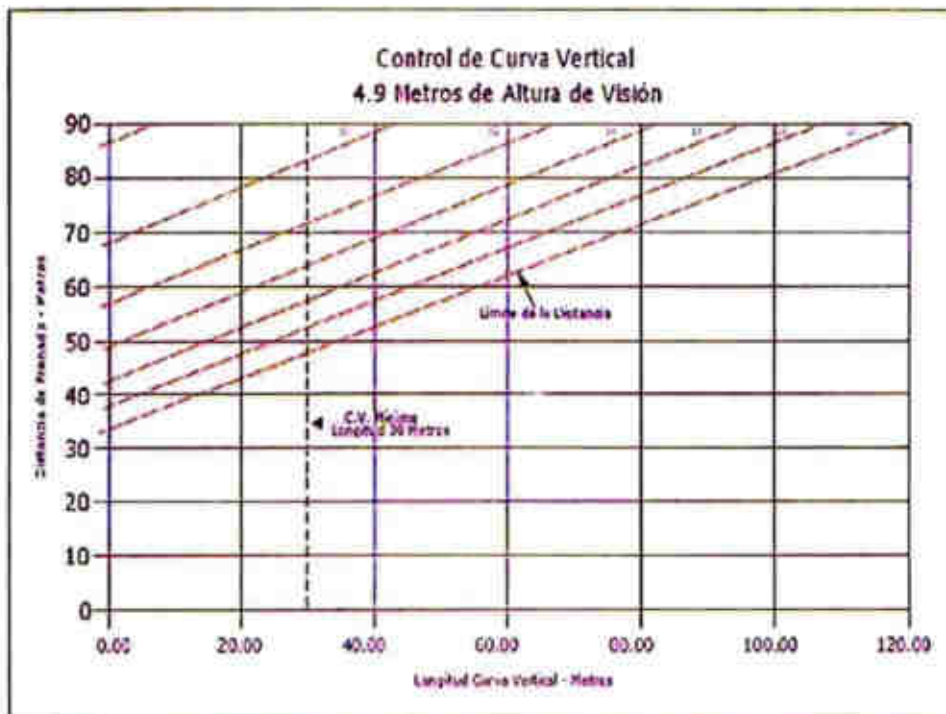
**S** = Distancia de frenado alcanzable del equipo (m)

**A** = Diferencia algebraica entre las pendientes (%)

**h<sub>1</sub>** = Altura del ojo del conductor arriba del terreno (m)

**h<sub>2</sub>** = Altura del objeto sobre la superficie de la vía (m)

La Figura 3-10 muestra los mínimos largos de curvas verticales versus distancias de frenado para varias diferencias algebraicas de pendientes (%). Se debe considerar además otro dato que es la altura del ojo del conductor, que para los camiones 930E-4SE es de 6 metros.



**FIGURA 3-10.** Longitud de una curva vertical en función de la distancia de frenado, la diferencia de pendientes y la altura del ojo del conductor.

Fuente: Ault and Kaufman (1977).

### 3.2.1.4 Pendientes.

#### A) Cálculo de la Pendiente de una Vía.

Para calcular la pendiente que posee una vía de acarreo, se utiliza la fórmula de la Figura 3-11.

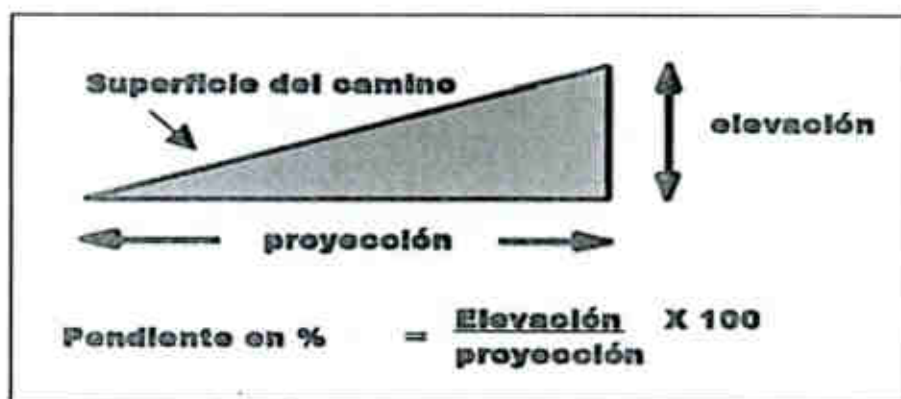


FIGURA 3-11. Pendiente de una vía de acarreo.

Fuente: Ault and Kaufman (1977).

#### B) Recomendaciones y Estándares.

El perfil longitudinal de la vía de acarreo debe considerar en el trazado de la rasante una compensación entre el corte y el relleno a realizar para satisfacer las necesidades del diseño. A lo largo de una rasante se tienen diferentes valores para las pendientes (%), siendo el valor máximo permitido en Las Bambas un 10% para las vías mineras y rampas principales; y para rampas auxiliares es de un 8% como máximo.

Un 8% o menos de pendiente es lo recomendable a utilizar cuando no causa un excesivo "stripping" o cuando el trazado de la vía es demasiado complicado. Este valor de pendiente entrega mayor flexibilidad en la etapa de construcción de la vía y es adecuada en algunos sectores de la mina tales como la entrada de un

banco, acercamientos a botaderos o donde por las características de la operación se estime pertinente.

Está establecido como estándar que todas las rampas que se construyan en el área mina, deben contar con señalética en su cabecera que indique las velocidades máximas establecidas para la circulación de los camiones de extracción por estas.

Para cruces de vías que enfrenten una vía horizontal con otra vía con pendiente, se establece preferencia de paso a los equipos móviles que circulan por la vía con pendiente. De ser necesario detener los equipos móviles que circulen por la vía con pendiente, se establece que la construcción de la vía minimice el % de pendiente en un tramo de 20 metros antes de llegar al cruce, siempre que las condiciones del terreno lo permitan.

#### **3.2.1.5 Peralte de la Curva.**

El peralte es la inclinación de un camino que le ayuda a un vehículo a transitar una curva a una determinada velocidad. Lo hace contrarrestando la fuerza centrípeta generada a medida que el vehículo transita a través de la curva.

El efecto del peralte le ayuda al conductor a mantener la velocidad y el control de su vehículo y reduce las fuerzas laterales que se ejercen sobre las ruedas del camión. Reducir las fuerzas laterales puede ayudar a mantener el buen estado y longevidad reduciendo el desgaste del neumático y la separación de las capas.

Los factores que los diseñadores tienen en cuenta para curvas con peralte incluyen:

- Peralte máximo a usar (determinado por la combinación del radio de la curva y la velocidad del vehículo, consultar Tabla 3-12).



- Dadas las velocidades operativas y el estado del camino en caminos de acarreo minero, el peralte total máximo utilizado se ubica habitualmente entre el 4 y el 6%.
- La longitud de desarrollo del peralte (se debe alcanzar aproximadamente el 70% del peralte en el punto de la tangente de la curva, consulte la Figura 3-12).
- El coeficiente de la fricción lateral (entre los neumáticos y la superficie del camino).
- Ensanche requerido para la curva (consulte el siguiente inciso Radio de giro ancho de la calzada).

El desarrollo del peralte tiene que ser gradual para evitar ocasionarle incomodidad al conductor, inestabilidad al vehículo y excesivas fuerzas de torsión a los chasis de los camiones.

TABLA 3-12. Peralte sugerido según el radio de la curva / velocidad del camión.

Radio de curva (m)	Velocidad del vehículo (kph)						
	15	20	24	32	40	48	>56
15 <sup>1</sup>	4%	6%	6%				
21 <sup>2</sup>	4%	6%	6%				
30	4%	5%	6%				
45	4%	5%	6%	6%	6%		
75	4%	4%	4%	4%	4%	6%	
90	4%	4%	4%	4%	4%	5%	6%
180	4%	4%	4%	4%	4%	5%	6%
300	4%	4%	4%	4%	4%	5%	6%
400	4%	4%	4%	4%	4%	5%	5%
500	4%	4%	4%	4%	4%	5%	5%

Fuente: Adaptado de Tannant y Regensburg (2001).

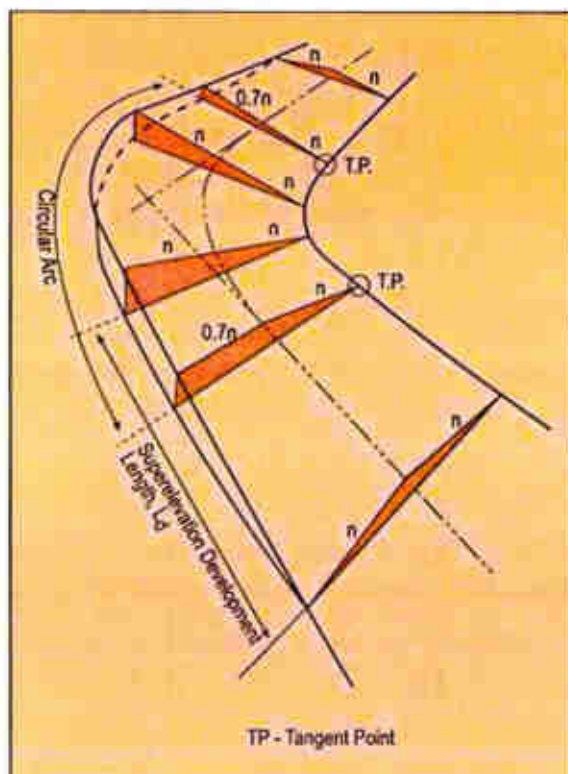
$$\text{Superelevation development length } L_d \text{ (m)} = V \frac{(n_1 - n_2)}{12.6}$$

**Dónde:**

**V** = Velocidad del vehículo (kph)

**n<sub>1</sub>** = Pendiente transversal normal (+%)

**n<sub>2</sub>** = Pendiente transversal con peralte completo (-%)



**FIGURA 3-12.** Peralte de curvas de caminos de acarreo minero.  
Fuente: Giunmarra (2009).

**A) Radio de Giro y Ancho de la Vía.**

Las curvas horizontales deben tener el radio máximo admisible conforme a las restricciones del terreno debido a que las curvas de radio amplio les permiten a

los camiones mineros mantener su velocidad operativa y reducen el desgaste de los neumáticos y de la superficie de la vía.

Tal como se muestra en la Figura 15, existen tres elementos a considerar al diseñar curvas horizontales y determinar el ancho de las vías:

- Radio de giro
- Despeje del radio de giro
- Radio de giro interno

El radio de giro se describe como el centro del neumático exterior de giro del camión minero al “ejecutar su giro práctico más cerrado” (ISO 7457:1997).

El despeje de los dos radios afecta la distancia de separación entre dos camiones mineros en sentido opuesto y entre los camiones mineros y la infraestructura vial u otros objetos a costados de la vía.

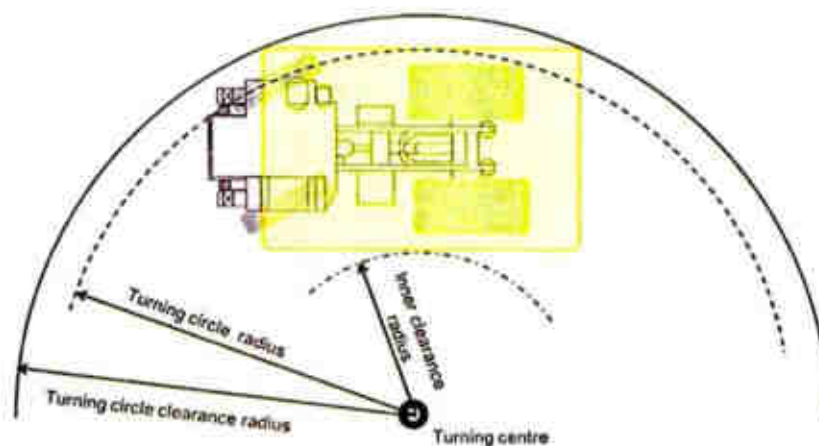


FIGURA 3-13. Radio de giro y radio de despeje de los camiones mineros.  
Fuente: RJ Thompson (2015).

Según lo indican las especificaciones disponibles de los camiones, el radio mínimo de giro de los camiones mineros Komatsu 930E es de 14,85 m.

Debido a la dificultad que tienen los conductores para mantener una línea consistente al tomar una curva, se debe aplicar un ensanche para garantizar que se mantenga suficiente separación entre los vehículos. Este ensanche se aplica a curvas con o sin peralte y puede determinarse basándose en el método ilustrado en la Figura 3-14.

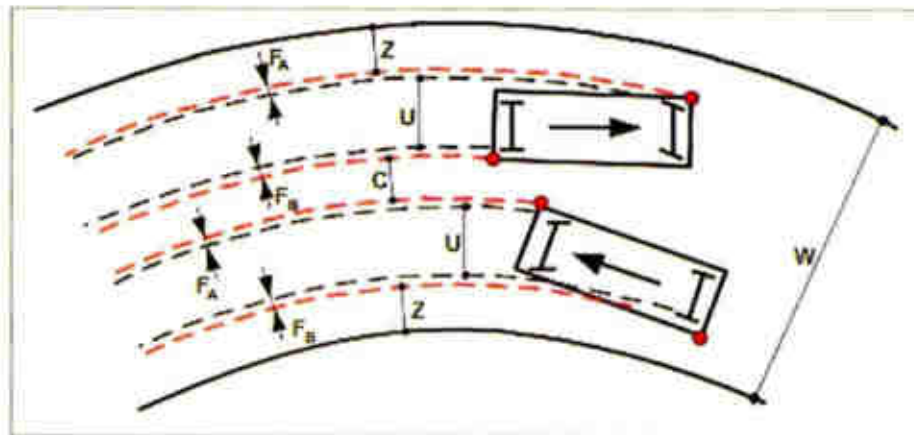


FIGURA 3-14. Cálculo del ensanche alrededor de curvas.  
Fuente: RJ Thompson (2015).

$$W (m) = 2(U + F_A + F_B + Z) + C$$

$$C (m) = Z = (U + F_A + F_B)/2$$

**Dónde:**

U = Ancho de la vía del equipo (entre centros de neumáticos) (m)

F<sub>A</sub> = Ancho frontal saliente del equipo (m)

F<sub>B</sub> = Ancho trasero saliente del equipo (m)

C = Espacio libre lateral total

Z = Ancho extra asignado debido a las dificultades de conducción en curvas (m)

Basándose en este enfoque, el ancho de la vía sin división para camiones mineros Komatsu 930E-4SE debe calcularse de la siguiente manera:

$$U = 6.15 \text{ m}$$

$$F_A = 8.69 - 6.15 = 2.54 \text{ m}$$

$$F_B = 8.15 - 5.36 = 2.79 \text{ m}$$

$$C = Z = (6.15 + 2.54 + 2.79) / 2 = 5.74 \text{ m}$$

Entonces:

$$\text{Ancho de vía, } W = 2 \times (6.15 + 2.54 + 2.79 + 5.74) + 5.74 = 40.18 \text{ m}$$

El ancho recomendado de vía en los tramos rectos intermedios es de 3,5 veces el ancho del camión minero + 2 veces el ancho de la berma intermedia de la vía, es decir  $(3.5 \times 8.69 \text{ m}) + (2 \times 2.0 \text{ m}) = 34.415 \text{ m}$ .

Por lo tanto, el ancho adicional de la vía alrededor de los tramos con curvas del camino de acarreo es de 5.77 m, el que debe desarrollarse tal como se muestra en la Figura 3-15.

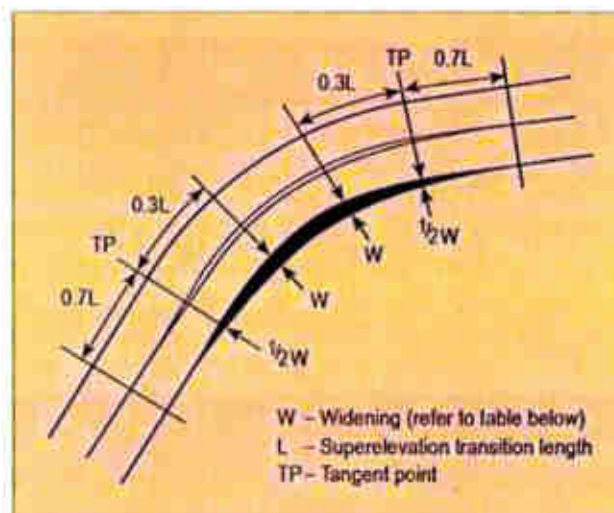


FIGURA 3-15. Distribución del ensanche alrededor de una curva.  
Fuente: Giummarra (2009).

### 3.2.1.6 Curvatura o Vía en Zigzag.

Cualquier curva o vía en zigzag debe ser diseñado con el radio máximo que sea posible (generalmente >200 m idealmente) y este radio debe ser mantenido suave y consistente. El radio mínimo de una curva (R (m)) puede ser determinado inicialmente por;

$$R = \frac{V^2}{127(e + f)}$$

#### Dónde:

R = Radio de curvatura (m)

V = Velocidad del vehículo (km/hr)

e = Abovedado (m/m)

f = Coeficiente de fricción entre neumáticos y la superficie de rodadura

f o  $U_{min}$ , es el coeficiente de fricción entre la vía y el neumático, es tomado como 0.3 (para superficie húmeda, suave, lodosa o con baches) a 0.35 (superficie de grava seca compactada parcialmente). Donde el diseño de la mina requiere un radio de curvatura más estrecho que el radio mínimo, será necesario aplicar límites de velocidad.

Ahora diseñemos el radio de curvatura para las vías de acarreo de Las Bambas, teniendo un peralte de 6%, un coeficiente de fricción  $U_{min} = 0$ , esto para asegurar de manera geométrica que el vehículo siga en la curva de la vía y no buscar que la fuerza centrífuga externa que el camión experimenta deba ser balanceada por la fricción lateral entre el camino y los neumáticos, y una

velocidad constante de 40 km/h, tomando en cuenta todos estos criterios obtenemos un valor de 210 m de radio de curvatura.

### 3.2.1.7 *Pendiente Transversal (Bombeo o Abovedado).*

El drenaje del agua de la superficie de la vía es de vital importancia para reducir el riesgo de derrape de los vehículos en pendientes y al tomar curvas. También es muy importante para ayudar a protegerse contra los daños y fallas debido al ingreso de agua. Las vías no pavimentadas, tales como aquellos existentes en una mina, son particularmente vulnerables a daños debido al ingreso de agua a las capas de la calzada debajo de la superficie, tanto por agua de lluvia como de agua subterránea interceptada.

La protección más efectiva contra el agua de lluvia es asegurarse que la superficie tenga una buena pendiente transversal, habitualmente desde la corona central con caída hacia los bordes de la vía, lo que permite que el agua circule libremente desde la superficie de la vía hacia cunetas superiores correctamente construidas.

Esta caída hacia el borde de la vía se conoce como pendiente transversal. En el caso de vías no pavimentadas, los factores para seleccionar una pendiente transversal incluyen:

- Tener la suficiente pendiente para dejar escurrir el agua de una superficie mayormente lisa.
- Si la superficie es irregular / abrupta, la pendiente debe ser mayor para garantizar que el agua no se acumule ni encharque en la vía.
- No debe tener una pendiente demasiado pronunciada que genere erosión en la superficie pavimentada.

- Tampoco tiene que tener una pendiente excesiva tal que genere inestabilidad / desgaste desparejo en los sistemas de chasis de los vehículos de acarreo.

En el caso de vías consolidadas convencionales, se recomienda una pendiente del 4 al 6% con un 5% como ideal. Sin embargo, las vías de acarreo minero tienen un rango recomendado menor, entre el 2,5 y el 4%, con un ideal de 3%, y este último valor es el adoptado para las vías de acarreo de Las Bambas.

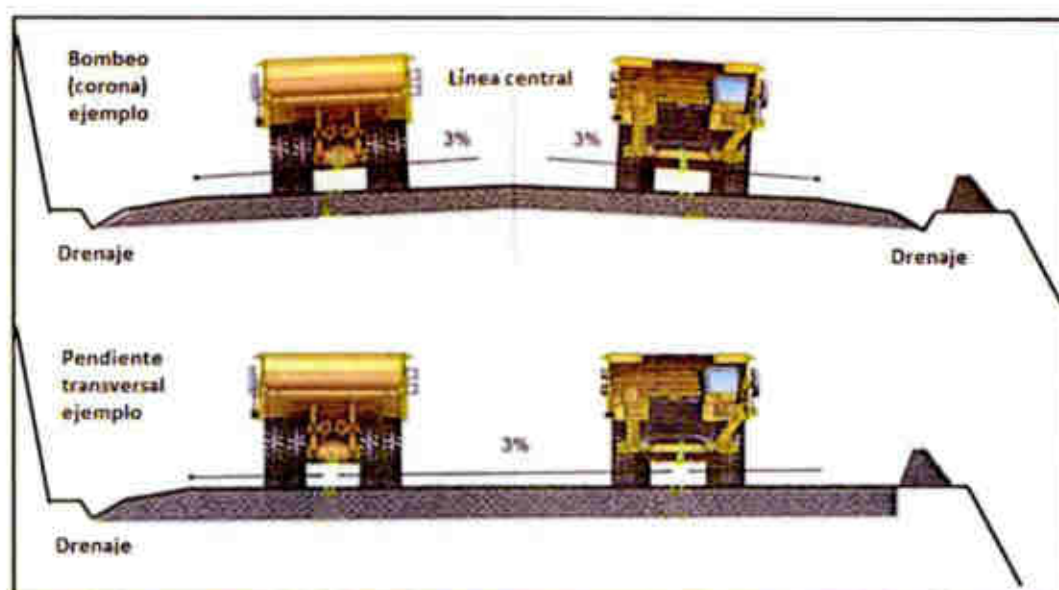


FIGURA 3-16. Diseños de pendientes transversales para drenaje de agua en las vías.  
Fuente: RJ Thompson (2015).

### 3.2.1.8 Berma de Seguridad.

Las bermas de seguridad para vías en las vías de acarreo de minas están compuestas casi exclusivamente por bermas de tierra construidas con material no consolidado obtenido en el sitio. Tal como se indica en Figura 19, se utilizan dos tipos de bermas de seguridad para vías según sea su función primaria:

- Al costado de la vía - ubicadas al lado del borde de la vía
- Berma intermedia - ubicadas a lo largo del centro de la vía.

El uso de bermas de tierra en Las Bambas depende de factores, entre los que se incluyen:

- Ancho de la vía
- Volumen del tráfico
- Pendiente de la vía
- Traza horizontal
- Existencia de peligros a los lados de la vía

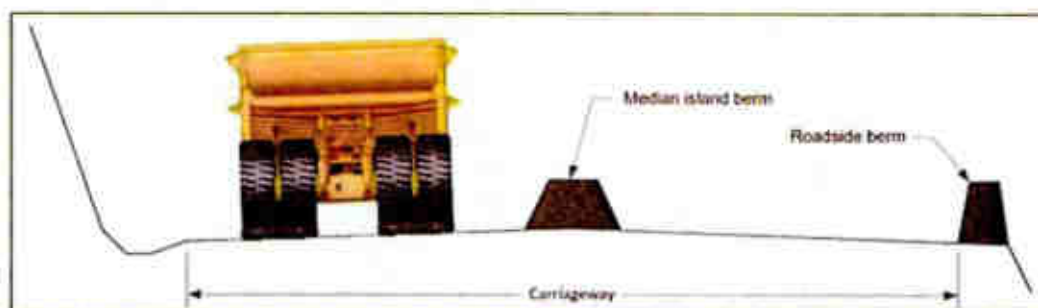


FIGURA 3-17. Ubicación de las bermas de seguridad para vías.  
Fuente: RJ Thompson (2015).

#### A) *Bermas Laterales.*

Las bermas laterales están diseñadas para redirigir un vehículo fuera de control que impacta con escaso ángulo para evitar que el vehículo pase encima del borde del camino o rampa. Habitualmente presentan un perfil mayor que las bermas intermedias de isla, entre  $1/2$  y  $2/3$  del diámetro de la mayor rueda que utiliza el camino para evitar que el vehículo penetre la barrera. En Las Bambas, en caso de usar camiones mineros Komatsu 930E-4SE las bermas laterales deben presentar una altura mínima de 2,8 m.

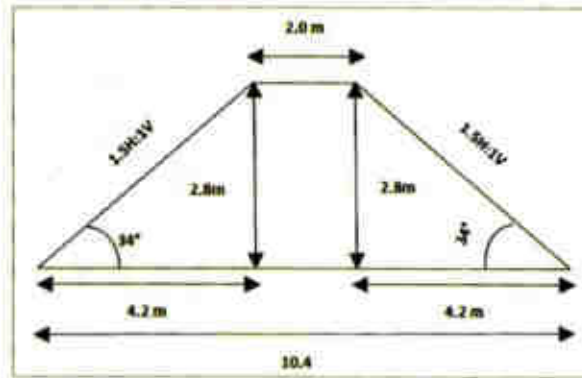


FIGURA 3-18. Diseño estándar de la berma lateral.  
Fuente: Planeamiento Mina - Las Bambas.

**B) Bermas Intermedias de Isla.**

Las bermas intermedias pueden diseñarse para atender uno o dos propósitos, dependiendo de dónde se ubique en la vía.

Como barrera, una berma intermedia actúa de manera similar a una berma lateral, es decir, redirigir un vehículo fuera de control, mantenerlo en su carril y así evitar que cruce contra el tráfico en sentido inverso. De esta manera, la berma intermedia de redirección evita choques más graves contra el tránsito en sentido opuesto.

En Las Bambas, donde se utiliza el camión minero Komatsu 930E-4SE las bermas intermedias de isla deben tener una altura ideal de entre 1,5 a 1,8 m.

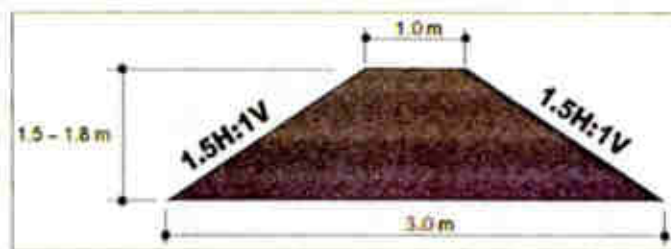


FIGURA 3-19. Diseño Estándar de una Berma Intermedia.  
Fuente: Planeamiento Mina - Las Bambas.

### 3.2.1.9 Cunetas.

Un sistema de drenaje bien diseñado es crítico para el desempeño óptimo de una vía de transporte. Agua sobre la vía o entre las capas de la vía causara condiciones de deterioro rápidamente.

Existen cuatro consideraciones principales para el drenaje superficial a los costados del camino. Estas son:

- Profundidad
- Perfil
- Pendiente
- Capacidad.



**FOTOGRAFÍA 3-1.** La falta de profundidad, perfil, pendiente y capacidad de drenaje ha ocasionado un exceso de agua sobre la vía.

Fuente: Tomada por el Autor.

#### *A) Profundidad.*

Los canales de drenaje superficiales laterales (cuneta superior) deben tener la suficiente profundidad por debajo del borde de la vía para drenar adecuadamente,

no sólo el agua de la superficie, sino también el agua que se ha infiltrado hacia la superficie de la vía y capas de base.

Para permitir la filtración lateral desde la capa base y la capa superficial, la parte interior de los drenajes laterales debe ubicarse idealmente al menos en el sector inferior de la capa base de la vía y el nivel de capacidad esperado del drenaje debe estar por debajo de la capa superficial.

Por lo tanto, para vías de acarreo minero con un espesor nominal de superficie de alrededor de 200 mm y una capa base de 800 mm, el lado inverso del drenaje lateral será de 1000 mm por debajo del borde del camino.

#### ***B) Perfil.***

El perfil del drenaje de la cuneta superior será determinado por las condiciones locales, tales como en ancho disponible, la capacidad requerida de drenaje y la ubicación.

En Las Bambas, habitualmente se utiliza un drenaje en V debido a las restricciones para el ancho disponible y el talud.

Para un drenaje en V en las condiciones de las vías de acarreo, un talud con pendiente lateral del lado de la vía de 1V:4A es adecuada según las consideraciones de seguridad, mientras que la pendiente externa es determinada por el frente de corte y otras condiciones, pero habitualmente es de 1V:2A.

#### ***C) Pendiente.***

La pendiente del lado del drenaje lateral depende principalmente por la traza de la vía al que pertenece. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la pendiente mínima para garantizar la circulación en un drenaje no revestido es habitualmente del 2%.

#### D) Capacidad.

La capacidad requerida para un drenaje depende de la superficie de la vía que protege, la pendiente del drenaje y del intervalo de tormentas de diseño / intensidad de la lluvia.

Habitualmente, el requisito mínimo de rendimiento de diseño para todo el sistema de drenaje de una red vial de acarreo es una capacidad para un evento de tormenta por 24 horas con un periodo de retorno de 10 años. Los valores de lluvia para Las Bambas, tomado del informe de factibilidad de la mina, aparecen en la Tabla 3-13. Consultando los datos de esta tabla, se puede ver que el periodo de retorno cada 10 años de una precipitación de 24 horas es de 47,8 mm (digamos que, en promedio, 2 mm por hora). En el caso de las estructuras de drenaje tales como cunetas superiores y alcantarillas, las restricciones en la capacidad sólo pueden verse potencialmente superadas por tormentas de menor duración y mucho mayor intensidad.

TABLA 3-13. Intensidad de Lluvia Durante los Periodos de Retorno Mencionados.

Periodo de retorno (Años)	Informe hidrológico de factibilidad (precipitación durante 24 h (mm))
PMP <sup>(1)</sup>	198,0
1000	87,5
500	81,6
100	67,9
50	61,9
25	56,0
20	54,0
10	47,8

Fuente: Minera Las Bambas.

### 3.2.2 Diseño Estructural para Las Bambas.

El diseño estructural de las vías de transporte se preocupa de la habilidad con que la vía soporte las cargas impuestas sin la necesidad de un excesivo mantenimiento o rehabilitación.

El método de diseño estructural CBR ha sido aplicado ampliamente en el diseño de vías de transporte en la minería, donde materiales no tratados son utilizados. Sin embargo, cuando son considerados vías compuestos de capas múltiples en conjunto con una capa de roca estéril quebrada y seleccionada, a menudo es más apropiado utilizar un enfoque mecánico.

Las dimensiones de una calzada dependen de la interacción entre los cuatro principales elementos del volumen de tráfico (volumen), la resistencia de la capa de asiento, la resistencia del material de la base y el espesor de la capa base. El proceso de diseño de la calzada involucra el cálculo de las dimensiones de la capa base estructural dados los datos de los conocimientos sobre:

- Carga de tráfico
- Resistencia de la capa de asiento
- Resistencia del material base

Estos tres parámetros son las principales variables a cargar en el proceso de diseño de calzada, pero se le unen otros dos parámetros que también tienen una gran influencia en el tipo de estructura de calzada que emerge del proceso de diseño. Estas son:

- **Categoría de la vía:** habitualmente se asocia a la jerarquía de la vía dentro de la mina y este se verá influenciado por la naturaleza de la carga del tráfico en términos de la duración de la vida útil de la vía y del tipo y mezcla de vehículos soportados.

- “Calidad” del tipo de calzada: se relaciona con el desempeño del mantenimiento durante la vida útil:
  - La estructura estándar de la calzada, diseñada para brindar un servicio moderado a un nivel razonable de mantenimiento.
  - Una estructura de calzada más fuerte, diseñada para brindar una solución de calzada con bajo mantenimiento, aunque a costa de un mayor costo inicial.

#### **3.2.2.1 Carga de Tráfico.**

Para diseñar una calzada de vías de acarreo minero utilizando el enfoque desarrollado por Thompson y Visser, la carga del tráfico sobre la calzada se cuantifica como el peso bruto cargado de los camiones de transporte que transitan la vía en el sentido cargado, expresado como tonelaje total por día en unidades de mil toneladas por día, es decir, kton/día.

Considerando la carga de tráfico en una vía determinada, si el tráfico principal se compone de camiones Komatsu 930E que pasan a un ritmo de 200 movimientos de camiones totalmente cargados por día, entonces la tasa de tráfico de diseño requerido se puede calcular de la siguiente manera:

- Peso en bruto por camión = 525 toneladas (ton)
- Carga diaria (24 horas) =  $200 \times 525 = 105.000$  toneladas (ton)

Por lo tanto, la carga de tráfico diario se expresa como 105 kt/día.

#### **3.2.2.2 Resistencia de la Capa de Asiento.**

De las inspecciones y mediciones de campo en Las Bambas, la gama de valores CBR registrados en el emplazamiento tal como se ha determinado

utilizando el penetrómetro de cono dinámico (DCP) incluyen valores entre CBR 20% a CBR 80%.

A partir de estos resultados, se brindan cuatro valores discretos de diseño de capa de asiento CBR a 10%, 20%, 40% y 80%.

Para el modelado mecanicista, se deben expresar los valores de resistencia del material utilizando unidades de resistencia de materiales para MPa. Por lo tanto, los valores de la capa de asiento como CBR han sido transformados en valores MPa utilizando las relaciones de transformación desarrolladas en Australia (Roberts, Roper y Michel 2010) entre MPa y CBR para materiales granulares tal como se muestra en el Figura 3-20 y Figura 3-21.

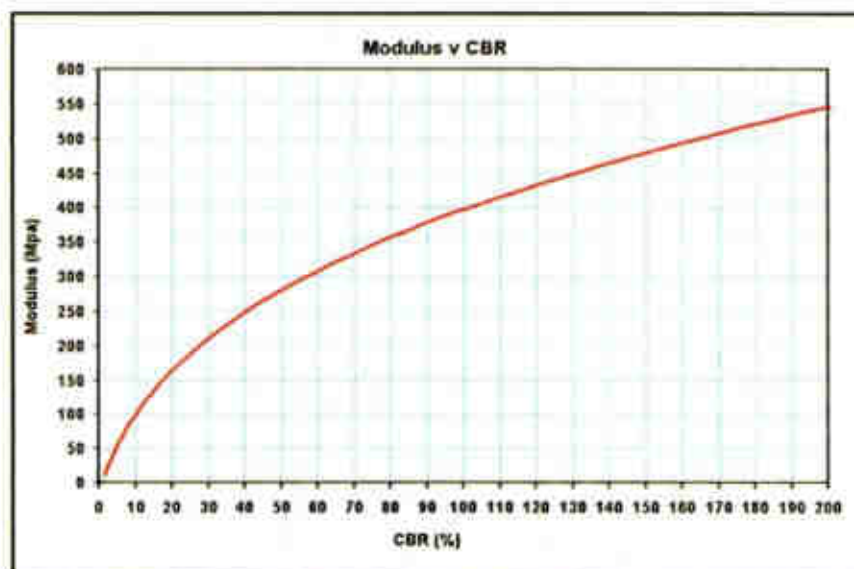


FIGURA 3-20. Relación para Estimar el Módulo de Resiliencia Basándose en un CBR Conocido.

Fuente: Minera Las Bambas.

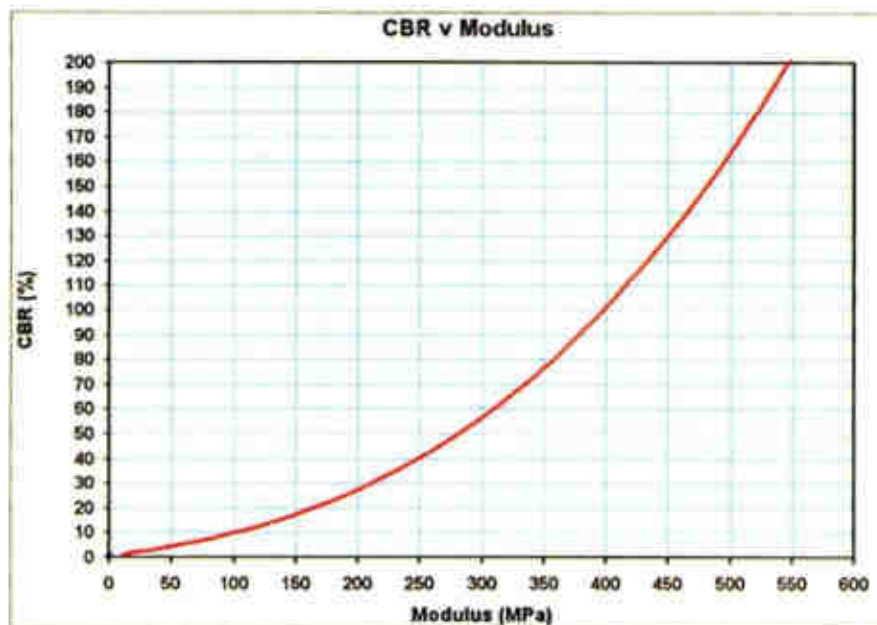


FIGURA 3-21. Relación para Estimar el CBR Basándose en un Módulo de Resiliencia Conocido.

Fuente: Minera Las Bambas.

El rango de los valores de carga de resistencia de capa de asiento puede entonces expresarse en términos de módulo de resiliencia tal como se indica en la Tabla 3-14.

TABLA 3-14. Valores de Carga de Capa de Asiento.

CBR (%)	MPa equivalente
10%	100 MPa
20%	150 MPa
40%	250 MPa
80%	350 MPa

Fuente: Minera Las Bambas.

### 3.2.2.3 Resistencia del Material Base.

Se ofrecen tres tipos diferentes de calidad y resistencia de los materiales para la base. Estos incluyen dos tipos de materiales encontrados en Las Bambas y un material 'ideal' de alta calidad, tal como se recomienda para el diseño de camino de acarreo no pavimentado.

Estos se describen a continuación en términos de su resistencia nominal para propósitos de diseño en la Tabla 3-15, seguido de una especificación descriptiva sobre sus propiedades y métodos de construcción sugeridos.

TABLA 3-15. Clasificación de resistencia del material de base para cada tipo de material.

Tipo	Breve descripción	MPa equivalente
Tipo 1	Una estructura de alta calidad, bien nivelada y con estrecho entrelazamiento de roca limpia de alta calidad, dispuesta y compactada en escalones de 300 mm.	2000 MPa
Tipo 2	Material observado en la nueva construcción del camino de acarreo 5 en diciembre de 2015.	1000 MPa
Tipo 3	Material existente predominante que consiste de una mezcla mal alfanada de suelo grueso y material rocoso mal conectado.	500 MPa

Fuente: RJ Thompson (2015).

#### A) Material de Tipo 1.

La selección y compactación de la capa base se aplica al material que consiste predominantemente de roca fresca de demolición respecto de la cual, debido al entrelazamiento mecánico de la roca, no se puede evaluar efectivamente la compactación usando los métodos habitualmente utilizados para suelos y gravas.

Las especificaciones mínimas para el material original elegido para esta capa incluyen:

- Resistencia uniaxial compresiva que supera 100 MPa.

- No contiene roca meteorizada, arcilla ni suelo con menos de un 20% de material de 2 mm (AS1141.11.1) y material predominantemente de drenaje libre al ser dispuesto y compactado.
- Un índice abrasivo LAB inferior al 30% (AS1141.34).
- No presenta más del 1% de partículas débiles (AS1141.32).
- Tiene una densidad mínima de partículas de 2,0 ton/m.
- La medida ideal de los mayores bloques es idealmente de dos tercios de altura por ancho, lo que equivale a un máximo de entre 200 – 300 mm (debido a que las rocas mayores son difíciles de compactar y generan en la capa salientes rodeadas de un anillo de material blando sin compactar).

La Figura 3-22 muestra un esquema que representa el material de Tipo 1, incluyendo rocas de entrelazamiento de forma irregular, construido en escalones bien compactados de apenas 300 mm.

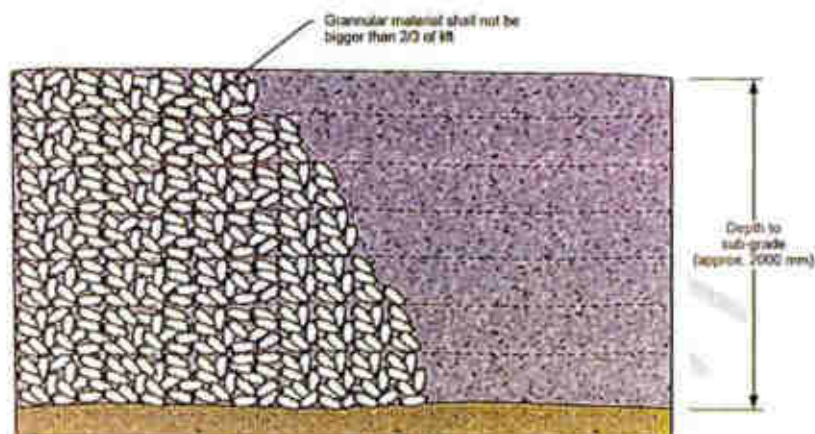


FIGURA 3-22. Diagrama del Material de Tipo 1.  
Fuente: Minera Las Bambas.

### B) Material de Tipo 2.

Habitualmente se compone de rocas de demolición de todo tamaño acumulada y empujada por una pala mecánica. Hay poca compactación a otras profundidades que se alcanzan cuando el material ha sido procesado en una planta durante la disposición. La Figura 3-23 muestra un esquema que representa el material de Tipo 2, incluyendo rocas de entrelazamiento de forma irregular, construido de manera no planificada, pero con una fuerte compactación en la superficie, digamos, de 300 mm.

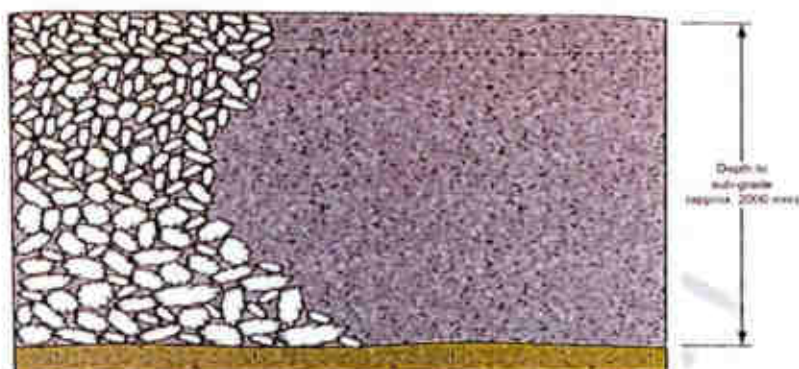


FIGURA 3-23. Diagrama del Material de Tipo 2.

Fuente: Minera Las Bambas.

### C) Material de Tipo 3.

El material de Tipo 3 es el material de menor calidad y está destinado a representar el actual material base utilizado mayormente en el emplazamiento de la mina. Este material tiene un muy alto contenido de finos y presenta una mezcla rocosa de arcillas, arenas y rocas de diferentes tamaños.

Durante la construcción, un material de Tipo 3 recibe muy poca compactación formal, aunque eventualmente parece haberse asentado bien por la acción del tráfico de acarreo. La Figura 3-24 muestra un esquema que representa un material de Tipo 3.



FIGURA 3-24. Diagrama del Material de Tipo 3.

Fuente: Minera Las Bambas.

#### D) Categoría de la Vía.

Las categorías de caminos de acarreo han sido propuestas en la Tabla 2-5.

Estas categorías también han sido adoptadas para el diseño de calzadas para vías de acarreo con las vidas útiles ideales sugeridas (vida útil de diseño) que se indican en la Tabla 3-16.

Se debe tener en cuenta que estos ideales sugeridos no se aplican exclusivamente a cada categoría de vía. Es aceptable para Las Bambas adoptar un ideal de vida operativa útil más corta (o larga) (entre <5 >10 o >20 años) si eso refleja menor el plan operativo minero.

TABLA 3-16. Categorías de Vías de Acarreo Minero para Propósitos de Diseño de Calzada.

Categoría	Vida operativa Ideal (en años)	Función
Categoría I	> 20 años	Caminos de acarreo principales permanentes de alto volumen que conectan canteras activas con ROM, plantas trituradoras y vertederos activos de desecho.
Categoría II	> 10 años	Caminos de acarreo semipermanentes de alto volumen que habitualmente conectan canteras activas con caminos de acarreo Categoría I, rampas de canteras.
Categoría III	< 5 años	Caminos de acarreo semipermanentes de alto a bajo volumen que habitualmente conectan áreas de operación con caminos de acarreo Categoría I, por ej.: caminos de canteras, caminos de servicio de ROM, plantas trituradoras, presas de colas, etc.

Fuente: Adaptado de RJ Thompson (2015).

### E) Índice de Desempeño de Mantenimiento de Calzada.

La adopción de una calzada de diseño basada en la carga de tráfico y en el criterio de deformación brindará una calzada que se espera funcione adecuadamente durante la vida útil ideal, suponiendo un nivel adecuado de mantenimiento para reparar defectos y recuperar la capa de rodaje, etc.

RJ Thompson (2015) propone tres índices de desempeño con los valores 1, 2 y 3 que actúan como multiplicadores de la estimación original de carga de tráfico. Se propone utilizar únicamente los valores 1 y 2 en los caminos de Las Bambas, en caso que se necesiten aplicar índices de desempeño, ya que un índice 3 resultará en calzadas considerablemente más gruesas que no serán económicas como inversión.

En cuanto al ejemplo del cálculo de carga de tráfico para Las Bambas, el efecto del índice de desempeño aparece en la Tabla 3-17.

TABLA 3-17. Ejemplo de la Combinación de la Carga de Tráfico (kton/día) y del Índice de Desempeño.

Carga de tráfico (k/día)	Índice de desempeño	Volumen de tráfico x índice de desempeño (k/día)
105	1	105
105	2	210

Fuente: Adaptado de RJ Thompson (2015).

Para Las Bambas, el Volumen de tráfico x el Índice de desempeño (kton/día) tiene resultados de entre 50 – 400 kton/día. Estos valores coinciden con el espectro del tráfico disponible en las curvas de Thompson – Visser y están relacionados con los caudales diarios de tráfico registrados en Las Bambas.



### 3.2.2.4 Proceso del Diseño Estructural de las Calzadas.

El proceso de diseño estructural de calzadas para vías de acarreo permite determinar un grosor adecuado para la capa estructural base de la calzada, independientemente de cualquier capa de rodadura.

El propósito es que la calzada sea estructuralmente adecuada aún si la capa de rodadura queda totalmente desgastada o tan deformada que áreas significativas del material de base queden expuestos.

Cada capa de la calzada tiene su propia tarea a ejecutar; la base brinda capacidad estructural y la capa de rodadura una superficie segura, resistente al desgaste, impermeable y de alta tracción.

El procedimiento de diseño de calzadas para la capa base tiene tres pasos distintivos que pueden describirse por el proceso ilustrado en la Figura 3-25 que aparece a continuación.

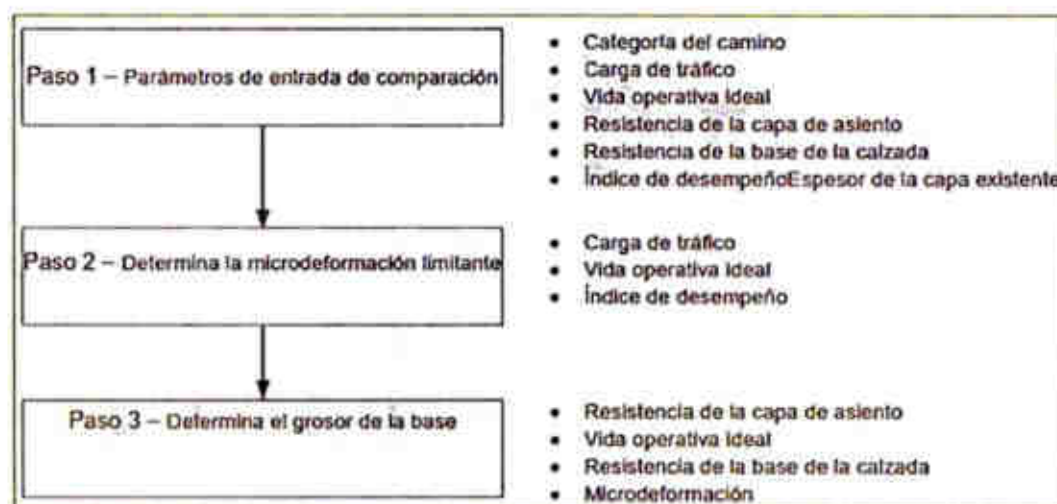


FIGURA 3-25. Diagrama de Flujo del Proceso de Diseño de Calzadas.

Fuente: Adaptado de RJ Thompson (2015).

*A) Determinación del Valor Adecuado de Diseño de Microdeformación Limitante.*

Las principales relaciones entre la microdeformación limitante y la manera en que se relacionan con la carga de tráfico han sido desarrolladas dentro del procedimiento de RJ Thompson (2015) para brindar una serie de curvas de relación que vinculan la carga de tráfico (volumen) con los valores coincidentes de microdeformación limitante.

La relación original en RJ Thompson (2015) entre la microdeformación limitante y la carga de tráfico (volumen) tal como se aplica a corto plazo (menos de 5 años de vida operativa) de caminos de acarreo Categoría III aparece en el Figura 3-26.

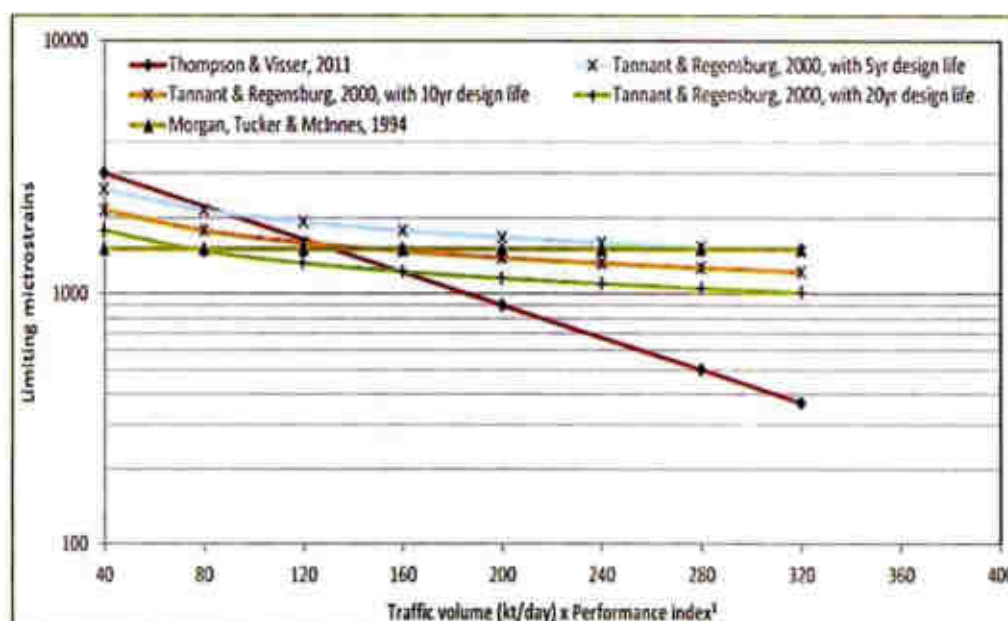


FIGURA 3-26. Curvas de Relación Originales RJ Thompson para Microdeformación Limitante Versus Carga de Tráfico (volumen).

Fuente: Adaptado de RJ Thompson (2015).

La relación de RJ Thompson en el Figura 3-26 se ha extendido para que el proyecto Las Bambas incluya caminos de Categoría I y Categoría II aplicando las guías brindadas por Thompson (2015).

La línea roja que se extiende desde el eje x en este ejemplo muestra una carga de tráfico estimada de 250 pasadas de camiones mineros Komatsu 930E totalmente cargados (525 ton), es decir, una carga de tráfico de 131,25 kton/día con un índice aplicado de desempeño de 1.

La intersección entre la línea de carga de tráfico con la curva cruza el eje y en un valor de microdeformación limitante de aproximadamente 1600. Este valor será entonces utilizado en el siguiente conjunto de tablas para determinar el espesor de la capa de la base de la calzada.

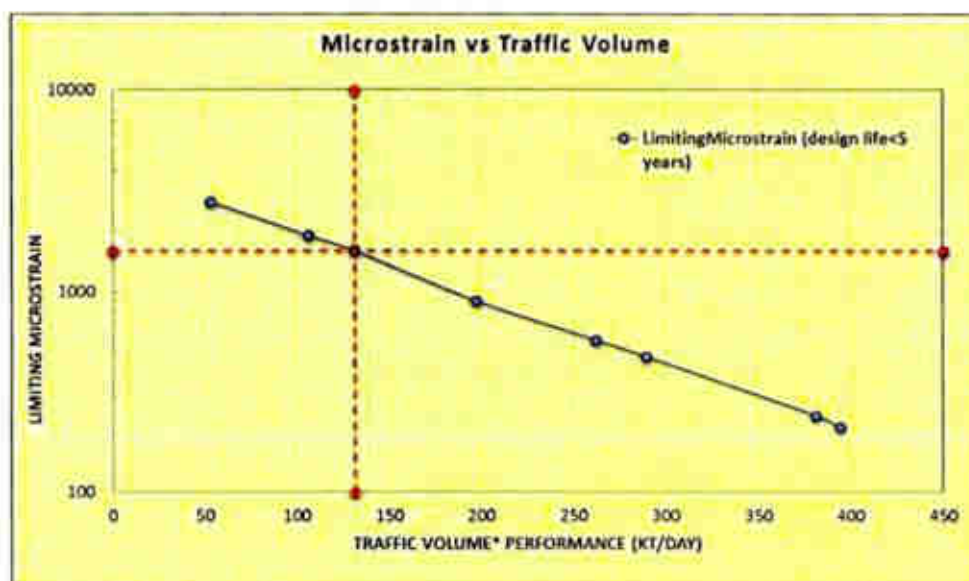


FIGURA 3-27. Carga de Tráfico (kton/día) vs Curva de Microdeformación Limitante para Vías de Acarreo Categoría III.

Fuente: Minera Las Bambas.

Nota: La tabla se basa en la guía y las relaciones de Thompson – Visser.

*B) Determinación de la Estructura de la Calzada para Satisfacer la Microdeformación de Diseño.*

La microdeformación limitante determinada anteriormente depende del volumen de carga de tráfico y es efectivamente el dato relacionado con el tráfico primario del diseño de la estructura de la calzada misma.

Existen tres parámetros que se pueden ajustar para la calzada usando el CIRCLY 6.0 para encontrar una estructura que cumpla con los requisitos de diseño de la microdeformación:

- Módulos de capa de asiento (100, 150, 250 o 350 MPa)
- Módulo del material base (500, 1000 o 2000)
- Espesor de la capa base (mm).

Se ha pre-calculado una gran cantidad de calzadas en CIRCLY 6.0 que incluyen todas las combinaciones en la categoría de vías de acarreo, resistencia de la capa de asiento y resistencia del material base. Se ha generado una tabla de diseño para cada combinación de calzada y se muestra un ejemplo en el Figura 3-28 para:

- Camino de Categoría III (vida útil operativa ideal de <5 años)
- Módulo de la capa de asiento – 250 MPa
- Resistencia del material base – 500 MPa, 1000 MPa y 2000 MPa.

Por ejemplo, suponiendo que el módulo de la capa de asiento sea de 250 MPa, el diseñador ubica el lugar en el eje x (microdeformación) igual al valor determinado, por ej.: microdeformación de 1600 en esta tabla de ejemplo que aparece como la línea punteada roja vertical.

Se debe tener en cuenta que este nivel de deformación limitante presenta tres posibles soluciones de espesor de base, es decir:

- 350 mm de material Tipo 1 (Módulo 2000 MPa)
- 500 mm de material Tipo 2 (Módulo 1000 MPa)
- 625 mm de material Tipo 3 (Módulo 500 MPa)

La elección final del material base se hará (y se debe hacer así) según el precio y disponibilidad del material.

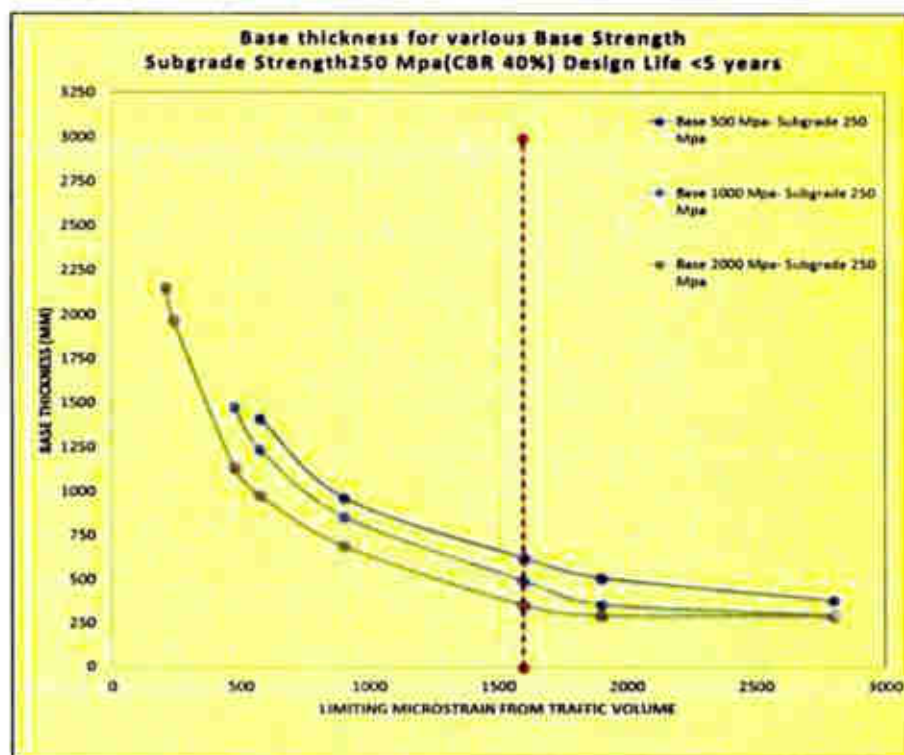


FIGURA 3-28. Espesor de la Capa Base para Cumplir con la Microdeformación Limitante de la Carga de Tráfico.

Fuente: Minera Las Bambas.

### 3.2.3 Diseño Funcional para Las Bambas.

Igualmente, importante como la resistencia estructural del diseño es la transitabilidad funcional de la vía de transporte. Este procedimiento está basado en

gran medida a través de la selección, aplicación y mantenimiento de los materiales de la carpeta de rodamiento (o revestimiento de vía). Un pobre rendimiento funcional se manifiesta como una pobre calidad de viaje, exceso de polvo, incremento en el desgaste y daños a los neumáticos y por consiguiente una pérdida de la productividad. El resultado de estos efectos se puede ver en un incremento en los costos de operación y mantenimiento de los vehículos. Las especificaciones del diseño funcional se preocupan de la carpeta de rodamiento (o de la capa de la cubierta). El material utilizado debe cumplir con las especificaciones y debe ser construido (críticamente, compactado) correctamente si no, entonces el vía tendrá un desempeño muy pobre y deberá recibir mantenimiento intensamente requerirá ser raspado regularmente debido a que el material de la carpeta de rodamiento es muy suave, o muy suelto (deleznable o desmoronable), mucho polvo o muy resbaladizo (especialmente cuando esta mojado, pero también cuando está seco debido a la presencia de material suelto o "no consolidado" sobre la superficie). Estos problemas son referidos como "defectos" de las condiciones de la vía y cualquier especificación del diseño funcional está dirigida a reducir estos defectos y como se verá, de este modo reduciendo la resistencia al rodado.

El material de la capa de rodado es vaciado sobre la capa base o la capa de roca estéril quebrada. Después una motoniveladora abrirá el material y lo esparcirán uniformemente sobre la vía antes de ser compactado. La corona de la vía que ya ha sido establecida sobre la capa base esto significa que la carpeta de la superficie de rodamiento puede ser de un espesor constante de 200 mm a través de todo el ancho de vía, incluyendo los lados y las cunetas de drenaje, las cuales forman parte del ancho de la construcción.

### 3.2.3.1 Selección del Material de la Carpeta de Rodado.

El diseño funcional de una vía de transporte es el proceso de selección del material o mezcla de materiales más apropiados para la capa de rodadura, típicamente grava natural o roca triturada y mezcla de gravas que son adecuadas tomando en cuenta las consideraciones de seguridad, operación, medio ambiente y económicas.

Una capa de rodamiento ideal en la construcción de una vía de transporte en una mina, debe de cumplir con los siguientes requerimientos:

- La habilidad de proveer un recorrido seguro y apropiado para los vehículos sin la necesidad de un mantenimiento excesivo
- Adecuada transitabilidad bajo condiciones mojadas o secas
- Habilidad de despojarse del agua sin causar una erosión excesiva;
- Resistencia a la acción abrasiva del tráfico
- Libre de polvo en exceso en climas secos
- Libre de superficies excesivamente resbaladizas
- De mantenimiento fácil y de bajo costo.

Las características requeridas para el rendimiento del material de la capa de rodadura superficial pueden detallarse de la siguiente manera:

- Propiedades de la capa - para la capa de rodaje como unidad:
  - Buen perfil superficial (adecuada pendiente transversal)
  - Adecuado grosor de capa
  - Buena compactación / resistencia
- Propiedades materiales - en gran medida determinan el rendimiento general:

- Impermeabilidad
- Baja liberación de polvo
- Baja pérdida de rocas
- Estabilidad estructural (no se erosiona)
- Mineralogía
- Alta tracción
- Alta resistencia al deslizamiento horizontal
- Baja capacidad de dañar neumáticos
- Facilidad de trabajo (mantenimiento de pendiente)
- Piedras de alta resistencia (dureza/resistencia)
- Alta resistencia a la erosión hídrica
- Alta estabilidad en condiciones de roca húmeda
- Capacidad del material a ser compactado para generar una capa portante de carga de alta resistencia

El diseño de la capa de rodaje es esencialmente un procedimiento de dos etapas:

1. Diseño utilizando el material seleccionado para alcanzar el criterio de grosor y resistencia de capa.
2. Selección del material adecuado para alcanzar el criterio de servicio y rendimiento funcional establecido previamente.

***A) Propiedades Dimensionales y de Resistencia de la Capa.***

- a) **Perfil Superficial.** - La disposición de un perfil superficial liso y consistente con una adecuada pendiente transversal es esencial para poder drenar la



superficie. Se recomienda una pendiente transversal del 3% para garantizar un adecuado despeje de agua superficial de las vías de tránsito hacia los drenajes en superficie.

- b) **Grosor de la Capa.** - Al analizar la práctica en la industria, las recomendaciones para las capas de rodaje en caminos de acarreo oscilan entre 200 mm y 500 mm. Basándose en lo anterior, se propone que el grosor de la capa de rodadura sea de 500 mm con un mínimo de servicio de 250 mm.
- c) **Compactación/resistencia.** - La capa de rodadura de la calzada es la capa que está directamente en contacto con la carga de los neumáticos de los camiones de acarreo, y, por lo tanto, aunque no está diseñada para ofrecer la capacidad estructural de transmisión de carga de la capa base de la calzada, una vez compactados los materiales de la capa de rodadura, deberán formar una fuerte y resistente capa de transferencia de carga. La prueba DCP puede medir tanto el grosor alcanzado en la capa compactada como la resistencia del material de la capa de rodadura realizando mediciones en cada carril de tránsito con un espaciado nominal recomendado de 100 m. La prueba es rápida y no destructiva; los estándares ideales para esta prueba son los siguientes:
- Grosor ideal mínimo de la capa de rodadura para obras nuevas = 250 mm.
  - Resistencia ideal mínima del material de la capa de rodaje = CBR 80%

#### ***B) Propiedades de los Materiales.***

Los muchos criterios de desempeño relacionados con los materiales indicados anteriormente las cuales se organizan en cuatro grupos principales según las propiedades materiales:

- Mineralogía y efectos sub-granulares (interacción química, meteorización, susceptibilidad al agua).
  - Propiedades de las partículas individuales de la roca (perfil, rugosidad superficial, dureza /resistencia).
  - Plasticidad como proporción de la mezcla (esencialmente relacionada al contenido de arcilla).
  - Distribución / granulometría del tamaño de las partículas (incluyendo medida máxima de la roca).
- a) Mineralogía y Efectos Sub-granulares.** - Algunos efectos y su presencia o ausencia en el yacimiento minero de Las Bambas son:
- *Roca meteorizada.* - Se han considerado algunos yacimientos de roca ígnea como fuente potencial de roca dura para triturarla y preparar material para la capa de rodaje.
  - *Susceptibilidad al agua.* - En contraste con la roca ígnea dura analizada anteriormente, otras fuentes de roca dura en depósitos de caliza masiva, utilizada previamente en Las Bambas para la superficie de los caminos de acarreo, ha demostrado ser extremadamente inútil.
- b) Propiedades de las Partículas Individuales de Roca.** - Las propiedades de las partículas individuales de roca dentro de un material, sin importar que tan bien graduado pueda estar, tienen un efecto enorme y decisivo sobre la adecuación de un material para uso en ingeniería. A continuación, se analizan estas propiedades y su importancia.
- *Dureza/blandura de la roca:* Si las partículas más grandes de la roca en una mezcla son blandas, cuando sean compactadas y ciertamente bajo

tráfico, estas se romperán, cambiando la graduación de la mezcla y, por ende, sus propiedades, alejándose del rango ideal diseñado originalmente.

- *Rugosidad superficial de las partículas:* Se necesita de partículas de roca con buenas esquinas afiladas, lo que brinda un buen contacto de fricción entre las partículas.
- *Perfil de las partículas:* Se prefieren partículas cuboides. Las partículas alargadas o planas son difíciles de compactar y trabajar debido a los efectos de puente entre las partículas, lo que resultará en mezclas compactadas menos estables y de menor densidad.

c) **Distribución / Graduación del Tamaño de las Partículas.** - Una vez que se haya garantizado la calidad de las partículas individuales dentro de la mezcla considerando la mineralogía y propiedades de las partículas de la roca descritas previamente, se puede hacer una evaluación del efecto en el rendimiento de la capa de rodaje de la graduación del material de la grava.

d) **Plasticidad como Proporción de la Mezcla.** - La cantidad de arcilla en una mezcla de grava tiene un gran efecto en su desempeño. Una cantidad adecuada de arcilla en la mezcla de grava actúa como aglutinante para unir al material en condiciones secas y reducir la pérdida de rocas y las emisiones de polvo. Además, una adecuada cantidad de arcilla ayudará a impermeabilizar la capa de rodaje, mejorando la escorrentía de drenaje de la superficie y protegiendo la capa base estructural de los efectos debilitadores de un potencial ingreso de humedad.



### *C) Propiedades Ideales del Diseño del Material.*

En Sudáfrica se realizó un programa de investigación sobre caminos de acarreo minero a partir de finales de los '90 hasta entrados los 2000. Las investigaciones se realizaron para comprender las principales variables que controlan el desempeño de las superficies que utilizan grava. Se consideraron una gran cantidad de factores, pero los parámetros cruciales estuvieron relacionados con la distribución del tamaño de las partículas (PSD) y el grado de plasticidad de la mezcla. Se desarrollaron dos variables sencillas, las que con un único valor numérico pudieran describir la naturaleza del PSD y el grado de plasticidad de la mezcla:

- La calidad del PSD se describió con el valor del Coeficiente de graduación (GC), el que se define como:

$$GC = (P_{265} - P_2) \times P_{475} / 100$$

Donde  $P_{425}$ ,  $P_2$ ,  $P_{475}$  y  $P_{265}$  hacen referencia al % del peso de los elementos que pasan por filtros de medida 0.075, 0.425, 2.0, 4.75 y 26.5 mm, respectivamente.

- La cualidad de plasticidad se describió con el valor de Producto contraible (SP), el que se define como:

$$SP = \text{Contracción lineal de barra (LS)} \times P_{425}$$

**Nota:** La Contracción de barra (LS) se vincula al Índice de plasticidad (PI).

Se halló que era posible predecir el desempeño superficial de un material en particular basándose en la mezcla de los valores para el GC y el SP, tal como lo determine una prueba de laboratorio para ese material, y luego graficarlo en las tablas, tal como se indica en la Figura 3-29.

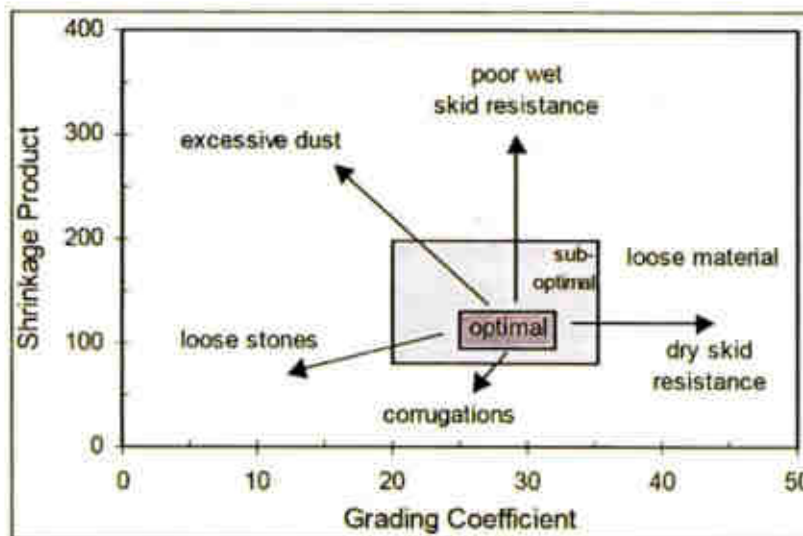


FIGURA 3-29. Tabla SP vs. GC Aplicables a Vías de Acarreo.  
Fuente: RJ Thompson (2015).

**Para describir mejor el significado del GC:**

- Un bajo valor de GC se vincula con una mezcla graduada de espacios, digamos de rocas grandes y pequeñas, con una falta de medidas intermedias. Tales mezclas son inherentemente inestables desde el punto de vista estructural.
- Un alto valor de GC se vincula a una mezcla de básicamente la misma medida, con piedras de un tamaño predominantemente intermedio. Tales mezclas son también inherentemente inestables desde el punto de vista estructural.
- Un valor intermedio de GC representa una mezcla bien graduada con una distribución de todas las medidas de rocas y es estructuralmente estable.

**Para describir mejor el significado del SP:**

- Para el SP, se realiza la prueba de contracción (y la cantidad de plasticidad relacionada) al material de menos de 0.425 mm.

Por este motivo, el SP indica el valor de plasticidad que afecta a todo el material multiplicando el valor de contracción (específicamente el valor de



plasticidad) del material que pasa el tamiz de 0.425 mm por la proporción de la masa total del material compuesto por este material de menos de 0.425 mm.

Por lo tanto, un mayor SP es el resultado de una combinación de alta plasticidad dentro del mismo material menor a 0.425 mm y/o una mayor proporción de este material dentro de la cantidad total del material en general.

Los rangos de los valores GC y SP representados por este rectángulo mayor de desempeño razonable en las tablas GC y SP para caminos de acarreo minero son:

- GC: 20 a 35
- SP: 85 a 200

Teniendo en cuenta la gama de medidas producida por la trituradora de material vial en Las Bambas, se desarrolló una envolvente de distribución de medidas de partículas para un material bien graduado, lo que cumple con la gama de GC prevista, Figura 3-30. La distribución también se presenta en forma tabular en la Tabla 3-18.

También se tuvo en cuenta las medidas del extremo de los más finos, especialmente del material que pasa por el tamiz de 0.425 mm.

En el caso de estos finos, para cumplir con la gama de los valores SP previstos, el Índice de plasticidad (PI) de estos finos debería estar en la gama de 8 a 15.

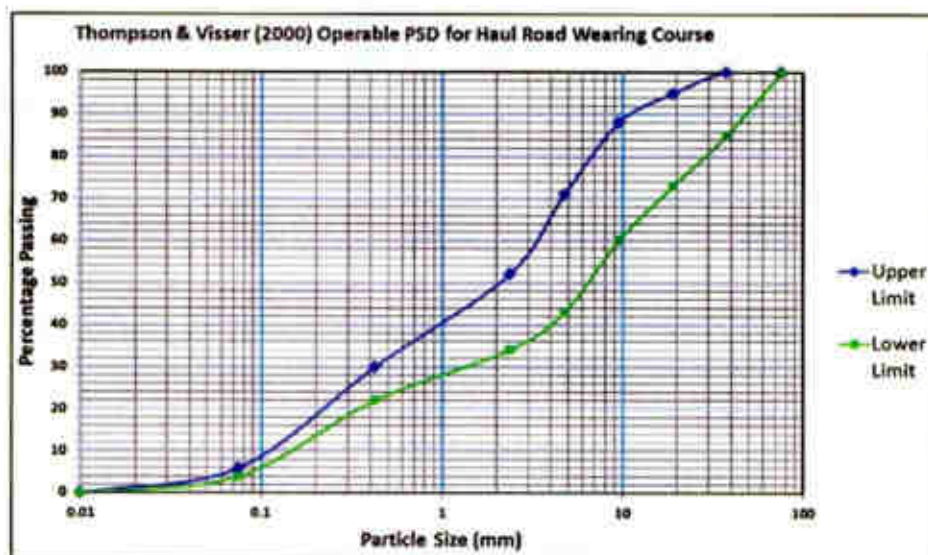


FIGURA 3-30. El PSD Ideal Resultante se Muestra a Continuación.  
Fuente: Minera Las Bambas.

La Figura 3-30 representa los límites máximos y mínimos de la distribución del tamaño de las partículas que pasan por un tamizado de acuerdo a las normas ASHTO el cual está definido por los tamaños ideales que deben cumplir para poder diseñar una carpeta de rodadura adecuada en la construcción de una vía minera. La Tabla 3-18 muestra los valores de la distribución del tamaño de las partículas (PSD) graficadas en la figura antes mencionada.

TABLA 3-18. PSD Ideal en Formato Tabular.

Medida de tamiz (mm)	% que pasa	
	Limite superior	Limite inferior
76	100	100
37,5	100	85
19	95	73
9,5	88	60
4,75	71	43
2,36	52	34
0,425	30	22
0,075	6	4
0,01	0	0

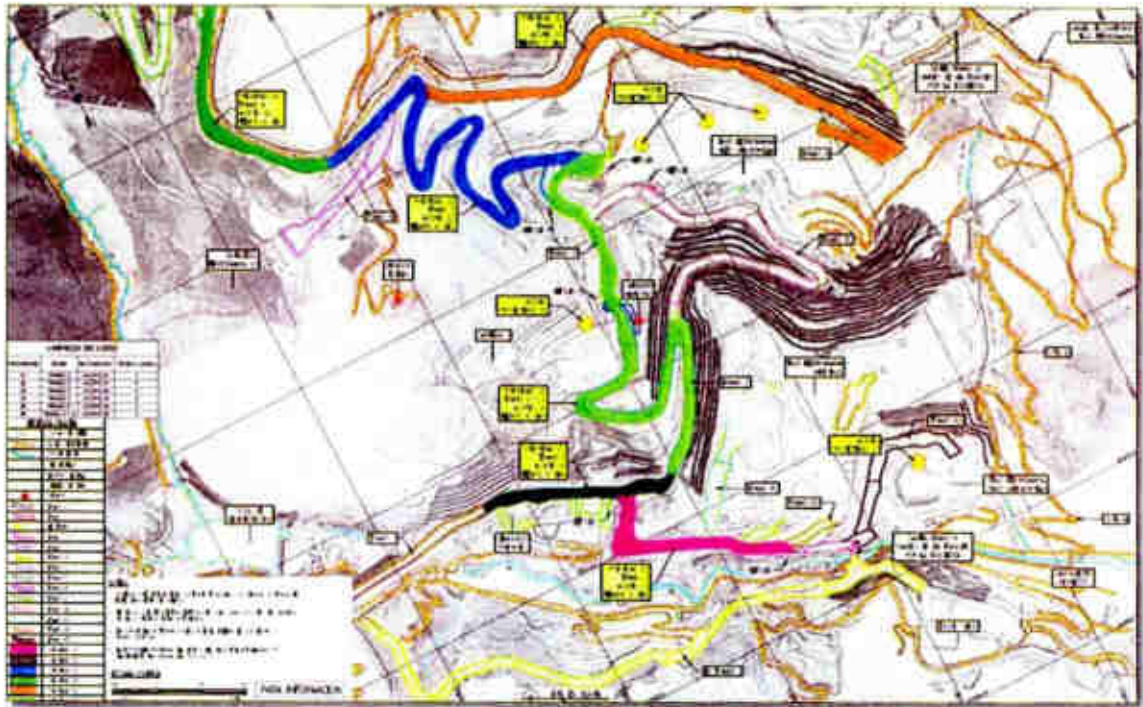
Fuente: Minera Las Bambas.

#### 3.2.4 Diseño de Mantenimiento.

En la construcción de un camino de transporte, la superficie está sometida a deformaciones por el constante paso de los vehículos de acarreo. Aunque el deterioro puede ser controlado en gran medida por el tipo de material empleado en la superficie, el operador deberá considerar un programa de mantenimiento de camino según la necesidad de seguridad y factores económicos. Por lo cual, en Las Bambas se ha realizado un plan de mantenimiento de vías para el año 2017, el cual contempla un plan de corto plazo, mediano plazo y largo plazo. Así mismo, se determinó los recursos necesarios para la realización de la misma.

3.2.4.1 Plan de Mantenimiento de Vías - Corto Plazo.

A) Plano de Ubicación de Vías por Tramos.



Fuente: Minera Las Bambas.

B) Cronograma para el Mantenimiento de Vías.

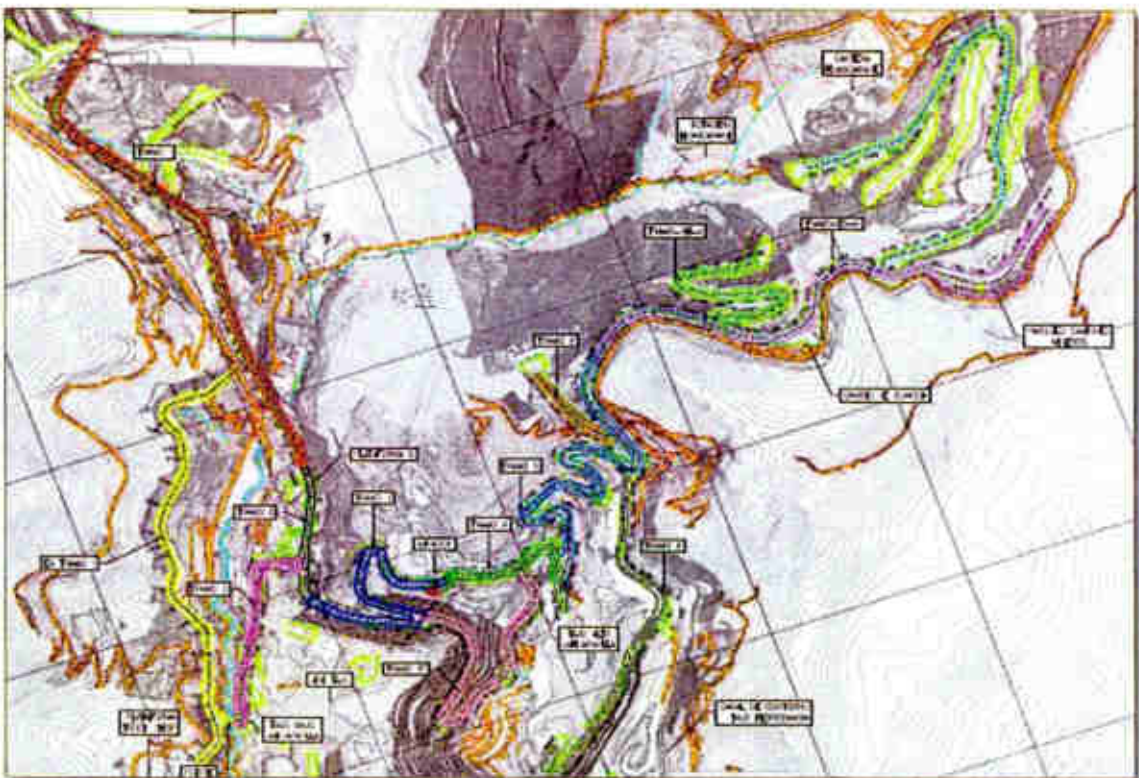
		MAR-2017																					
N°	Tramos	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	Tramo 02	█	█	█																			
2	Tramo 00				█	█	█	█	█														
3	Tramo 05								█	█	█	█											
4	Tramo 06													█	█								
5	Tramo 03 y 04															█	█	█	█				
6	Tramo 09																				█	█	█

*C) Recursos Necesarios a ser Utilizados.*

- Cargador Cat 992H
- Camiones Komatsu 1500HD
- Cargador Cat 988H
- Cargador Cat 988K
- Tractor Cat D10T

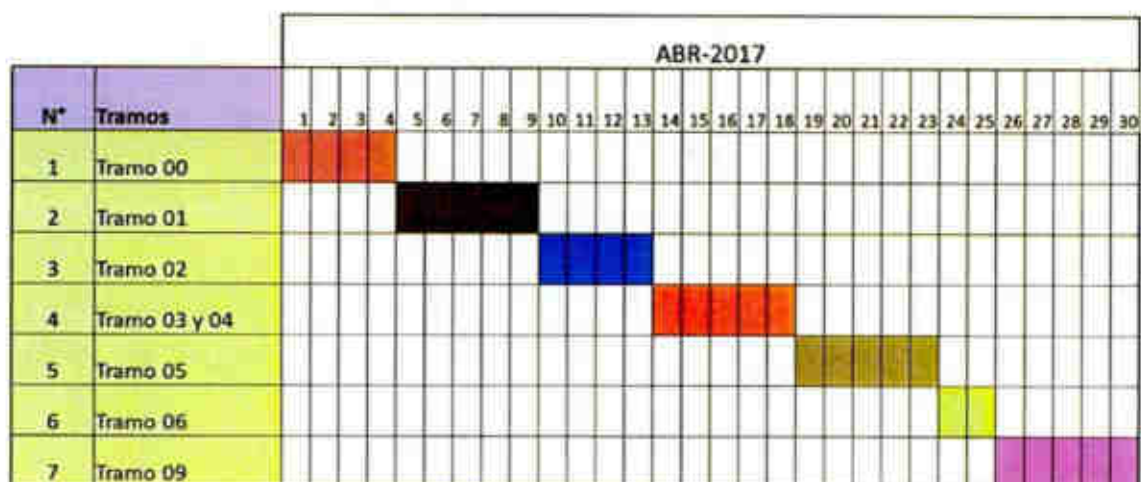
*3.2.4.2 Plan de Mantenimiento de Vías - Mediano Plazo.*

*A) Plano de Ubicación de Vías por Tramos.*



Fuente: Minera Las Bambas.

*B) Cronograma para el Mantenimiento de Vías.*



Fuente: Minera Las Bambas.

*C) Recursos Necesarios a ser Utilizados.*

- 01 Cargador Cat 992H
- 02 Camiones Komatsu 1500HD (Conversión a cisterna)
- 01 Cargador Cat 988H
- 01 Cargador Cat 988K
- 01 Tractor Cat D10T
- 01 Cargador LE TOURNEAU L2350-II (Fecha Inicio de operatividad, 25 de marzo).
- 01 Chancadora Móvil (Fecha inicio Abril 2017)
- 01 Motoniveladora CAT 16H

### 3.2.4.3 Plan de Mantenimiento de Vías - Largo Plazo.

#### A) Cronograma para el Mantenimiento de Vías.

N°	Actividades	2017											
		Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
1	Diseño de vías(Actualización)												
2	Construcción de vías												
3	Ensanche de vías y radio de Curvatura												
4	Mantenimiento de vías												
4.1	Mantenimiento de mediano Plazo												
4.2	Mantenimiento de corto Plazo												
5	Señalización												
6	Construcción de Drenaje												
7	Mantenimiento de Drenaje												
8	Chancado de material												

Fuente: Minera Las Bambas.

#### B) Recursos Necesarios a ser Utilizados.

- 01 Cargador Cat 992H
- 02 Camiones 773
- 01 Cargador Cat 988H
- 01 Cargador Cat 988K
- 01 Tractor Cat D10T
- 01 Cargador LE TOURNEAU L2350-II
- 01 Chancadora Móvil
- 01 Motoniveladora CAT 14H
- 01 Motoniveladora CAT 16H
- 01 Excavadora CAT 390 DL
- 01 Cisterna Articulada de agua 740

El Mantenimiento de Vías será de dos tipos: **Mantenimiento Rutinario o Preventivo y Mantenimiento Correctivo.**

#### **3.2.4.4 Mantenimiento Rutinario o Preventivo.**

Consiste en la eliminación de los finos acumulados en la superficie de la vía por: caída (de los camiones de acarreo); arrastre (en los neumáticos de los camiones de acarreo); y por desgaste por abrasión de los materiales de la Capa de Rodadura. La necesidad del Mantenimiento Rutinario se pone en evidencia cuando ocurren derrapes de los camiones después del riego o lluvia.

Se hará con la motoniveladora siguiendo el siguiente procedimiento:

- (i) Escarificación ligera (entre 5 a 10 cm de profundidad) de la superficie de la vía;
- (ii) Esparcido en toda la superficie escarificada con material granular con tamaño máximo de una pulgada y con el espesor medio de la escarificación ligera efectuada en el paso previo; y
- (iii) Compactación del conjunto con rodillo vibratorio con un mínimo de cuatro pasadas sobre toda la superficie tratada. En este caso no es necesario tomar controles de compactación.

También comprende:

- (i) El perfilado y la conformación localizada de la superficie que estuviera en mal estado, eliminando las piedras o barro y reemplazándolo por material granular con tamaño máximo de una pulgada en caso sea necesario;

- (ii) La limpieza diaria de las cunetas, alcantarillas y pozas. Las entradas y salidas de las alcantarillas, sangrías y ventanas, serán protegidas con enrocados, geotextiles o costales llenos de material fino; y
- (iii) La conformación de los taludes de corte y de Las Bermas.

#### **3.2.4.5 Mantenimiento Correctivo.**

La necesidad del Mantenimiento Correctivo se pone en evidencia en los ahuellamientos, corrimientos o hundimientos que se presentan en la superficie de la vía, ocasionados por las sucesivas acumulaciones de finos y su posterior estabilización con materiales granulares de los trabajos de Mantenimiento Rutinario como se ha descrito anteriormente en el ítem 3.2.4.4. Se corrigen cortando y eliminando fuera de la vía a todos los materiales depositados por encima de la Capa de Rodadura, lo que necesariamente implica la necesidad de determinar previamente los espesores de corte mediante calicatas.

Todos los materiales excedentes provenientes de los trabajos de Mantenimiento Rutinario y Correctivo se colocarán preferentemente en el centro de la vía para luego ser eliminados, evitando en todo caso llevarlos a las cunetas, obstruyéndolas.

El Mantenimiento de Vías se hará por carriles, para no interrumpir el tránsito de los vehículos. Se colocarán señalizaciones preventivas e informativas en todas las vías durante el Mantenimiento.

#### **3.2.5 Propiedades Ideales del Material en la Capa de Rodadura**

Es poco habitual obtener directamente un material que ya cumpla con las propiedades ideales del diseño y habitualmente se requiere mezclar diferentes materiales para conseguir las propiedades especificadas.

El material disponible para la capa de rodaje diseñada en Las Bambas no cumple con las especificaciones de diseño requeridas para los materiales de la capa de rodaje y se debe modificar y combinar con finos y arcillas provenientes de otras fuentes. El desarrollo de esta nueva mezcla de diseño para cumplir con las especificaciones de la capa de rodaje se describe a continuación.

### 3.2.5.1 Naturaleza del Material Inicialmente Disponible para su Posible Modificación para Usarlo como Material de Superficie.

La naturaleza del material inicialmente disponible para ser modificado es el producido por la chancadora secundaria, obtenido de acuerdo con el PSD ilustrado en la Figura 3-31.

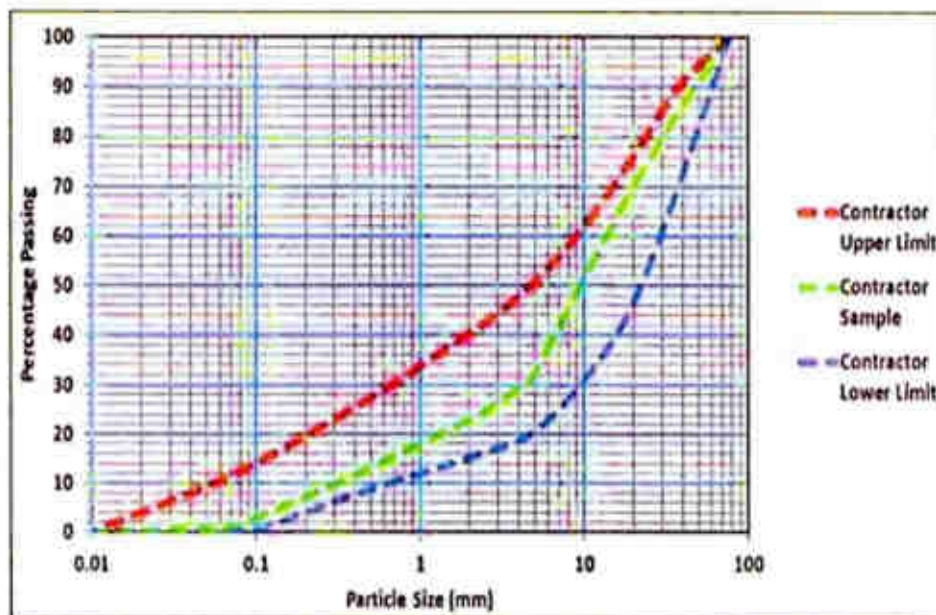


FIGURA 3-31. PSD Inicial de Acuerdo con el Contratista.  
Fuente: Minera Las Bambas.

Se muestra la misma envolvente de PSD en formato tabular en la Tabla 3-19.

TABLA 3-19. PSD del Contratista en Formato Tabular.

Medida de tamiz (mm)	% que pasa		
	Límite superior	Muestra del contratista	Límite inferior
76	100	100	100
37.5	90	85	70
19	75	69	45
9.5	61	50	30
4.75	50	31	20
2.36	42	24	16
0.425	26	12	8
0.075	12	1	0
0.01	0	0	0

Fuente: Minera Las Bambas.

Tomando la muestra del contratista, representativa del material de rango medio dentro de la envolvente provista, este material fue cargado y se evaluó para determinar su PSD y Plasticidad en el software de análisis del kit de pruebas para base de caminos desarrollado por ARRB (RBTK V1.08).

Los resultados se brindan en términos de lo evaluado:

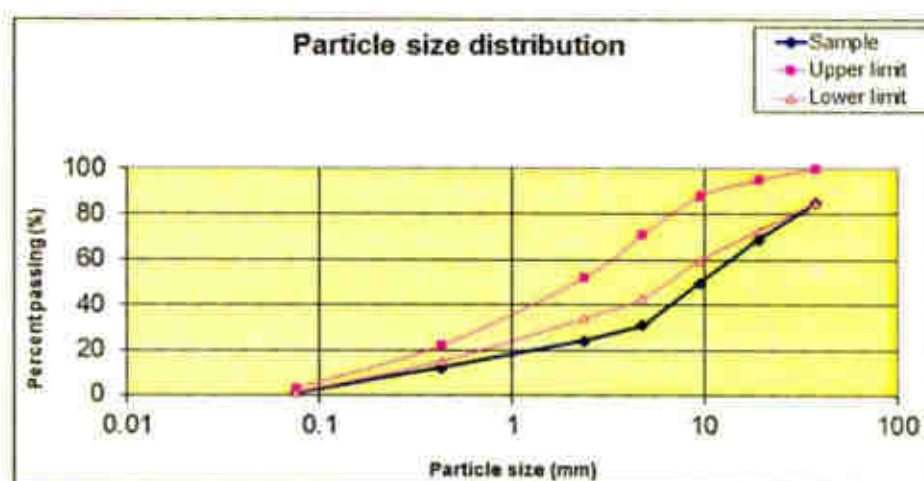
- El PSD tabular, el Límite líquido (L.L.) y el Índice de plasticidad se muestran en la Tabla 3-20.
- El PSD graficado relativo a la nueva envolvente PSD ideal para la superficie se muestra en la Figura 3-32.
- El resultado tabulado para el material en la tabla de desempeño GC vs. SP para caminos de acarreo minero se muestra en:

El PSD y la naturaleza de Plasticidad evaluados de la muestra se describe en la Tabla 3-20.

**TABLA 3-20.** PSD y Naturaleza de Plasticidad Evaluados en la Muestra del Contratista.

Medida de tamiz (mm)	% que pasa (Muestra del contratista)
37,5	85
19	69
9,5	50
4,75	31
2,36	24
0,425	12
0,075	1
Limite liquido (%)	25%
Indice de plasticidad (%)	6%

Fuente: Minera Las Bambas.



**FIGURA 3-32.** PSD de la Muestra Relacionada con la Nueva Envolvente Ideal para Superficie.

Fuente: Giummarra et al, 2009a, 2009b.

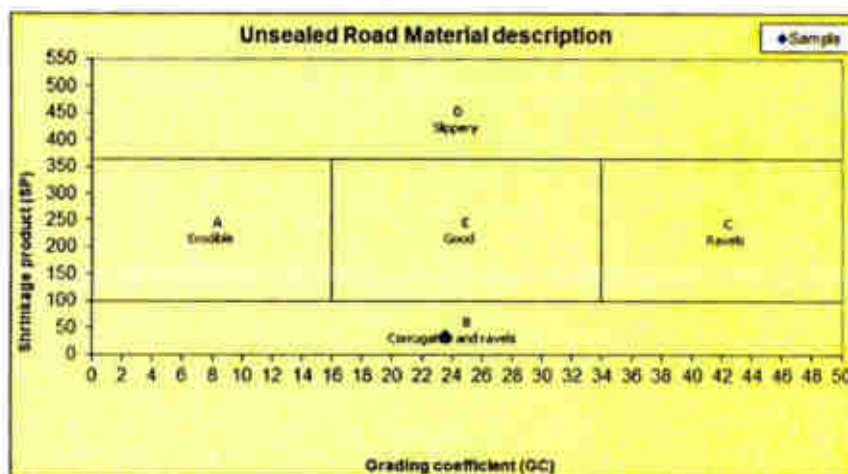


FIGURA 3-33. Ubicación del GC y SP de la Muestra en la Tabla de Desempeño del GC y SP.

Fuente: Giummarra et al, 2009a, 2009b

El resultado del GC y del SP en la Figura 3-33 fue la presentada en el kit de pruebas para base de caminos en una plantilla adecuada para caminos de ripio locales. Luego se graficaron los resultados del GC vs. SP en una plantilla adecuada para caminos de acarreo minero en la Figura 3-34.

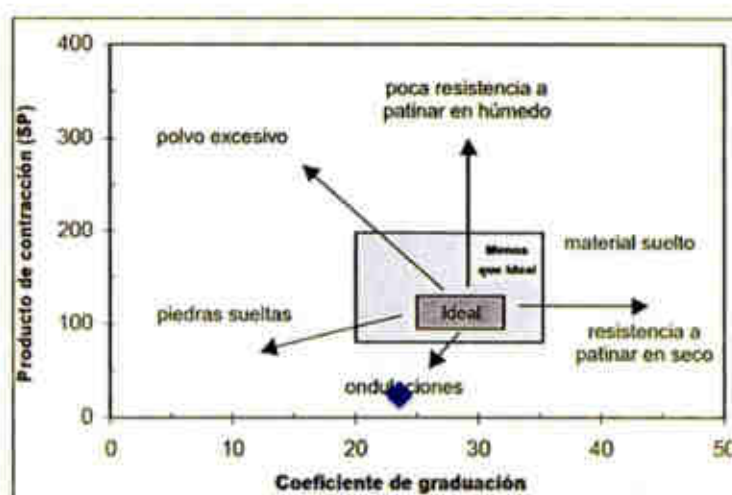


FIGURA 3-34. Ubicación del GC y SP de la Muestra en la Tabla de Desempeño del GC y SP.

Fuente: Thompson, 2015

La evaluación de los análisis es que los materiales existentes ofrecidos, según la muestra intermedia del contratista, tiene deficiencias que impiden utilizarlos en su forma bruta como capa de rodaje superficial.

- En cuanto a la Figura 3-32, el material está fuera de la envolvente del PSD requerido.
- En cuanto a la Figura 3-34, aunque el material está razonablemente bien graduado, tal como lo muestra su valor GC, se indica que posiblemente sufra ondulaciones en servicio, especialmente debido a una falta de plasticidad activa (bajo valor SP) en su mezcla.

Con esto se puede concluir que:

- El material inicial provisto requiere de un importante aumento en sus propiedades de Plasticidad para permitirle desempeñarse como capa superficial de rodaje razonable.

Un enfoque que incluye la combinación del material de roca triturada en bruto con material más fino, especialmente de alta Plasticidad, posiblemente ofrezca una capa de rodaje adecuada que cumpla con los requisitos de las propiedades materiales ideales.

### **3.2.5.2 Naturaleza de los Materiales de Grano Fino Disponibles para Posible**

#### ***Combinación con Roca Triturada.***

Se identificaron materiales de grano fino como posibles candidatos para la combinación:

- Arcilla marrón limosa (del “Minitajo” en Tramo 3)
- Arcilla blanca grasosa del mismo sitio



- Arena gruesa naranja (de cerca de la presa de relaves)

Todos estos materiales, aunque muestreados de los lugares indicados previamente, están disponibles en grandes cantidades en diferentes puntos dentro del yacimiento minero. Las muestras fueron analizadas usando el RBTK para evaluar su PSD y propiedades de elasticidad.

Los resultados de las pruebas se resumen en la Tabla 3-21.

TABLA 3-21. Resumen de las Características de Estos Materiales de Grano Fino.

Medida de tamiz (mm)	% que pasa		
	Arcilla marrón	Arcilla blanca	Arena naranja
37.5	100	100	100
19	100	100	100
9.5	100	100	100
4.75	100	100	99
2.36	100	100	88
0.425	100	89	30
0.075	22	37	9
Limite liquido (%)	34%	54%	35%
Índice de plasticidad (%)	15%	11%	4%

Fuente: Minera Las Bambas.

Aunque la arcilla blanca presenta una textura mucho más grasosa que la arcilla marrón, la que presenta una textura granulosa/limosa distintiva, esta última ha sido elegida para la mezcla en caso de necesitarse Arcilla, ya que:

- La arcilla marrón tiene un PI superior (15) y por lo tanto serán necesarias menores cantidades que un material con menor PI, tal como es el caso de la arcilla blanca.

- La textura de la arcilla marrón es fácil de desmenuzarse y eso facilita su mezcla uniforme con la roca triturada, condición que le permite superar a la arcilla blanca que tendía a agruparse durante la mezcla.

Por último, la arena naranja es adecuadamente gruesa como para poder mejorar el PSD, además de mejorar la mezcla de los materiales arcillosos.

### 3.2.6 Evaluación de la Calzada y de los Materiales.

Las investigaciones sobre la calzada existente y la capa de asiento subyacente se hacen antes del diseño y construcción de un tratamiento de refuerzo para un camino existente. En cuanto a la evaluación de obras nuevas, los dos tipos requeridos de pruebas de calzada se organizan en dos grupos:

- Pozos de prueba
- Penetrómetro dinámico de cono (DCP)

En cuanto a las obras nuevas, ocasionalmente se utilizan las pruebas DCP para conocer más de algunas excavaciones de prueba; en otras ocasiones se hacen pruebas DCP para identificar donde hacer una excavación de prueba, por ejemplo, en aquellos lugares donde las pruebas DCP han detectado anomalías o donde se requiere confirmación para una serie de pruebas DCP.

#### 3.2.6.1 Pozos de Prueba.

Los pozos de pruebas en caminos de acarreo existentes requieren equipo pesado para llevar a cabo el trabajo, tal como se muestra en la Fotografía 3-2, y deben penetrar toda la estructura de la calzada hasta la capa de asiento natural, tal como se muestra en la Fotografía 3-3.



**FOTOGRAFÍA 3-2.** Excavación de un Pozo de Prueba en la Calzada de una Vía de Acarreo Existente.



**FOTOGRAFÍA 3-3.** Pozo de Prueba que Muestra la Excavación a Través de toda la Calzada hasta el Nivel de la Capa de Asiento Natural.

En este caso, la estructura existente de la calzada presenta 2 m de profundidad, con dos capas claramente distintas. Las muestras del material, cada una de 20 Kg, se necesitan para cada capa de cada pozo de prueba, incluyendo la capa de asiento, tal como se muestra en la Fotografía 3-4 y en la Fotografía 3-5.



FOTOGRAFÍA 3-4. Muestra de Material de Cada Horizonte de Capa.



FOTOGRAFÍA 3-5. Muestras Identificadas por Pozo y Profundidad (relacionadas con el horizonte de capa).

#### 3.2.6.2 Perforación/DCP.

Para determinar el grosor de la estructura de la calzada existente y la resistencia de la capa de asiento natural subyacente es necesario hacer una perforación previa a través de la calzada y luego realizar la prueba DCP utilizando varillas de extensión a través del pozo de acceso, tal como se muestra en la Figura 3-35.

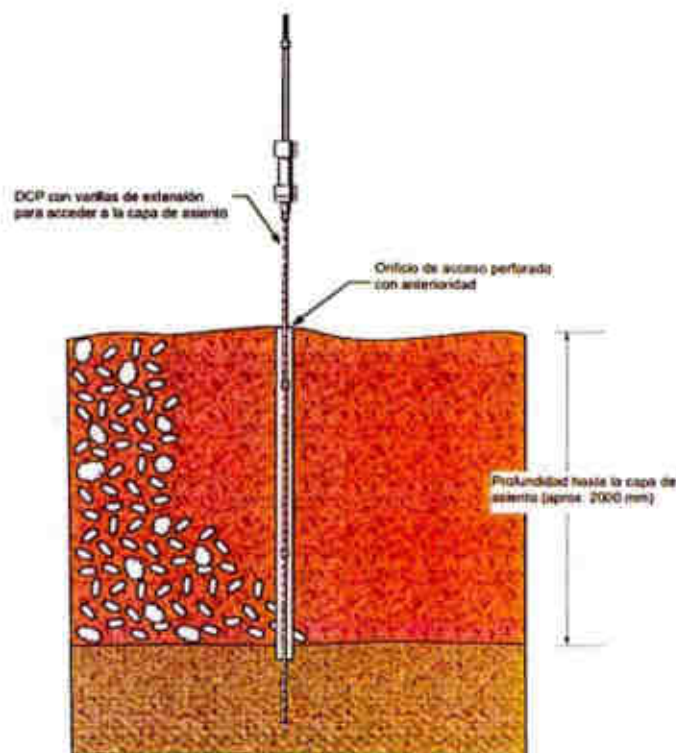


FIGURA 3-35. Prueba DCP de la Capa de Asiento a Través de la Capa de la Calzada Existente.

Fuente: ARRB Group.

La determinación del grosor de la estructura de la calzada existente se hace con la broca a medida que se perfora el orificio de acceso. Por lo tanto, la máquina perforadora utilizada debe ser capaz de detectar cambios en la resistencia del material a medida que penetra la estructura de la calzada a través del material natural subyacente de la capa de asiento. Una vez que se ha perforado la estructura de la calzada, se puede utilizar la DCP (con varillas de extensión) para medir la resistencia de la capa de asiento (CBR).

Durante las pruebas de esta técnica en Las Bambas, se utilizó un taladro para voladura de rocas para hacer la perforación previa de la estructura de la calzada con un orificio de acceso de 50 mm de diámetro, tal como se muestra en la

Fotografía 3-7 y en la Fotografía 3-8. Sin embargo, el operador del taladro tuvo dificultades para detectar los cambios en la resistencia entre el material de la calzada y la blanda capa de asiento subyacente, aunque podría haber desarrollado esta capacidad con mayor experiencia.



**FOTOGRAFÍA 3-6.** Orificio de Acceso Perforado Previamente con Taladro para Roca a Través de la Calzada Existente.



**FOTOGRAFÍA 3-7.** Orificio de Acceso Perforado Previamente a Través de la Estructura de la Calzada.

Los operadores del DCP introducen entonces el DCP con varillas de extensión a través del orificio de acceso tal como se muestra en la Fotografía 3-8 y

comienzan a medir la resistencia de la capa de asiento natural subyacente, comenzando a una profundidad de 2 m debajo de la superficie del camino, tal como se muestra en la Fotografía 3-9.



**FOTOGRAFÍA 3-8.** Cuidadosa Alimentación del DCP con Varillas de Extensión a Través del Orificio de Acceso Antes de la Prueba DCP.



**FOTOGRAFÍA 3-9.** Prueba DCP del Material de la Capa de Asiento Debajo de la Estructura Existente de la Calzada.

### 3.2.7 Propuesta Metodológica para la Implementación de un Diseño Integrado de Vías.

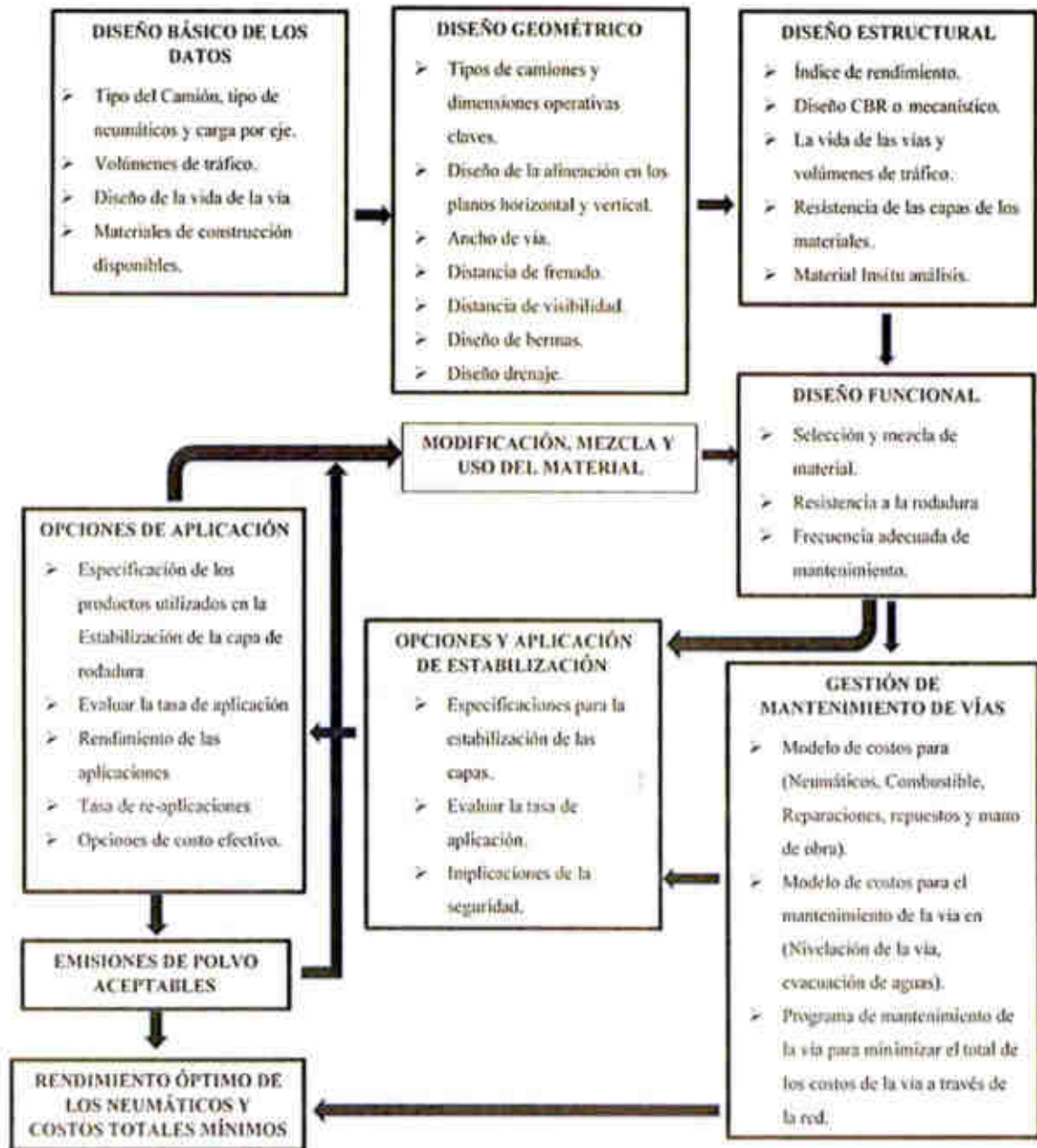


FIGURA 3-36. Flujo de Implementación del Diseño Integrado de Vías para Las Bambas, Fuente: RJ Thompson (2015).

## CAPÍTULO IV

### RENDIMIENTO DE NEUMÁTICOS DE CAMIONES KOMATSU 930E-4SE

#### 4.1 Análisis de la Situación Actual.

Se ha realizado un análisis en el periodo Enero/16 a Setiembre/17 con respecto a los neumáticos dados de baja, referido particularmente al comportamiento de estos en los camiones Komatsu 930E-4SE, por lo que existe la necesidad de revisar la situación actual dado que tal como lo muestra la Figura 4-1 de los neumáticos dados de baja mes a mes en el periodo indicado, se puede ver que a partir del mes de Enero de 2016, fecha en la cual se iniciaron las pruebas para toda la flota con neumáticos Michelin, se ha producido un sostenido y alarmante aumento de las bajas y es así como hasta Diciembre de 2016, el promedio mensual era de 14 (catorce) unidades y en el periodo Enero/17 a Setiembre/17 se incrementó fuertemente a 36 (treinta y seis) unidades. Esto nos indica un aumento de 157.1% en promedio para los últimos 9 (nueve) meses. Aún más, es preciso señalar que el aprovechamiento de la goma disponible es del orden del 67%.

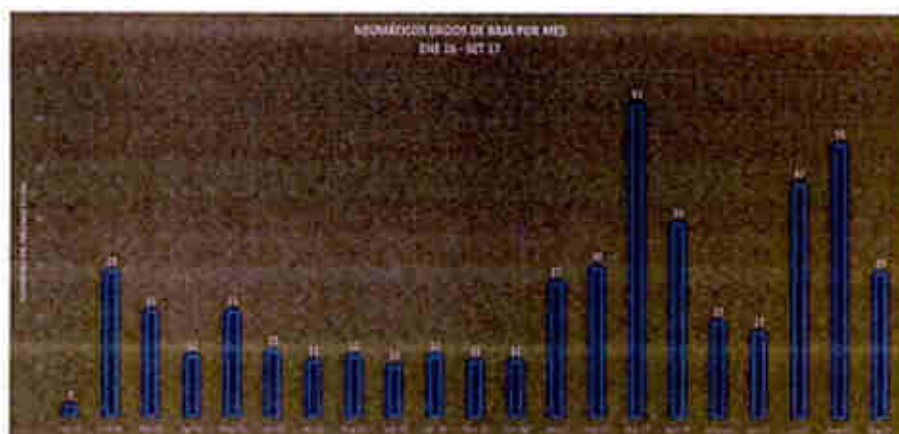


FIGURA 4-1. Neumáticos Dados de Baja por Mes (2016-2017).  
Fuente: Minera Las Bambas.

#### 4.1.1 Goma Usada en Neumáticos Dados de Baja.

Tal como se ha indicado, si se considera que cada neumático tiene un valor aproximado a los US\$ 40,000.00, la tendencia en la minería sobre el uso de estos, es lograr el máximo aprovechamiento en su rendimiento operacional.

Para el período en estudio; Enero a Setiembre, es interesante indicar que el 56.4% de los neumáticos dados de baja quedan con al menos un 36% de goma remanente.



FIGURA 4-2. Cantidad de Neumáticos Desechados vs % Utilización.  
Fuente: Minera Las Bambas.

Además, de acuerdo con la información estadística utilizada para el presente estudio, observando la gráfica referente al tema de goma usada en neumáticos dados de baja, se puede establecer una tabla con valores asociados al mal aprovechamiento de la goma remanente, tomando como base un uso de goma de 82%; es decir, todo lo que esté sobre el 18% de goma remanente se considera pérdida.

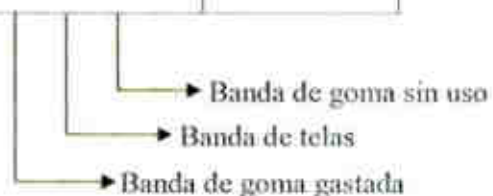


FIGURA 4-3. Fallas de los Neumáticos vs % Goma Usada.

Fuente: Minera Las Bambas.

TABLA 4-1. Diferencias de Goma Utilizada Antes de ser Retirado el Neumático:

Goma Usada (%)	Nº Bajos	Goma Remanente (%)	Pérdida (\$)
100% - 80%	113	0	0
79% - 60%	289	$20 - 18 = 2$	231,200.00
59% - 40%	50	$40 - 18 = 22$	440,000.00
39% - 20%	32	$60 - 18 = 42$	537,600.00
19% - 0%	7	$80 - 18 = 62$	173,600.00



Fuente: Minera Las Bambas

- **Goma Usada:** Es la cantidad de goma utilizada, en su máximo porcentaje de vida útil.
- **Goma Remanente:** Son las bandas que componen el neumático, las cuales sufren el desgaste propio de la exigencia, tal como se presenta en la primera fila del cuadro, donde aparecen los valores máximos y mínimos de la goma utilizada, con la cual se determinará la vida útil del neumático y posteriormente la cantidad de goma remanente.

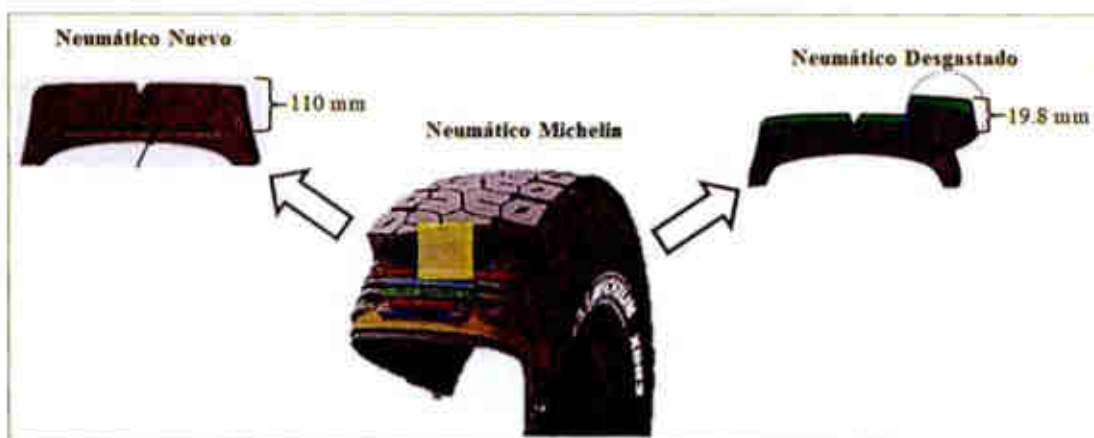


FIGURA 4-4. Cocodas en los Neumáticos Nuevos y para Desecho.  
Fuente: Manual de Michelin.

#### 4.1.2 Bajas de Acuerdo a la Posición del Neumático.

Analizar las bajas desde variados aspectos resulta interesante y a la vez se demuestra la seriedad con que se ataca el estudio, y es así como se ha optado por revisar lo que ocurre considerando las posiciones de los neumáticos en las unidades; vale decir, que los neumáticos ubicados en las posiciones traseras (3 y 4) dada su condición en el sentido que al tener un desgaste por encima del 45% (2,200 hrs.) son más propensos a sufrir daños, dado que están próximos a las bermas de las vías y esto es la razón por la cual el 78.2% de las bajas está dado para estas posiciones, situación que se observa en la Figura 4-5.

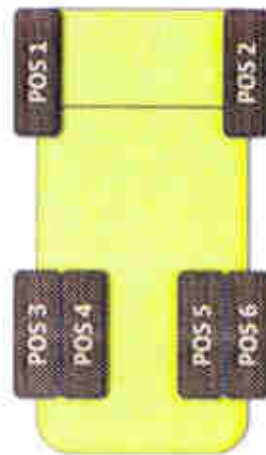


FIGURA 4-5. Ubicación de las Posiciones de los Neumáticos en los Camiones Mineros.  
Fuente: Manual de Komatsu (2009).

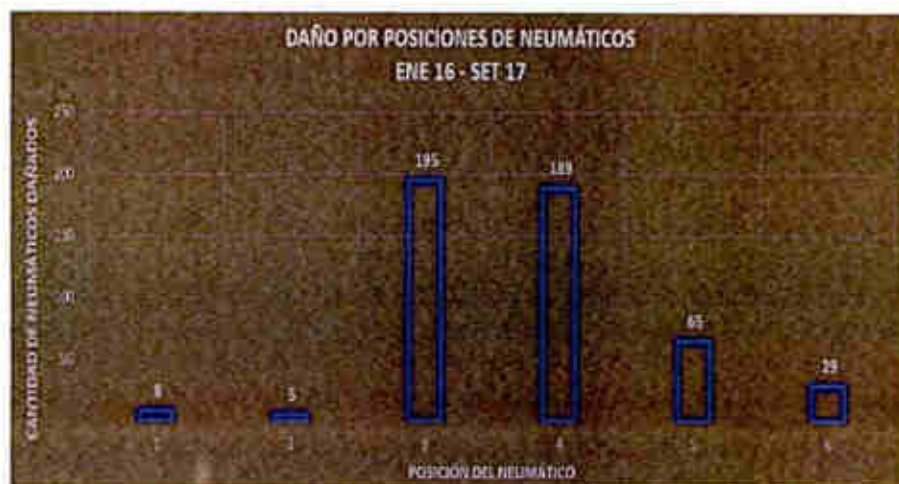


FIGURA 4-6. Daño por Posiciones en los Neumáticos.  
Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.2 Análisis en las Bajas de los Neumáticos.

Para el período en estudio, para los neumáticos que se usan en los camiones Komatsu 930E-4SE, es preciso clasificar las causas de bajas, y es así que la podemos encontrar en la tabla adjunta, la cual nos indica que podemos encontrar un gran número de ellas que no representan a los más incidentes.

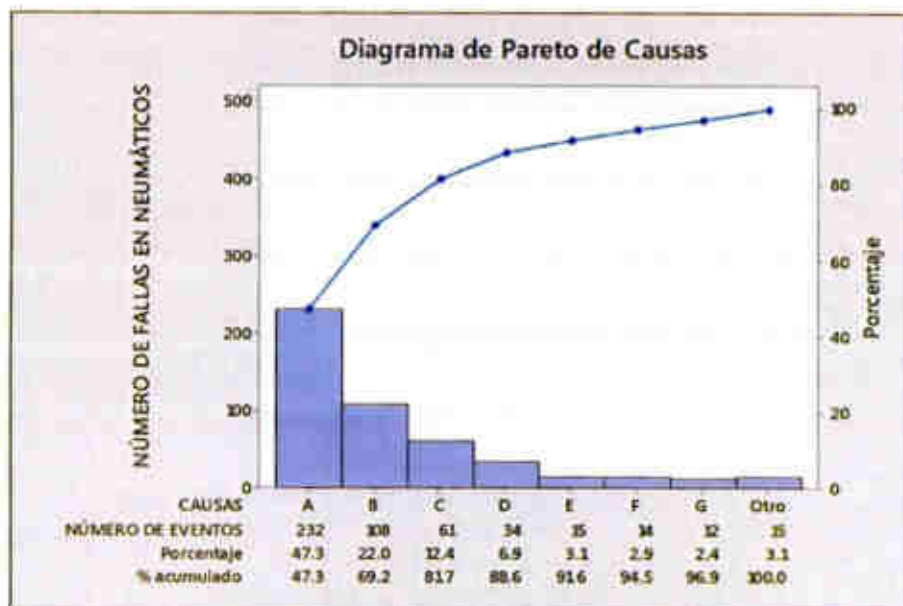


FIGURA 4-7. Diagrama de Pareto de Causas del Retiro de los Neumáticos.  
Fuente: Elaboración Propia.

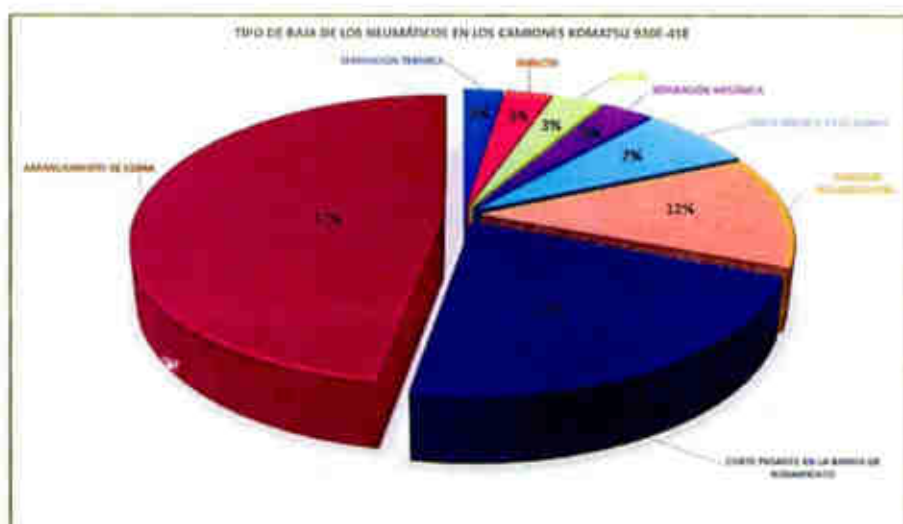


FIGURA 4-8. Tipo de Baja en los Neumáticos.  
Fuente: Elaboración Propia.

## CAUSA

A: Arrancamiento de goma	= 47.3%
B: Corte pasante en la banda de rodamiento	= 22%
C: Desgaste acelerado por deslizamiento	= 12.4%
D: Corte pasante en el flanco	= 6.9%
E: Separación mecánica	= 3.1%
F: Impacto	= 2.9%
G: Separación térmica	= 2.4%
H: Otros	= 3.1%

Respecto a esto, podemos decir que las causas de bajas son ocho, y que sobre éste promedio de incidencias se analizarán solo tres, por orden de frecuencia. De acuerdo a éste orden se tiene:

- Arrancamiento de goma (A) 47.3%
- Corte pasante en la banda de rodamiento (B) 22%
- Desgaste acelerado por deslizamiento (C) 12.4%

Estas causas son importantes analizarlas en forma más profunda, dado que produce una fuerte incidencia en el total de las bajas; además, las mejoras que se pueden lograr para éstas son significativas. Así mismo, se producirá también inevitablemente un efecto positivo en todas las otras causas de bajas que están por debajo del promedio de incidencia, lo que significará que dicho promedio disminuirá en los términos que indiquen los beneficios del estudio.

Se referirá en forma especial a las tres causas de bajas más incidentes, esto es que representan a el 81.7% del total de bajas de los neumáticos y se supone que las

medidas a proponer enfocándolo en esas causas reducirán dos de ellas y producirá un efecto contrario en las bajas por desgaste.

#### 4.2.1 Arrancamiento de Goma (A).

Dado que dentro de las causas de bajas de neumáticos más relevante está dada por el arrancamiento de goma, y si se estima que esto representa el 47.3% de las causas, es necesario proponer medidas que signifiquen bajar éste tipo de fallas.

Se puede agregar también como aspecto destacado que más de la mitad de las bajas por arrancamiento de goma, es decir, el 69% de las causas de bajas, están dadas por neumáticos en los cuales se utilizó a lo menos un 76% de la goma disponible del neumático.

TABLA 4-2. % de Goma Remanente en los Neumáticos.

Goma Usada (%)	Goma Remanente (%)
100% - 80%	31%
79% - 60%	69%
59% - 40%	0%
39% - 20%	0%
19% - 0%	0%

Fuente: Elaboración Propia.



FOTOGRAFÍA 4-1. Arrancamiento de Goma en Banda de Rodamiento.

#### 4.2.2 Corte Pasante en la Banda de Rodamiento (B).

Esta causa que representa el 22% de las bajas, es la segunda más incidente y al igual que el caso anterior, podemos visualizar que el uso de la goma disponible del neumático está por debajo de lo que se puede esperar, y es así como el 55% de las bajas por corte en la banda de rodadura están dados para neumáticos que aún les queda un 38% de goma remanente. Esta situación es inaceptable, y se debe lograr determinar cuáles son las causas tanto operativas, como de mantenimiento que están incidiendo en estas cifras.

TABLA 4-3. % de Goma Remanente en los Neumáticos.

Goma Usada (%)	Goma Remanente (%)
100% - 80%	8%
79% - 60%	55%
59% - 40%	28%
39% - 20%	7%
19% - 0%	2%

Fuente: Elaboración Propia.



FOTOGRAFÍA 4-2. Corte Pasante en Banda de Rodamiento.

#### 4.2.3 Desgaste Acelerado por Deslizamiento (C).

En orden de importancia corresponde a la tercera causa de baja de neumáticos, y representa el 12.4% del total. Se puede agregar también como aspecto destacado

que más de la mitad de las bajas por desgaste acelerado por deslizamiento, es decir, el 57% de las causas de bajas, están dadas por neumáticos en los cuales se utilizó a lo menos un 78% de la goma disponible del neumático.

Estima que, entre otras causas, existe una incidencia operacional para que esto ocurra.

**TABLA 4-4.** % de Goma Remanente en los Neumáticos.

Goma Usada (%)	Goma Remanente (%)
100% - 80%	43%
79% - 60%	57%
59% - 40%	0%
39% - 20%	0%
19% - 0%	0%

Fuente: Elaboración Propia.



**FOTOGRAFÍA 4-3.** Desgaste Acelerado en Banda de Rodamiento.

### 4.3 Análisis e Interpretación de Datos.

#### 4.3.1 Análisis de la Vida Útil de los Neumáticos.

Con los datos proporcionados por el área de mantenimiento mina, se realizó un gráfico en el cual se muestra el resumen de horas por mes en los años 2016 y 2017.

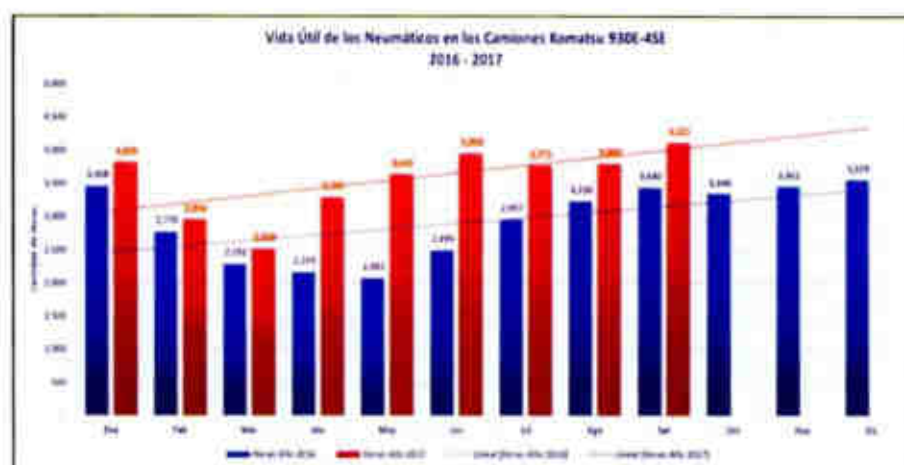


FIGURA 4-9. Promedio de Vida Útil de los Neumáticos.

Fuente: Minera Las Bambas.

#### 4.3.2 Diseño de una Mezcla para la Carpeta de Rodadura.

Luego de extensas pruebas usando el software de Diseño de mezclas RBTK Versión 1.08, se determinó que se podría combinar un material superficial de alto desempeño para la capa de rodaje usando Arena naranja para mejorar el PSD de la mezcla en el extremo inferior y arcilla marrón para brindar la necesaria Plasticidad.

La mezcla consiste de un 70% de roca triturada, 15% de arena naranja y 15% de arcilla marrón.

La Figura 4-10 muestra las trazas PSD de cada componente individual del material, roca triturada por el contratista (Granulometría A), arcilla marrón (Granulometría B) y arena naranja (Granulometría C). Los límites máximos y

mínimos de la granulometría especificada muestran que el PSD de la mezcla final de diseño (en rojo) se ubica cómodamente dentro de estos límites.

Es útil comparar este resultado con el gráfico del PSD del material del contratista que aparece en la Figura 3-32.

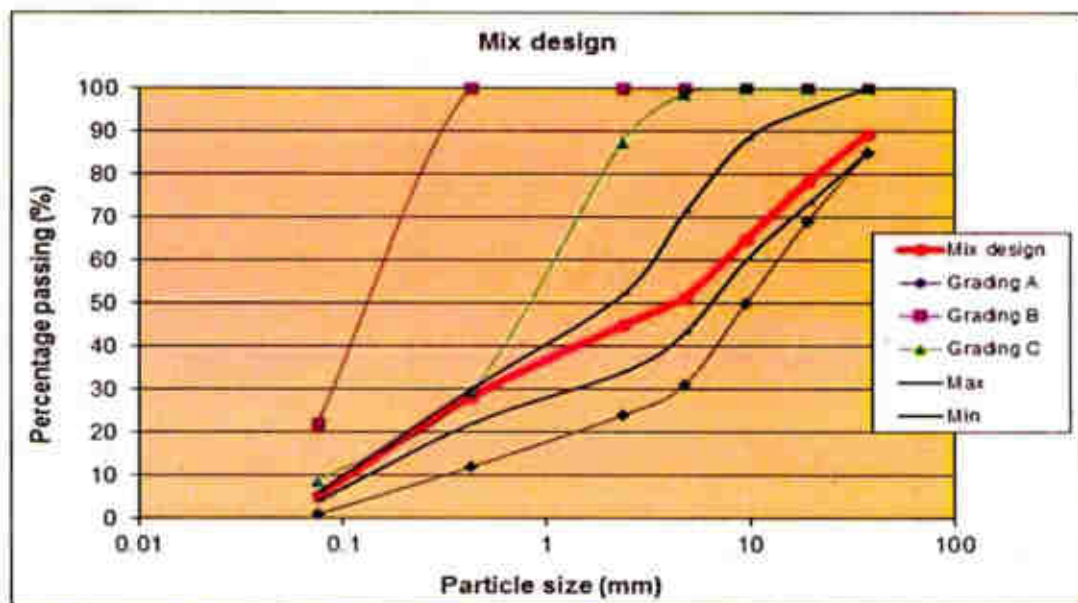


FIGURA 4-10. Tabla de PSD de Cada Material Constitutivo Individual y PSD de la Mezcla Lograda.

Fuente: Giummarra et al, 2009a, 2009b

El resultado del GC vs. SP para esta mezcla que aparece en la Figura 4-11 fue presentada por el RBTK en la plantilla correspondiente a los caminos de ripio locales. Luego se graficaron los resultados del GC vs. SP en una plantilla adecuada para caminos de acarreo minero en la Figura 4-12.



FIGURA 4-11. Ubicación del GC y SP de la Mezcla Combinada de Diseño.  
Fuente: Giunmarra et al, 2009a, 2009b.

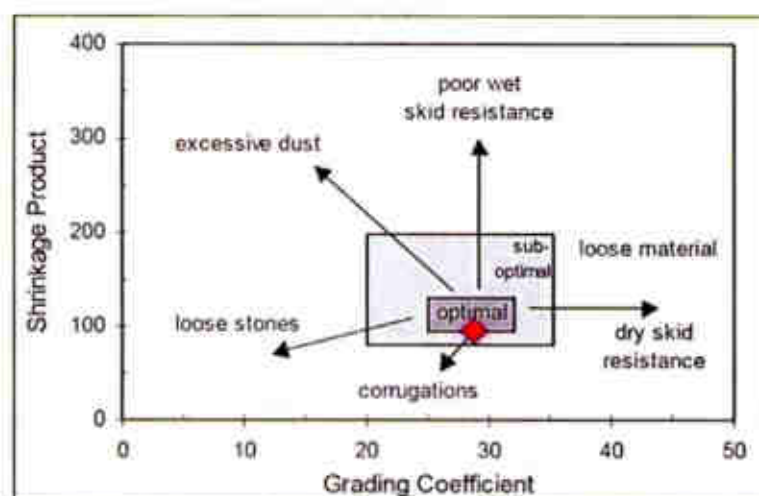


FIGURA 4-12. Ubicación del GC y SP de la Mezcla Combinada de Diseño.  
Fuente: RJ Thompson (2015)

En cuanto a la Figura 4-11, se observa que la roca triturada mezclada basada en un 70% de la muestra intermedia del contratista, 15% de arena naranja y 15% de arcilla marrón ha sido modelada para resultar en un material superficial para la capa de rodaje que se ubica justo en el borde inferior de lo ideal para el desempeño en un

camino de acarreo minero. Por lo tanto, se considera que esta solución de mezcla combinada de diseño es muy satisfactoria.

#### 4.3.3 Costos de Construcción de la Carpeta de Rodadura.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el diseño estructural de las vías, se determinó colocar una carpeta de rodadura en todos los tramos de la mina, los cuales son definidos en la Tabla 4-5.

TABLA 4-5. Distancias de los Tramos en el Tajo Ferrobamba.

Tramos	Distancia Lineal [m]	Categoría de Vía	Descripción
Tramo 0	653	1er Orden	Sección en plataforma de Chancadora Primaria
Tramo 1	2,559	1er Orden	De chancadora Primaria a TSF
Tramo 2	869	1er Orden	Del Puente entrada a mina a la plataforma de Chancadora primaria
Tramo 3	2,199	2do Orden	De plataforma de chancadora a Cantera 1
Tramo 4	1,961	2do Orden	De Cantera 1 a Alto Jahuapalla
Tramo 5	2,102	2do Orden	Rampa de Comerccacca a Ingreso al Botadero
TB9	4,396	1er Orden	Ingreso al Botadero Ferrobamba
Tramo 7	1,011	1er Orden	Nuevo acceso a Jahuapalla alta
Tramo 8	376	1er Orden	Rampa de Acceso al Botadero TB
Tramo R1	1,637	2do Orden	Rampa a Comerccacca
Tramo R2	793	3er Orden	Acceso a Jahuapalla Bajo
Tramo R3	376	3er Orden	Acceso a Jahuapalla medio
<b>Total</b>	<b>18,932</b>		

Fuente: Elaboración Propia.

Así mismo, para el cálculo de los costos de la construcción de la misma se obtuvieron los siguientes datos:

- ❖ Longitud total de las vías = 18,932.00 m
- ❖ Ancho de vía promedio = 30 m
- ❖ Ancho de la carpeta de rodadura = 0.5 m
- ❖ Costo de material para carpeta = 8.0 \$/m<sup>3</sup>
- ❖ % material chancado = 70 %
- ❖ % arena = 15 %
- ❖ % arcilla = 15 %

Con los datos obtenidos, se realizó los cálculos de los costos respectivos:

- ❖ Total, de material requerido para la carpeta de rodadura: **283,980.00 m<sup>3</sup>**
- ❖ Costo total del material requerido para la carpeta de rodadura: **2,271,840.00 \$ (USD)**.
- ❖ Cantidad total de material chancado para la carpeta de rodadura: 198,786.00 m<sup>3</sup>.
- ❖ Cantidad total de arena para la carpeta de rodadura: 42,597.00 m<sup>3</sup>.
- ❖ Cantidad total de arcilla para la carpeta de rodadura: 42,597.00 m<sup>3</sup>.
- ❖ Costo total de material chancado: **1,590,288.00 \$ (USD)**.
- ❖ Costo total de arena: **255,582.00 \$ (USD)**.
- ❖ Costo total de arcilla: **255,582.00 \$ (USD)**.
- ❖ Costo total de la mezcla y colocación: **1,703,880.00 \$ (USD)**.

El Costo Total para la construcción de la carpeta de rodadura en Las Bambas es de: **3,805,332.00 \$ (USD)**.

## CAPÍTULO V

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 5.1 Implementación del Diseño Integrado de Vías en Las Bambas.

##### 5.1.1 Velocidades.

Con respecto a las velocidades, el diseño de los caminos de transporte en Las Bambas debe prever un límite máximo de velocidad de 60km / h.

##### 5.1.2 Ancho de Vía.

La Tabla 5-1 proporciona detalles sobre los anchos estándar de las vías. Debe tener en cuenta que el ancho de la vía es la distancia horizontal entre los extremos del espesor de la vía de diseño, es decir, la vía que está achafanado no está incluida en el ancho de la vía de diseño ni tampoco las cunetas o bermas.

TABLA 5-1. Anchos Estándar de las Vías de Acarreo.

Elemento	Ancho de vías			
	Típico	Dentro de 75m de cualquier intersección	Dentro de 75m de la entrada a una carretera de escape	Para la longitud de una berma central / berma de retención central
Ancho de la vía de doble calzada HV fuera del tajo	30m	39m	39m	30m / 39m
Ancho de la vía de doble calzada HV dentro del tajo	29m	39m	NA	29m / NA
HV ancho de la vía de una sola calzada (todas las áreas)	15m	17m	17m	N/A
Ancho de la vía de doble calzada LV	10m	10m	10m	10m
LV ancho de la vía de una sola calzada	6m	6m	6m	6m

Fuente: Minera Las Bambas.

### 5.1.3 Grados Longitudinales.

Cuando se adopta un grado vertical se debe tener cuidado de mantener las calidades tan consistentes como sea posible ya que cada grado de variación da como resultado que la unidad de acarreo se mueva dentro de sus curvas de retardo y esto a su vez hace que el transporte sea menos económico. A medida que el camión se mueve dentro de las curvas de tracción y de retardo, es probable que exista tensión excesiva tanto en el tren de la unidad de camiones como en la superficie de la carretera.

TABLA 5-2. Grados Estándar de las Vías de Acarreo.

Elemento	Grados longitudinales				
	Mínimo	Maximum Standard	Máxima Superior	A menos de 100 metros del punto de salida de una intersección	Dentro de 30 m de una rampa dedo del pie o cresta
Ancho de la vía de doble calzada HV	0.3%	10.0%	12.5%	3% máximo	3% máximo
Ancho de la vía de una sola calzada HV	0.3%	10.0%	12.5%	3% máximo	3% máximo

Fuente: Minera Las Bambas.

#### 5.1.4 Distancia de Visibilidad y Distancia de Frenado.

La distancia de visibilidad siempre será mayor que la distancia requerida para detener el vehículo de diseño antes de interceptar un peligro.

El diseño debe considerar la distancia de visibilidad en términos de curvas horizontales y verticales.

El diseño debe evaluar las unidades HV y LV.

La distancia mínima de parada en Las Bambas será de 100 m.

La fórmula para determinar la distancia de parada se da como;

$$SD = \frac{V_o t_{p-r}}{3.6} + \left\{ \frac{V_o^2}{254(U_{min} - 0.01GR)} \right\}$$

$SD$  = Distancia mínima de parada (m)

$t_{p-r}$  = La reacción combinada del conductor y el (los) tiempo (s) de activación del freno

$GR$  = Grado longitudinal en%, -va actualización, + ve degradación

$V_o^2$  = Velocidad inicial del vehículo (km / h)

$U_{min}$  = Coeficiente de desaceleración longitudinal (fricción disponible)

Los parámetros estándar utilizados en la ecuación anterior son:

TABLA 5-3. Parámetros Estándar para Calcular la Distancia Mínima de Parada.

DISTANCIA DE FRENADO	HV	LV
Tiempo (s) de reacción del conductor	2.5	2.5
Tiempo (s) de reacción del freno	1	0
Tiempo (s) de reacción total	3.5	2.5
Velocidad de diseño (km / h)	60	60
Factor de fricción longitudinal	0.3	0.27

Fuente: Minera Las Bambas.

### 5.1.5 Curvas Verticales.

Las curvas verticales se diseñarán de manera que tanto los conductores de HV como de VL puedan conducir en la vía de manera cómoda y disponer de tiempo suficiente para percibir los peligros en la vía y tomar las medidas correctivas adecuadas.

Todas las curvas verticales deben ser verificadas para asegurar que la distancia de observación excede la distancia de parada del vehículo. Al comprobar o diseñar la curva vertical, la altura de obstrucción se tomará como 0,2 m mientras que la altura de los ojos para camiones y LV será de 4,5 m y 1,5 m, respectivamente.

En general, las curvas verticales de 1.500 m de radio y 150 m de longitud son un buen punto de partida para el diseño.

Las fórmulas estándar de geometría de vías son suficientes para confirmar las distancias de avistamiento en las vías de transporte. La primera fórmula se utiliza cuando la distancia de detención es mayor que la longitud de la curva vertical, es como sigue;

$$L = 2SD - \left( \frac{200 (\sqrt{h_1} + \sqrt{H_2})^2}{\Delta G} \right)$$



En los casos en que la distancia de frenado es menor que la longitud de la curva, se aplica la fórmula siguiente:

$$L = \left( \frac{\Delta G \cdot SD^2}{100 (\sqrt{h_1} + \sqrt{H_2})^2} \right)$$

**Dónde:**

$L$  = Distancia de la vista

$SD$  = Distancia mínima de parada (m)

$\Delta G$  = Cambio aritmético en grado

#### 5.1.6 Curvas Horizontales.

Las curvas horizontales deben ser;

- Diseñado con el mayor radio posible.
- La curva horizontal mínima en Las Bambas será de 13 m cuando se mida en el borde del pavimento.
- Se deben evitar las curvas compuestas, es decir, donde los cambios de radio dentro de la curva deben ser evitados, pero si es absolutamente necesario, el cambio máximo no debe ser mayor del 20%.
- La separación mínima entre las curvas horizontales debe ser una distancia igual en metros a la velocidad numérica de diseño de la vía multiplicada por un factor de 0,6, es decir, si el límite de velocidad es de 60 km / h, entonces la longitud de la tangente será de 36 m como mínimo.
- Las curvas horizontales deben ser verificadas para asegurar que el operador del vehículo pueda observar los peligros en el camino a tiempo para tomar medidas correctivas. Típicamente la preocupación está alrededor de las caras cortadas adyacentes al lado izquierdo del pavimento que oscurece peligros. Se utilizará la

siguiente fórmula para comprobar el revestimiento requerido del borde del pavimento;

$$LB = R \left( 1 - \cos \left( \frac{28.65SD}{R} \right) \right)$$

**Dónde:**

LB = Tumbarse (m)

SD = Distancia mínima de parada (m)

R = Radio de la curva horizontal medido en el ojo del conductor

### 5.1.7 Cruce y Super-elevación.

En la Tabla 5-4 se ofrecen detalles sobre el cruce estándar y la super-elevación.

TABLA 5-4. Desviaciones Estándar y Elevación Superior.

Super-elevación y Cruce				
Radio de Curva Horizontal (m)		Velocidad del vehículo (km / h)		
		20	40	60
25	Superelevación	3%		
50	Superelevación	3%		
75	Superelevación	4%		
100	Superelevación	4%	5%	
200	Superelevación	3%	5%	
400	Superelevación	3%	4%	5%
>500	cruce	3%	3%	3%
Tangente con grado vertical inferior al 10%		cruce	3%	3%
Tangente con grado vertical de 10% o más		cruce	2%	2%

Fuente: Minera Las Bambas.

### 5.1.8 Bermas.

La Tabla 5-5 proporciona detalles sobre bermas estándar. Hay tres (3) configuraciones de berma estándar usadas en Las Bambas;

- Bermas estándar de contención
- Bermas de separación del tráfico en el centro de la vía
- Bermas de separación de tráfico de baja altura

TABLA 5-5. Dimensiones Estándar de la Berma.

Tipo de Berma	Dimensión				
	A	B	C	D	E
	Ángulo de la cara frontal	Ángulo de la cara trasera	Ancho de la huella	Altura	Ancho de cima
Bermas estándar de contención - Tajo exterior	37.5 Grado	37.5 Grado	9m	3m	1m
Bermas estándar de contención - Tajo interior	37.5 Grado	37.5 Grado	8.4m	3m	0.6m
Bermas de separación de tráfico en la mitad de la vía	40.0 Grado	40.0 Grado	8.2m	3m	1m
Bermas de separación de tráfico de baja altura	40.0 Grado	40.0 Grado	3m	1m	1m

Fuente: Minera Las Bambas.

### 5.1.9 Diseño del Pavimento.

El diseño del pavimento en Las Bambas, tienen los siguientes parámetros;

1. 1.5 m a 2 m de roca mezclada como base.
2. 500 mm de capa de rodadura.
3. La capa de rodadura se instalará en el 98% del Tajo Ferrobamba (rampas principales de acarreo).

TABLA 5-6. Parámetros Geo-material del Pavimento.

Parámetro	Resultados
CBR a los 4 días de remojo al 98% modificado	Min 80% en cada prueba
Producto de encogimiento LS x P424 $\mu$ m	Min 100, máximo 140 en cada prueba
Coefficiente de clasificación (P265 $\mu$ m -P2 $\mu$ m) x P475 $\mu$ m / 100	Min 23, máximo 32 en cada prueba
Contracción Lineal (LS)	Min 4.0, máximo 4.8 en cada prueba
Índice de plasticidad (PI)%	Min 8, máximo 10 en cada prueba
Límite de plástico (PL) (%)	Min 12, máximo 17 en cada prueba
Límite líquido (%)	Min 17, máximo 24 en cada prueba
Proporción de polvo (P075 / P425)	Min 0.4, máximo 0.6 en cada prueba
Tamaño máximo de partícula (mm)	40 en cada prueba

Fuente: Minera Las Bambas.

#### 5.1.9.1 Diseño Recomendado para la Capa de Rodadura.

Para el diseño tenemos que tener en cuenta 3 capas principales que debemos de construir para asegurar que las vías ofrezcan buena resistencia estructural.

- A) **Capa de Rodadura.** - Es el pavimento que tiene por función proteger a las capas inferiores de las inclemencias del tiempo y proporcionar una transitabilidad suave a los vehículos de acarreo. Granular homogéneo 2.5" monzonita.
- B) **Capa de Base.** - Es el principal contribuyente estructural del pavimento. Es del tipo granular, con características definidas, de las cuales la más importante es un CBR mayor del 80% para el 95% de compactación. Granular de 20 cm a 40 cm. Monzonita.
- C) **Capa de Sub-base.** - Es la capa granular ubicada entre el Suelo de Sub-rasante y la Base. Tiene por función principal proteger a la Base y contribuir en la transferencia de cargas hacia el Suelo de Sub-rasante. Para ello debe tener características drenantes, anticontaminantes y/o resistentes. Normalmente, no se usa Sub-base, cuando el Suelo de Sub-rasante es granular. Debe tener

características definidas con un CBR mayor de 40%, Granular de 50 a 75 cm, Monzonita.

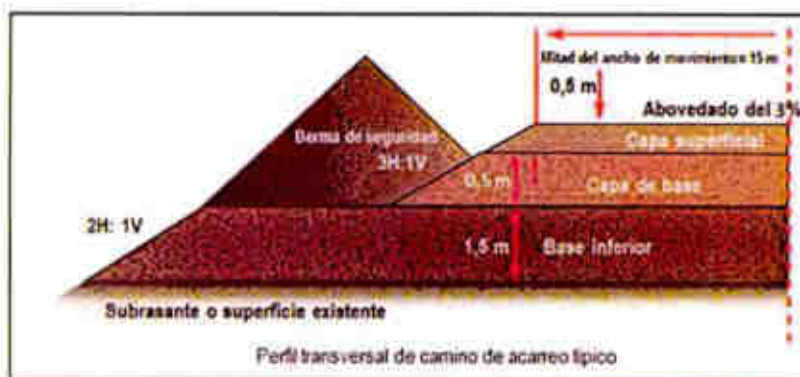


FIGURA 5-1. Capas Básicas Planteadas para el Diseño de las Vías en Las Bambas.  
Fuente: Minera Las Bambas.

Bien ahora que conocemos estos conceptos básicos procedemos al diseño estructural de las vías para las vías de las bambas, el peso máximo de un neumático cargado es de  $84.91 \text{ Tm} \approx 85 \text{ Tm}$  y tomando en cuenta el criterio CBR obtenemos el siguiente diseño.

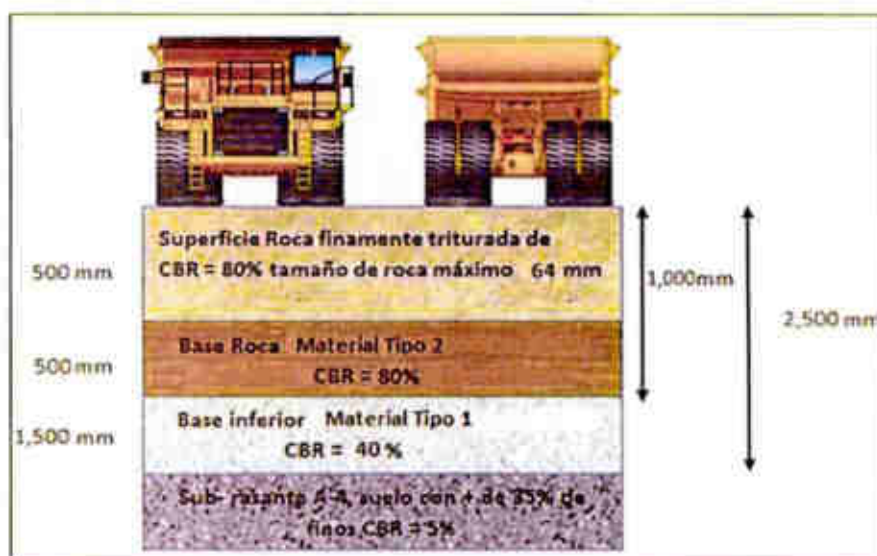


FIGURA 5-2. Profundidades de las Capas para la Carpetita de Rodadura.  
Fuente: Minera Las Bambas.

## 5.2 Incremento de la Vida Útil de los Neumáticos.

### 5.2.1 Diagrama Causa – Efecto de la Vida Útil del Neumático.

Para atacar el problema y dar una solución adecuada a la misma, se realizó el análisis de las causas de la baja utilidad de los neumáticos en cuanto a su vida útil realizando un diagrama de Causa – Efecto (Diagrama de Ishikawa), el cual nos permitió ver el problema desde un enfoque más específico, ver Figura 5-3.

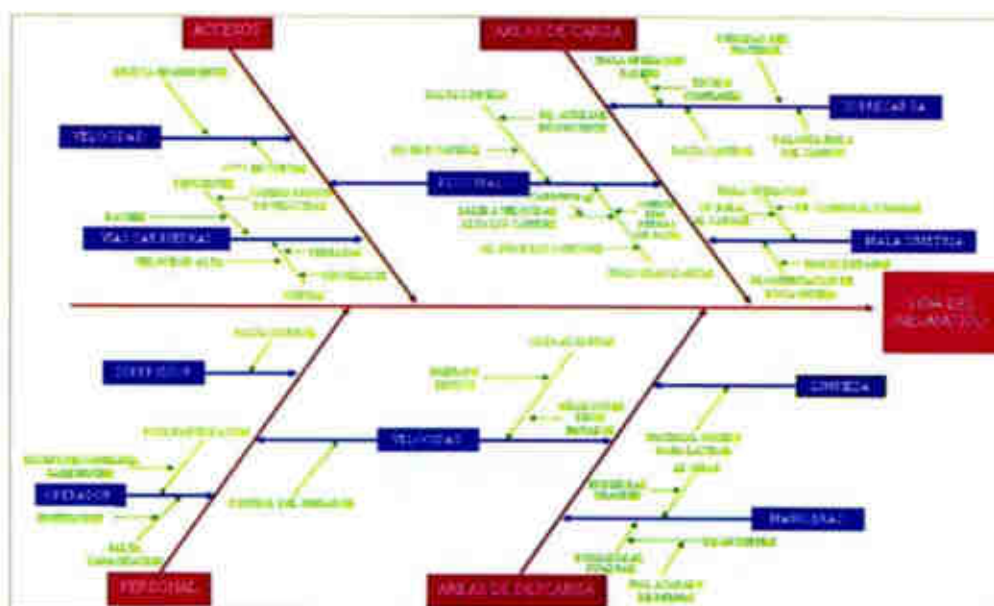


FIGURA 5-3. Diagrama de Pescado Causa-Efecto.  
Fuente: Minera Las Bambas.

Así mismo, se realizó los planes de acción para atacar las causas y mejorar la utilización de los neumáticos con el objetivo de incrementar su vida útil, ver Tabla 5-7.

TABLA 5-7. Planes de Acción para Incrementar la Vida Útil de los Neumáticos.

Mejoramiento para Incrementar la Vida Útil de los Neumáticos			
Áreas de Carga	Áreas de Descarga	Accesos	Personal
Mejor operación al cargar el camión, mejor distribución de carga y menos sobrecarga.	Mejoramiento de la velocidad alta al llegar a los botaderos.	Menor velocidades altas en curvas y pendientes.	Mejor comunicación si necesita limpieza alguna zona de trabajo.
Mejor operación al cuadrar el camión, manteniendo la huella y evitando pisar piedras al pie de los taludes.	Menor frenado brusco al llegar a los botaderos.	Matan correctamente la velocidad en rampa.	Mayor reporte del estado de sus llantas.
Mejor limpieza de frentes de carga con el equipo auxiliar y mayor comunicación de los operadores para que se realice.	Mejor maniobras al descargar, evitando chocar con las llantas traseras del camión las bermas.	Evitar hacer caer piedras en rampas.	
	Mejor limpieza y lastrado de material en los botaderos.	Mejores accesos, (rampas, curvas, etc.).	

Fuente: Minera Las Bambas.

### 5.2.2 Distribución de Cargas en los Camiones Komatsu 930E-4SE.

De acuerdo a la política de cargas de Komatsu, se tienen los siguientes criterios, para el control de los mismos:

- La media (promedio) de la distribución de la carga útil no debe superar la carga útil objetivo.
- No más del 10% de las cargas útiles pueden superar 1,1 veces la carga útil objetivo del camión.
- Una carga útil nunca debe superar 1,2 veces la carga útil objetivo.
- No más del 10% de las cargas más de 1,1.
- Ninguna carga más de 1,2.
- La carga útil promedio no debe superar el objetivo

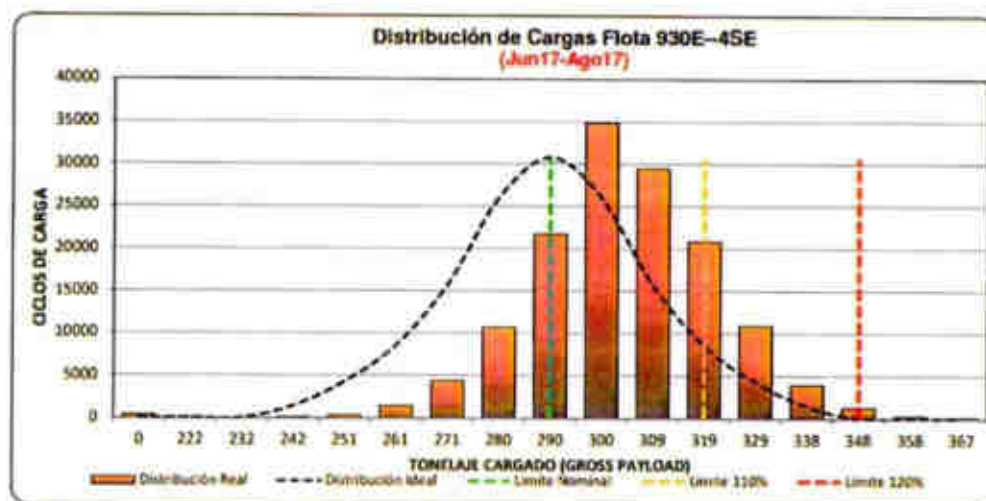


FIGURA 5-4. Distribución de cargas en la flota de camiones komatsu.  
Fuente: Minera Las Bambas.

POLÍTICA DE CARGA KOMATSU	90%	10%	0%
	<219TM	(219TM a 348TM)	≥348TM
N° CARGAS	110855	25208	700
% CARGAS	81.85%	17.86%	0.49%

Solo el 10% de las cargas puede estar entre el 110% al 120% de la carga nominal

Ninguna carga debe sobrepasar el 120% de la carga nominal

### 5.2.3 Rendimiento de los Neumáticos – Flota Komatsu 930E-4SE.

Realizando los cálculos con respecto al rendimiento de los neumáticos en los años 2016 y 2017, podemos ver una diferencia significativa en la vida útil de los mismos, el cual es gracias a los trabajos realizados en las vías de acarreo (se mejoraron la geometría de las vías), el cumplimiento del mantenimiento programado de las vías, la construcción de la carpeta de rodadura en toda las rampas principales, la limpieza de los pisos en los frentes de carguío, nivelación de las plataformas de descarga en los botaderos y se concientizó a todos los operadores de estos equipos sobre el cuidado de los neumáticos en las vías. Por parte del área de mantenimiento mina, se realizó las inspecciones periódicas de los neumáticos y se

viene implementando sistemas automatizados que detecten las temperaturas, la sobrecarga y las velocidades en los camiones.



FIGURA 5-5. Tasa de desgaste de los neumáticos (2016 – 2017).

Fuente: Minera Las Bambas.

En la Figura 5-5, se puede observar las diferencias que existen en cuanto a la tasa de desgaste de los neumáticos en los años 2016 y 2017, se observa que el promedio de desgaste en el año 2016 es de 53.8 mm/hr y en el año 2017 la tasa de desgaste es de 40 mm/hr, el cual representa una eficiencia de 26%, lo cual es bueno, ya que esto significa el incremento de la vida útil de los neumáticos.

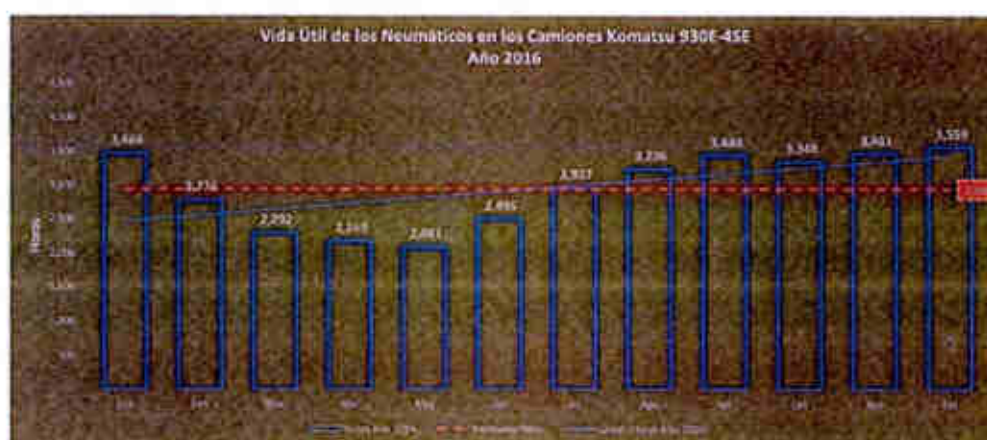


FIGURA 5-6. Rendimiento de los Neumáticos en el Año 2016.

Fuente: Elaboración Propia.



**FIGURA 5-7.** Rendimiento de los Neumáticos en el Año 2017.

Fuente: Elaboración Propia.

De los gráficos anteriores se puede observar que el promedio de vida útil de los neumáticos en el año 2016 fue de 2,940 Hrs/Mes. y en el año 2017 fue de 3,543 Hrs/Mes, el cual representa un incremento del 20% (603 hrs). Este resultado es satisfactorio ya que aún se vienen realizando mejoras en cuanto a las vías de acarreo, mantenimiento de los neumáticos, control de las velocidades y cargas de material en los camiones.

#### 5.2.4 Costos de Neumáticos.

El costo de un neumático nuevo es de 40,000.00 \$ (USD), el cual representa la tercera parte de los costos totales de acarreo en una operación de tajo abierto.

En el año 2016 se tuvieron pérdidas que ascendieron los 530,868.00 \$/Mes en los costos de los neumáticos por retiro de estas antes de haber cumplido su vida útil, de la misma manera, en el año 2017 hasta el mes de Setiembre las pérdidas obtenidas por mes fueron de 390,198.00 \$/Mes, el cual representa una diferencia de 138,025.62 \$/Mes (26%) con respecto al año 2016.

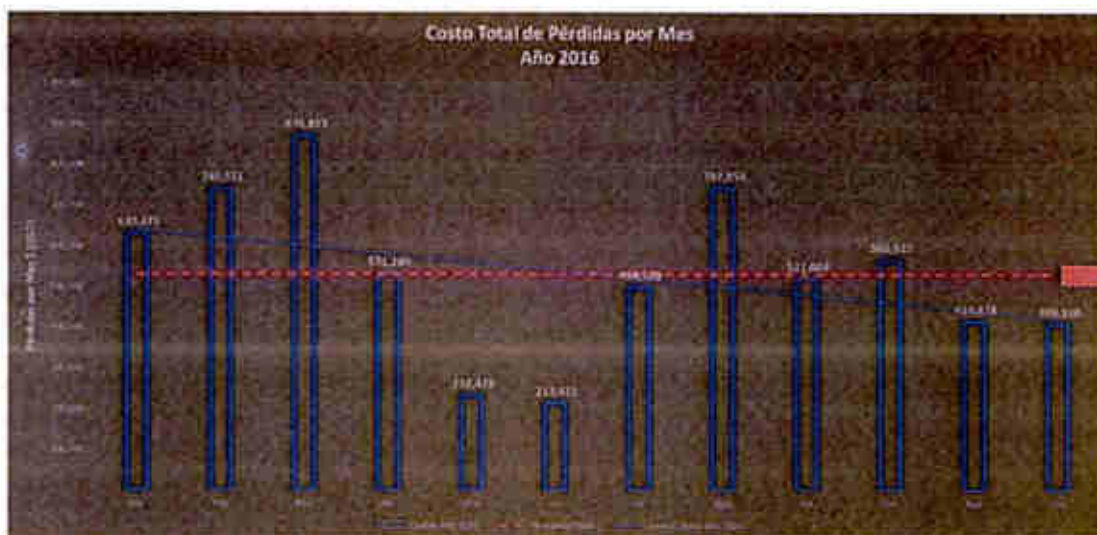


FIGURA 5-8. Pérdidas por Desecho de Neumáticos en el Año 2016.  
Fuente: Elaboración Propia.



FIGURA 5-9. Pérdidas por Desecho de Neumáticos en el Año 2017.  
Fuente: Elaboración Propia.

Viendo estos resultados, se hace los cálculos óptimos de los mismos considerando los siguientes parámetros:

- Cantidad de cocada en los neumáticos: 110 mm.
- Vida útil de los neumáticos: 3,800 hrs.
- Retiro de neumático que cumplió su ciclo de vida: 18 %

Con los datos anteriores, realizaremos los cálculos respectivos:

- Total, de cocada utilizada para cumplir su vida útil: **90 mm.**
- Cantidad de horas/mm de desgaste: **34.5 hrs/mm.**

En consecuencia, en el año 2017 se realizó un ahorro significativo de **1,468,624 S (USD)** considerando los cálculos de Enero a Setiembre en ambos años.

### 5.3 Incremento de la Productividad.

#### 5.3.1 Análisis del Ciclo de Acarreo en la Flota de Camiones Komatsu.

Con la información brindada por el sistema Dispatch, se determinó los ciclos de acarreo de los camiones con respecto a las distancias recorridas.

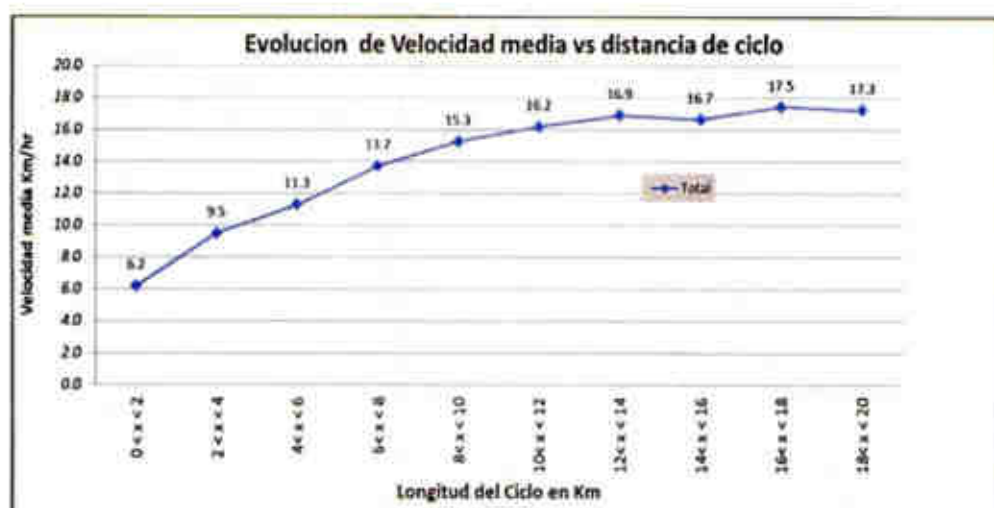


FIGURA 5-10. Evolución de la Velocidad Media vs Distancia del Ciclo.

Fuente: Minera Las Bambas.

De la Figura 5-10 se puede deducir lo siguiente:

1. A mayor número de ciclos por hora, mayor cantidad de maniobras, pero más producción.
2. Mientras el ciclo es más largo en longitud, el número de maniobras disminuye.



FIGURA 5-11. Ciclos por Hora vs Distancia Total del Ciclo.  
Fuente: Minera Las Bambas.

De la Figura 5-11 se puede deducir lo siguiente:

1. Cuando los ciclos son cortos, en cada hora se transportan más toneladas.
2. El valor de tonelada hora es inversamente proporcional a la distancia.
3. Promedio de toneladas/hora es de 613.

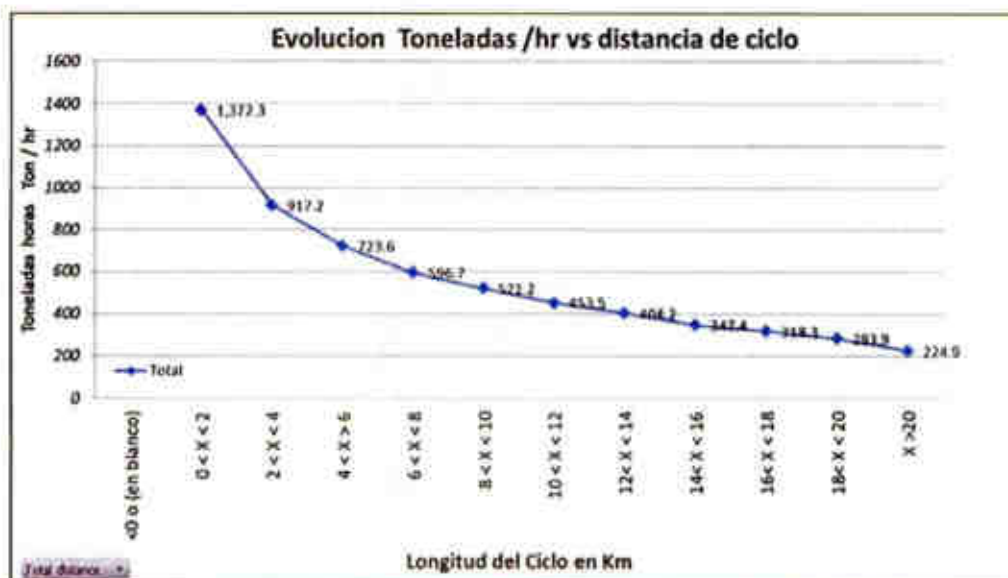


FIGURA 5-12. Evolución del Tonelaje Transportado por Ciclo.  
Fuente: Minera Las Bambas.

De la Figura 5-12 se puede deducir lo siguiente:

1. Ciclos cortos, altos valores de Ton/Hr, velocidades medias bajas.
2. Ciclos más largos, menores son las Ton/Hr transportadas.



FIGURA 5-13. Evolución del tonelaje vs velocidad media y el ciclo.  
Fuente: Minera Las Bambas.

TABLA 5-8. Ciclos con Respecto a la Distancia Recorrida.

Distancia del Ciclo	Cuenta de Gross Payload métricas	Promedio de Cycles x hr	Tipo de ciclo
0 < x < 2	4.85%	4.6	corto
2 < x < 4	13.01%	3.0	corto
4 < x < 6	15.49%	2.4	corto
6 < x < 8	13.84%	2.0	corto
8 < x < 10	16.18%	1.7	medio
10 < x < 12	15.92%	1.5	largo
12 < x < 14	10.77%	1.3	largo
14 < x < 16	5.39%	1.1	largo
16 < x < 18	3.12%	1.0	largo
18 < x < 20	1.42%	0.9	largo
Total general	100.00%	2.0	

Fuente: Minera Las Bambas.

De la Tabla 5-8 se puede deducir lo siguiente:

1. En ciclos cortos, el promedio de ciclos / hrs es alto, por lo tanto, los neumáticos son más exigidos a nivel de fuerzas de abrasión/desgaste.

- Para un mismo camión, que trabaja en un ciclo corto hará el doble o hasta el triple de maniobras de carga / descarga respecto a que si estuviera trabajando en un ciclo más largo.

Al mantener mejores vías con una buena infraestructura en la carpeta de rodadura los camiones realizan mayores ciclos de viaje, lo cual conlleva a un incremento en la productividad de la mina y por ende aumenta su productividad del camión minero.



FIGURA 5-14. Tonelaje Movid en el Año 2016.

Fuente: Elaboración Propia.



FIGURA 5-15. Tonelaje Movid en el Año 2017.

Fuente: Elaboración Propia.

En las Figuras 5-14 y 5-15 se muestra la diferencia de productividad en los años 2016 y 2017. En el año 2016 la producción promedio por mes fue de **21,498.80 MTon/Mes** y en el año 2017 fue de **24,201.73 MTon/Mes**, la cual representa un incremento del **13%**, el cual es un buen indicativo de que los camiones no tienen dificultades en su normal transitabilidad por las vías, por ende, la producción se incrementará si se mantienen en condiciones óptimas las vías de acarreo.

#### 5.4 Prueba de Hipótesis.

HIPÓTESIS	PRUEBA DE HIPÓTESIS
➤ Si el enfoque de diseño integrado de vías tiene influencia en el desgaste de los neumáticos, entonces podremos incrementar la vida útil de los mismos en todos los camiones Komatsu 930E-4SE de la mina Las Bambas.	➤ Se pudo demostrar que el diseño integrado de vías tiene una influencia directa en el desgaste de los neumáticos y por consiguiente en la vida útil de los mismos en los camiones komatsu 930E-4SE de la mina Las Bambas.
➤ Tener vías en buen estado garantizará el aumento de la vida útil de los neumáticos en los camiones mineros.	➤ Se demostró que hubo un aumento significativo en la vida útil de los neumáticos manteniendo en buenas condiciones las vías mineras.
➤ Tener un buen diseño de vías nos dará como resultado muchos beneficios económicos.	➤ Se demostró que teniendo vías en buen estado contribuyen al menor uso de equipos para su mantenimiento por lo cual se reducen los costos en la utilización de estos equipos.
➤ Una vía bien diseñada, construida y mantenida contribuye en el incremento de la productividad de la mina.	➤ Se comprobó que teniendo una buena infraestructura vial se incrementa la productividad de los camiones mineros y por ende de la mina.
➤ Ningún aumento en la frecuencia de mantenimiento podrá arreglar un camino mal diseñado.	➤ Se comprobó que un diseño de vías bien construido, no necesita de mantenimiento permanente.

#### 5.5 Ventajas Significativas en la Implementación de un Diseño Integrado de Vías.

1. Provee condiciones seguras para conducir y reduce los peligros de tráfico.
2. Reducción en los costos de operación del camión, ciclos más rápidos: mayor productividad y bajos costos por tonelada transportada.

3. Reducción de los costos de mantenimiento de caminos, menos derrames, menor daño por agua debido a su acumulación, reducción de polvo y una vida de servicio más larga.
4. Menos presión en el tren de transmisión, en neumáticos, en chasis y suspensión: una mejor utilización de los activos y vida de los componentes, menor costo del ciclo de vida.
5. Mejora la vida productiva de neumáticos y aros.

## CONCLUSIONES

- Se ha podido demostrar que, si se cuenta con una buena infraestructura vial, que tenga un diseño geométrico, diseño estructural, diseño funcional y diseño de mantenimiento (diseño integrado de vías) construidos de manera eficiente, el rendimiento de los neumáticos aumenta de manera significativa. Ningún aumento en la frecuencia de Mantenimiento podrá arreglar una vía mal diseñada.
- Si un componente es mal diseñado, el resto de los componentes que conforman la vía fallarán lo que ocasionará un pobre desempeño y altos costos de mantenimiento de las vías. Con la implementación del diseño integrado de vías, se evita que haya más neumáticos enviados a desecho por un desgaste prematuro de los mismos. Todo esto si el método de las vías de acarreo se encuentran en condiciones adecuadas y bien mantenidas, por lo que la tasa de desgaste de los neumáticos en el año 2017 disminuyó en un 26% con respecto al año 2016 (año en el que se estuvo implementando el diseño integrado de vías).
- El costo de producción está directamente relacionado con la calidad de las vías por donde transitan los camiones mineros, un pobre desempeño de la vía generará altos costos de producción, vías en buenas condiciones generarán que la producción se incremente por lo tanto los costos de producción serán menores.
- Con la optimización de las vías de acarreo se logra una mayor eficiencia en todos los aspectos, como es el menor tiempo en el acarreo del mineral, mayores ciclos de acarreo por cada camión e incremento de la productividad de la mina. En el análisis realizado el incremento de la productividad en el año 2017 con respecto al año 2016 fue de 13% (2,702.93 MTon/Mes).

- La mejor forma de garantizar el desempeño de una vía minera es diseñar las vías con un enfoque integrado. El año 2016 se inició con la implementación de este diseño integrado de vías, teniéndose mejoras significativas en todos los parámetros de diseño de las vías con resultados óptimos durante el año 2017, donde se comprobó el incremento de la vida útil en los neumáticos de los camiones komatsu 930E-4SE en un 20% obteniendo un promedio de vida útil por mes de 3,543 Hrs.
- Es de suma importancia de la implementación del diseño integrado de vías, como se vio anteriormente, ya que este nos llevara a la excelencia operacional obteniendo mejores resultados de productividad y seguridad en Las Bambas.
- Gracias al incremento del rendimiento en los neumáticos, se puede reducir el presupuesto de neumáticos.



## RECOMENDACIONES

- Durante la ejecución de este trabajo de tesis, se observó que durante los meses de Enero, Febrero y Marzo, los trabajos de mejoramiento de vías se ven afectado por las constantes precipitaciones fluviales, los cuales dañan la estructura vial ya que las lluvias producidas en estos meses son muy intensas y prolongadas. Para lo cual, se recomienda realizar el mejoramiento de las vías con sistemas de drenaje adecuados, además deben mantener el acarreo los meses de Junio a Noviembre por ser meses secos en Las Bambas y así adelantarnos a la época de lluvias y no generar retrasos en la construcción de las mismas.
- El personal de operaciones debe construir apropiadamente las vías de acarreo y mantenerlos en buen estado. Se deben operar los camiones a su límite de capacidad. La administración de la mina debe promover estos procesos y hacer de ellos un reglamento que se cumpla y sólo entonces se logrará el costo más bajo por tonelada.
- Se recomienda incluir en el plan de minado de corto plazo la construcción o mejoramiento de las vías de acarreo, puesto que en la actualidad esta actividad la viene realizando la superintendencia de construcción y drenaje, lo cual tiene limitaciones en cuanto a la disponibilidad de equipos y personal que puedan realizar esta actividad.
- Se recomienda realizar un plan de concientización a todo el personal de operaciones mina (personal local) con respecto al buen cuidado de los neumáticos cuando estos estén operando sus equipos. Puesto que ellos aún no tienen experiencia por ser personal nuevo que se está capacitando para operar dichos equipos.
- Se recomienda premiar al personal responsable que reporta condiciones de mejora en la mina referente a prolongar la vida y no dañar el neumático.
- Se debe realizar trabajo en equipo las diferentes áreas que laboran en la mina.



## BIBLIOGRAFÍA

- 1) AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials. (1982). AASHTO Materials, Part 1, Specifications. Washington, DC., USA.
- 2) Atkinson, T. and Walton, G. (1983) Design and Layout of Haul Roads for Surface Mines. Surface Mining and Quarrying – Institute of Mining and Metallurgy Surface Mining Symposium. Bristol. pp 139-149.
- 3) Ault & Kaufman, (1977), Design of Surface Mine Haulage Roads - A Manual, Information Circular 8758, United States Department of the Interior – Bureau of Mines, Pittsburgh, Pennsylvania.
- 4) Ault and Kaufman, (1977). The design of surface mine haul roads a manual. USDOJ Information circular 8758.
- 5) Collins, J. L. Fytas, K. and Singhal, R. K. (1986). Design, Construction and Maintenance of Surface Mine Haulage Roads. Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Stability in Surface Mining, Calgary, Alberta. Pp 39-49.
- 6) Davey, T. and McLeod, M. (2002). Assessing Haul Road Condition using Application Severity Analysis (ASA) – Version 8, 16 October, Cat Global Mining Asia Pacific.
- 7) Deslandes, J.V. and Dickerson, A.W. (1989). A New Concept for Mine Haul Route Surface Maintenance. Proceedings of the International Symposium on Off Highway Haulage in Surface Mines. Edmonton, Alberta. Pp 247-254.
- 8) Giummarra, G.J. Foley, G. and Cropley, S. (1996). Road Dust Control Techniques. Evaluation of Chemical Dust Suppressants Performance. ARRB Transport Research Special Report 54.

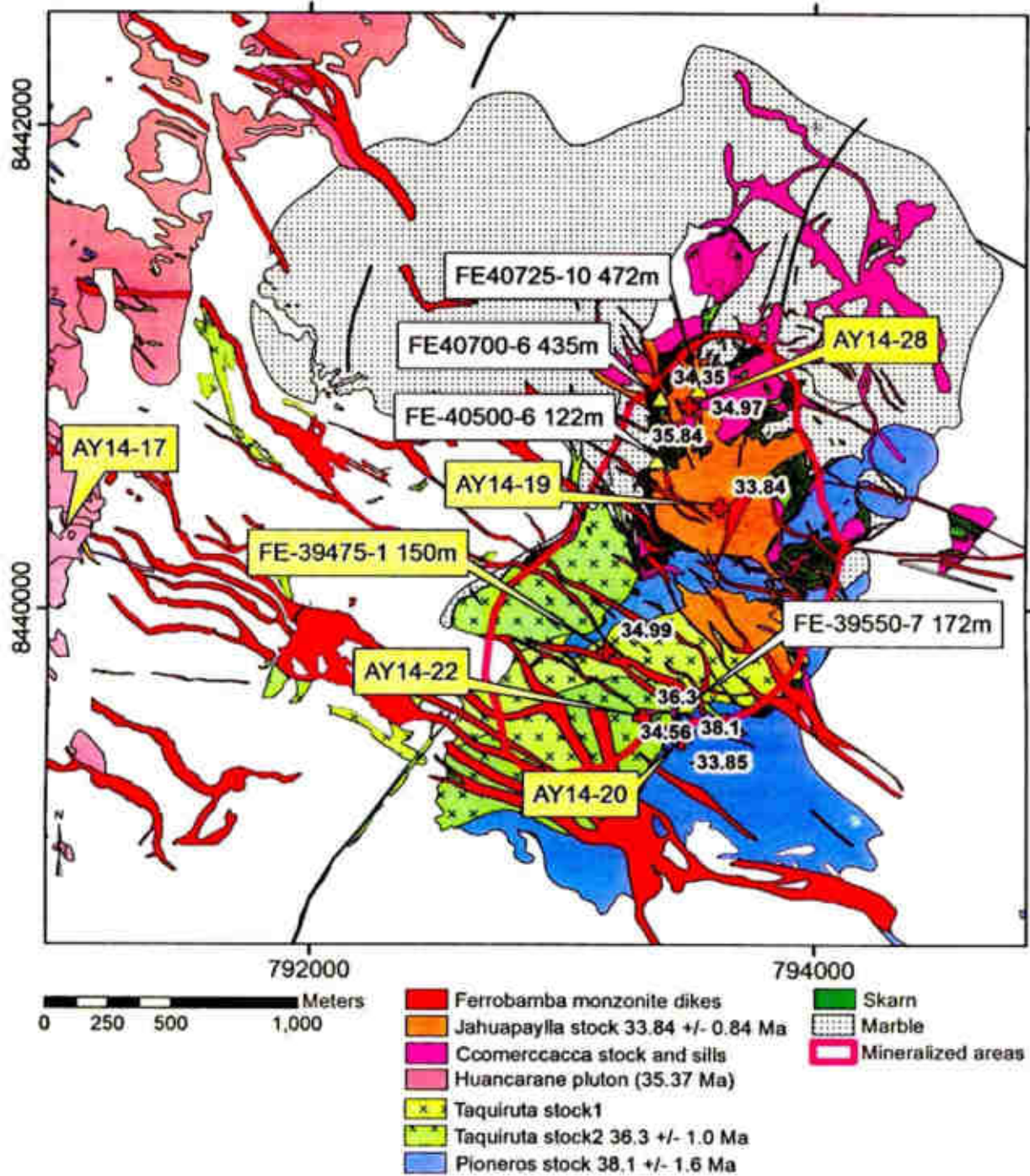
- 9) Kolada, R. J. (1989). The Analysis of Mine Haulage Economics using Direct Rolling Resistance Measurements, Proceedings of the International Symposium on Off Highway Haulage in Surface Mines. Edmonton, Alberta. Pp 239-246.
- 10) Long, G. (1968). Road and property maintenance. Surface Mining, ed. Pfeleider, E. P., Seeley W Mudd Series, American Institution of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc, New York, NY., pp678-682.
- 11) Miller R.E., Thompson R.J. and Lowe N.T. (2004). A GPS-based system for minimizing jolts to heavy equipment operators. Society of Automotive Engineering, SAE Transactions, Journal of Commercial Vehicles, SAE 2004-01-2726, ISBN 0-7680-1641-X, pp850-855.
- 12) República del Perú, Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción. (2000), Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras. Lima, MTC.
- 13) Tannant, D. and Regensburg, B. (2001). Guidelines for mine haul road design. School of Mining and Petroleum Engineering, University of Alberta, Edmonton, Canada.
- 14) Thompson, RJ (2015), Principles of Mine Haul Road Design and Construction, Western Australia.
- 15) Transport and Road Research Laboratory, (1985), Overseas Road Note 2 Maintenance techniques for District Engineers, 2 da edición, Department of Transport, rowthorne Berkshire, Reino Unido.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	POBLACIÓN Y MUESTRA	METODOLOGÍA
<p><b>Problema General:</b></p> <p>¿En qué medida el enfoque de diseño integrado de vías influenció en la vida útil de los neumáticos de los camiones Komatsu 930E-4SE en la mina Las Bambas?</p> <p><b>Problemas Específicos:</b></p> <p>a) ¿Qué relación existe entre el diseño, construcción y mantenimiento de vías mineras con respecto al desgaste de los neumáticos en los camiones Komatsu 930E-4SE?</p> <p>b) ¿Cuáles son los beneficios de tener una mejor infraestructura de vías mineras?</p> <p>c) ¿Cómo un buen diseño, construcción y mantenimiento de vías mineras puede contribuir en la productividad de la mina?</p> <p>d) ¿Cómo la frecuencia del mantenimiento de las vías garantizará el menor desgaste y aumentará la vida útil de los neumáticos, su eficiencia y reducción de los costos de transporte?</p>	<p><b>Objetivo General:</b></p> <p>Determinar la influencia del diseño integrado de vías en la vida útil de los neumáticos en los camiones Komatsu 930E-4SE en la mina Las Bambas.</p> <p><b>Objetivos Específicos:</b></p> <p>a) Evitar el desgaste prematuro de los neumáticos mediante un enfoque de diseño integrado de vías.</p> <p>b) Proveer mejor infraestructura vial para garantizar las operaciones de transporte minero.</p> <p>c) Incrementar la productividad de la mina, con la mayor disposición de vehículos de transporte de minerales.</p> <p>d) Mejorar las condiciones de todas las vías mineras para garantizar la vida útil de los neumáticos, su eficiencia y reducción de los costos de transporte.</p>	<p><b>Hipótesis General:</b></p> <p>Si el enfoque de diseño integrado de vías tiene influencia en el desgaste de los neumáticos, entonces podremos incrementar la vida útil de los mismos en todos los camiones Komatsu 930E-4SE de la mina Las Bambas.</p> <p><b>Hipótesis Específicas:</b></p> <p>a) Tener vías en buen estado garantizarán el aumento de la vida útil de los neumáticos en los camiones mineros.</p> <p>b) Tener un buen diseño de vías nos dará como resultado muchos beneficios económicos.</p> <p>c) Una vía bien diseñada, construida y mantenida contribuye en el incremento de la productividad de la mina.</p> <p>d) Ningún aumento en la frecuencia de mantenimiento podrá arreglar un camino mal diseñada.</p>	<p><b>Independientes:</b></p> <p>Diseño integrado de vías.</p> <p><b>Dependientes:</b></p> <p>Vida útil de neumáticos de camiones mineros en Las Bambas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diseño geométrico.</li> <li>- Diseño estructural.</li> <li>- Diseño funcional.</li> <li>- Diseño de Mantenimiento.</li> <li>- Desgaste de los neumáticos.</li> <li>- TKPH.</li> <li>- Horas de uso.</li> <li>- Costos.</li> <li>- Abolladuras.</li> </ul>	<p><b>Población:</b></p> <p>La población de esta investigación son todos los camiones mineros Komatsu 930E-4SE y las vías de transporte de la mina Las Bambas.</p> <p><b>Muestra:</b></p> <p>Las muestras a las que se les hará el seguimiento son los neumáticos nuevos, se les tomará el tiempo de recorrido total y una toma de cada cada vez que estos sean retirados a Scrap o Reparación.</p>	<p><b>Tipo:</b></p> <p>Investigación aplicada.</p> <p><b>Nivel de Investigación:</b></p> <p>Comparativo.</p> <p><b>Diseño:</b></p> <p>Investigación experimental.</p>

## ANEXOS

ANEXO I: PLANO GENERAL DE MINA

ANEXO III: PLANO GEOLÓGICO DEL TAJO FERROBAMBA

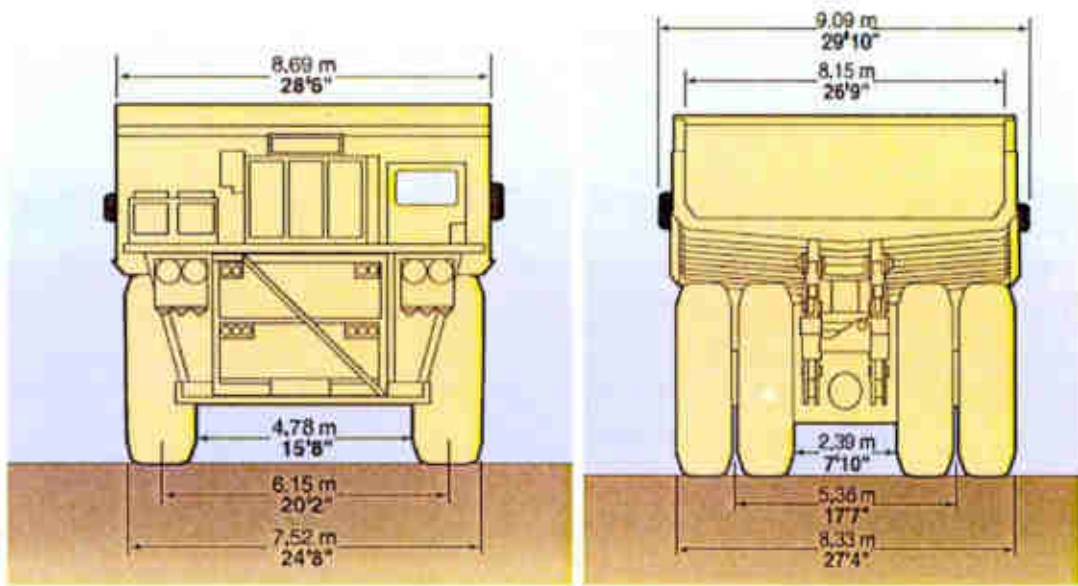
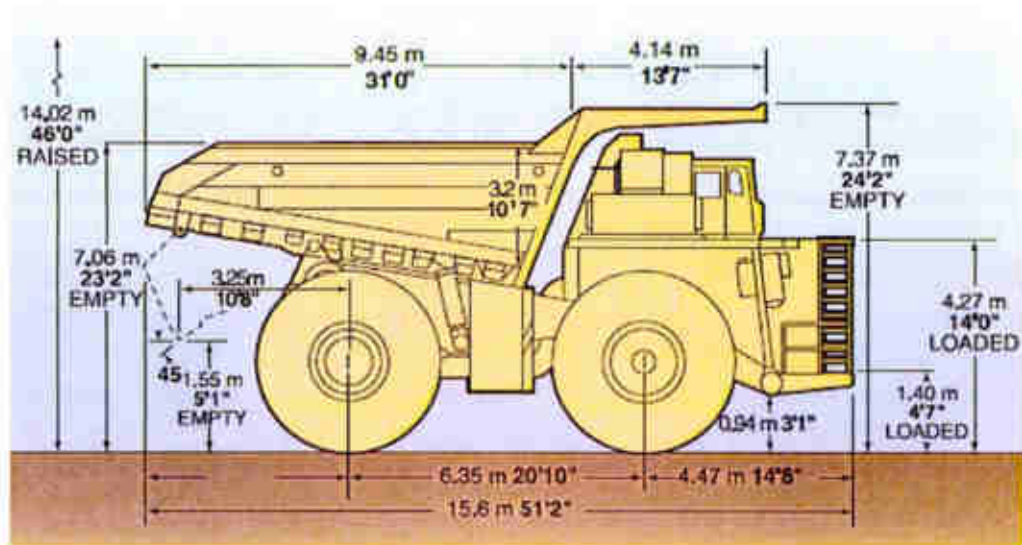


#### ANEXO IV: GLOSARIO DE TÉRMINOS

- a) *Berma*: Acumulación de materiales en el lado exterior de la vía para protección contra desbarranques de los camiones de acarreo.
- b) *Bombea, "lomo de corvina" o corona (Crown)*: Inclinación que nace del eje de la vía hacia los extremos para la evacuación de las aguas de escorrentía.
- c) *Capa de base*: Conocida comúnmente como "Base", es el principal contribuyente estructural del pavimento. Es del tipo granular, con características definidas, de las cuales la más importante es un CBR mayor del 80%.
- d) *Capa de rodadura*: Es la capa más superficial del pavimento que tiene por función proteger a las capas inferiores de las inclemencias del tiempo y proporcionar una transitabilidad suave a los vehículos de acarreo.
- e) *Capa de sub-base o simplemente sub-base*: es la capa granular ubicada entre el Suelo de Sub-rasante y la Base. Tiene por función principal proteger a la Base y contribuir en la transferencia de cargas hacia el Suelo de Sub-rasante. Normalmente, no se usa Sub-base, cuando el Suelo de Sub-rasante es granular. Debe tener características definidas con un CBR mayor de 40%.
- f) *Curva vertical*: Es la transición entre dos alineamientos verticales. Se diseña para evitar el cambio brusco de pendientes, lo cual facilita la marcha continua de los camiones de acarreo, sin disminuir su velocidad.
- g) *Diseño de vías*: Es el conjunto de métodos, guías y procedimientos seguidos para alcanzar los estándares requeridos en una vía. Incluye a: (i) Diseño Geométrico; (ii) Diseño Estructural; (iii) Diseño de Funcional y (iv) Diseño de Mantenimiento.

- h) *Mantenimiento de vías*: Es un conjunto de actividades que tienen por objeto mantener la seguridad y la transitabilidad de las vías en niveles adecuados a la Operación Minera.
- i) *Nivel de sub-rasante o simplemente sub-rasante*: plano paralelo a la Rasante que limita al pavimento por su parte inferior.
- j) *Calzada*: Estructura formada por capas de materiales naturales, aglomerados o tratados por procedimientos físicos y/o químicos, preparada para soportar las cargas del tránsito y las solicitaciones climáticas durante un periodo de tiempo, con un cierto nivel de transitabilidad.
- k) *Pendiente*: Inclinación longitudinal que se da al alineamiento principal de la vía.
- l) *Peralte*: Inclinación que se le da a la curva para vencer la fuerza centrífuga que hace que el vehículo salga por la tangente.
- m) *Super-elevación (súper)*: Inclinación de una de las fajas del acceso o vía hacia el otro extremo, usada generalmente para la evacuación de las aguas de escorrentía.

ANEXO V: ESPECIFICACIONES DEL CAMIÓN MINERO KOMATSU 930E-4SE



ANEXO VI.- CARGA DE TRÁFICO VS. MICRODEFORMACIÓN LIMITANTE (<5 AÑOS DE VIDA OPERATIVA IDEAL).

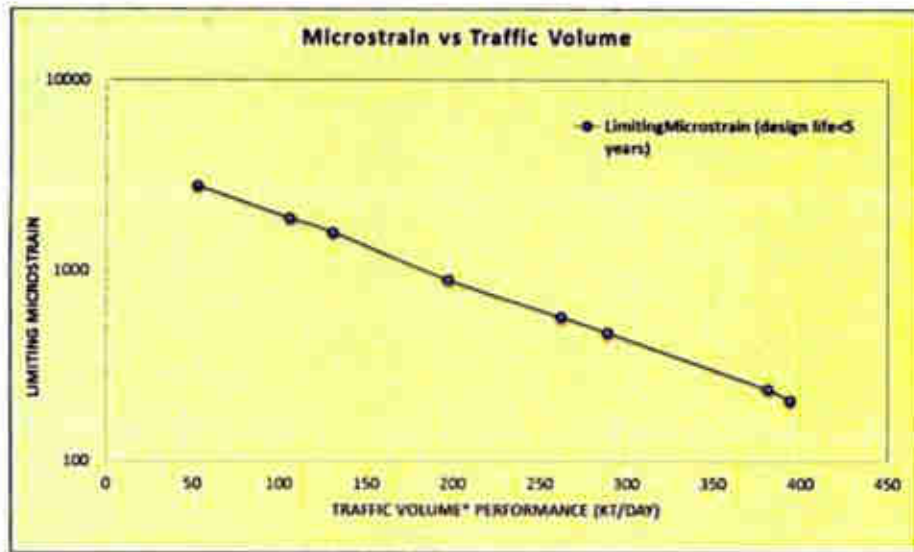


FIGURA 6-1. Microdeformación limitante vs volumen de tráfico.

ANEXO VII.- MICRODEFORMACIÓN LIMITANTE VS. ESPESOR DE CAPA BASE (CAPA DE ASIENTO 100 MPA, VIDA OPERATIVA PREVISTA PARA <5 AÑOS)

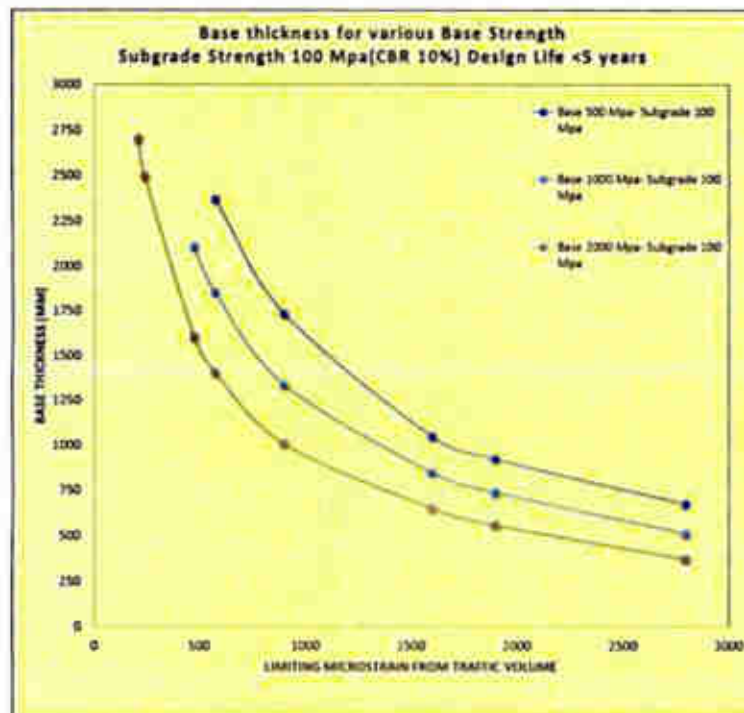


FIGURA 6-2. Microdeformación limitante vs espesor de la capa base.

ANEXO VIII.- ENSAYO DE LABORATORIO PARA DETERMINAR LOS MATERIALES ADECUADOS PARA LA CARPETA DE RODADURA



FIGURA 6-3. Prueba de laboratorio – Flujo de procesos.

ANEXO IX.- UTILIZACIÓN DEL DCP (PENETRÓMETRO DE CONO DINÁMICO)

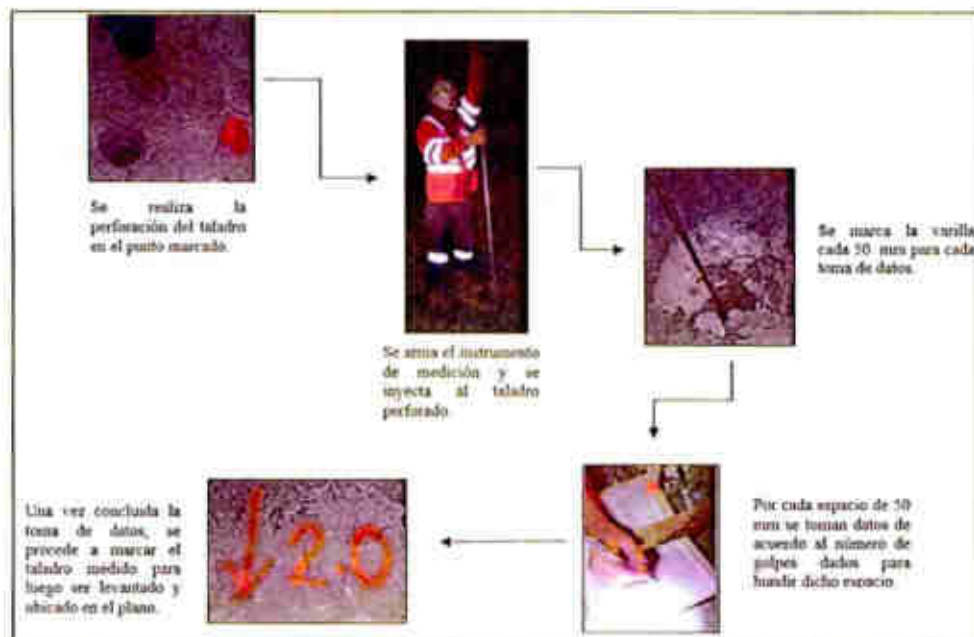


FIGURA 6-4. Proceso de utilización del DCP.

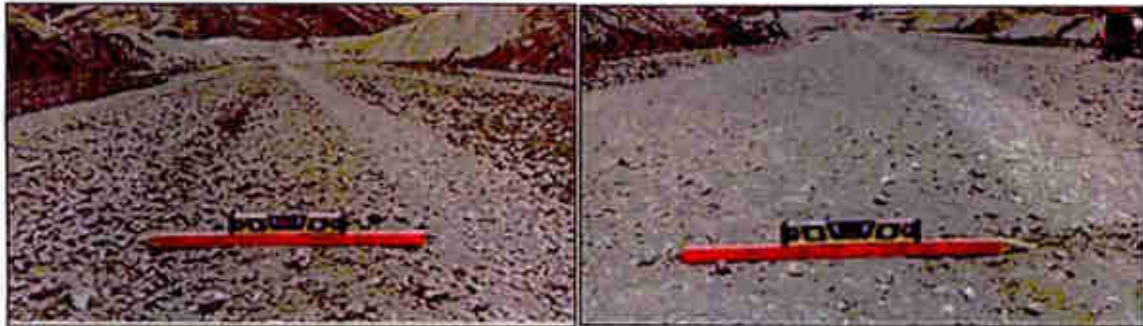
ANEXO X. - FOTOGRAFÍAS TOMADAS EN CAMPO

**ANTES**

**DESPUES**



FOTOGRAFÍA A10-1. Lastrado de vías en el Tramo I.



**3.3%**

**3.5%**

FOTOGRAFÍA A10-2. Control de niveles de diseño de vías (3%),



FOTOGRAFÍA A10-3. Control de calidad en el Tramo I – Funcionamiento de cunetas.

<p><b>Mantenimiento de vías en Tramo I:</b> Trabajos de limpieza de cunetas y la conformación de crown (lomo de corvina) a 3% con la motoniveladora 04. No se procedió con el lastreo de vías debido a que no se tenía disponibilidad del cargador #01 para el carguío de material chancado.</p>	
Limpieza de cunetas	Conformación de Crown
	

FOTOGRAFÍA A10-4. Mantenimiento de vías en el Tramo I.

<p><b>Compactación en Tramo III y IV:</b> Compactación de la base de los Tramos III y IV con el rodillo #01, desde el nivel 4005 al 3915. Para preparar la base para el tendido del material chancado.</p>	
Compactación del tramo III	Compactación del tramo IV
	

FOTOGRAFÍA A10-5. Mantenimiento de vía en el Tramo III y Tramo IV.

<p><b>Mantenimiento de vías:</b>  Mantenimiento de vías con el tractor de ruedas #21 y la motoniveladora #02, realizando trabajos de tendido y nivelado de material mina (material granulado) así como la corrección del peralte de la curva que baja del 3960 al 3915.</p>	
Tendido de material mina	Corrección de peralte
	

FOTOGRAFÍA A10-6. Mantenimiento de vías con motoniveladora,

<p><b>Lastrado de vías:</b>  Lastrado de vías con material chancado continuando desde la cantera 01 nivel 3990 al nivel 3960, con el tractor de ruedas #21.</p>	
Descarga de material chancado	Tendido de material chancado
	

FOTOGRAFÍA A10-7. Lastrado de vías en el Tramo III.