

**Universidad Nacional de Ingeniería**

**Facultad de Ingeniería Civil**



TESIS

**Comparación de pavimentos rígidos y flexibles basado en la metodología AASHTO 93, para la evaluación de vías de una subestación eléctrica**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Civil.

Elaborado por

Deybith Junior Fabian Aquino

 [0009-0005-9646-4794](https://orcid.org/0009-0005-9646-4794)

Asesor

Ing. Juan Apaclla Caja

 [0000-0001-6792-3174](https://orcid.org/0000-0001-6792-3174)

LIMA – PERÚ

2025

|                              |                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Citar/How to cite            | Fabian Aquino [1]                                                                                                                                                                                                                                      |
| Referencia/Reference         | [1] D. Fabian Aquino, “ <i>Comparación de pavimentos rígidos y flexibles basado en la metodología AASHTO 93, para la evaluación de vías de una subestación eléctrica</i> ” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025. |
| Estilo/Style:<br>IEEE (2020) |                                                                                                                                                                                                                                                        |

---

|                                |                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Citar/How to cite              | (Fabian, 2025)                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Referencia/Reference           | Fabian, D. (2025). <i>Comparación de pavimentos rígidos y flexibles basado en la metodología AASHTO 93, para la evaluación de vías de una subestación eléctrica</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI. |
| Estilo/Style:<br>APA (7ma ed.) |                                                                                                                                                                                                                                                                          |

### ***Dedicatoria***

*Dedico este trabajo a mis queridos padres, por su amor incondicional, su ejemplo de vida y su apoyo constante en cada paso que he dado. Gracias por creer en mí y por enseñarme a nunca rendirme.*

*También mis hermanos, cuya inspiración y fortaleza han sido un faro que ilumina mi camino y me impulsa a ser mejor cada día.*

*Finalmente, a todos aquellos que, con su cariño y confianza, me han motivado a alcanzar esta meta. Este logro es para ustedes.*

## **Agradecimiento**

Quiero dedicar un agradecimiento muy especial a mis padres, quienes han sido mi pilar fundamental. Su apoyo incondicional, amor constante y compañía en cada paso de este camino han sido el motor que me impulsó a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

A mi querida hermana Elizabeth, quien ha sido una inspiración y un ejemplo de fortaleza y generosidad. Gracias por tu apoyo inquebrantable, por ser esa persona admirable que siempre me impulsa a ser mejor, y por estar a mi lado en todo momento, en las buenas y en las malas, sin importar las circunstancias ni la distancia. No tengo palabras suficientes para expresar lo mucho que valoro todo lo que has hecho por mí.

Agradezco profundamente a mis hermanos Consuelo y David, por mostrarme siempre el camino y por ser en quienes puedo confiar y acudir cuando los necesito. Aunque quizás no lo sepan, su ejemplo y apoyo han influenciado de manera muy significativa las virtudes y valores que hoy tengo.

Finalmente, mi profunda gratitud al Ing. Apacla, mi asesor, por la paciencia, el tiempo y el conocimiento que me brindó para revisar y enriquecer mi trabajo de investigación. Su guía fue esencial para lograr este resultado.

A todos ustedes, gracias de corazón por acompañarme en este proceso y por ser parte esencial de este logro.

## Resumen

Esta tesis compara y evalúa diseños de pavimentos rígidos y flexibles para vías internas de subestaciones eléctricas, aplicando la metodología AASHTO 93 y considerando condiciones geotécnicas del Perú. El objetivo es optimizar la gestión estructural y funcional de estas vías, esenciales para la operación y mantenimiento de las subestaciones.

Se analizaron las características técnicas de la infraestructura vial interna, considerando la disposición de equipos, ductos eléctricos subterráneos y el cumplimiento normativo según IEC 61936 y el Manual del MTC. La evaluación incluyó pavimentos flexibles con tratamiento superficial bicapa (TSB) y rígidos para periodos de diseño de 10 y 25 años. Los ejes equivalentes acumulados (W18) se estimaron con base en el tráfico proyectado de vehículos tipo C2 y T2S3.

Los resultados evidencian que ambos pavimentos cumplen los requisitos estructurales, aunque los flexibles permiten mayor ajuste de espesores según el CBR del suelo. Además, se establecieron alturas mínimas de protección para ductos y drenajes, evitando interferencias que comprometan la durabilidad del sistema vial.

Finalmente, los diseños se validaron conforme al Manual del MTC, definiendo rangos óptimos de espesores para condiciones locales. El análisis económico mostró que el pavimento flexible TSB presenta el menor costo global y mejor adaptación al entorno operativo de las subestaciones.

**Palabras clave:** AASHTO 93, subestaciones eléctricas, CBR, pavimento.

## Abstract

This thesis compares and evaluates rigid and flexible pavement designs for internal roads of electrical substations, applying the AASHTO 93 methodology and considering the geotechnical conditions of Peru. The objective is to optimize the structural and functional management of these roads, which are essential for the operation and maintenance of the substations.

The technical characteristics of the internal road infrastructure were analyzed, considering the layout of equipment, underground electrical conduits, and regulatory compliance according to IEC 61936 and the MTC Manual. The evaluation included flexible pavements with a two-layer surface treatment (a Double Bituminous Surface Treatment (DBST)) and rigid pavements for design periods of 10 and 25 years. The cumulative equivalent axle loads (W18) were estimated based on the projected traffic of C2 and T2S3 vehicles.

The results show that both pavements meet the structural requirements, although flexible pavements allow for greater thickness adjustment based on the soil's DBST. Furthermore, minimum protection heights were established for ducts and drains, preventing interference that could compromise the road system's durability.

Finally, the designs were validated according to the MTC Manual, defining optimal thickness ranges for local conditions. The economic analysis showed that the DBST flexible pavement has the lowest overall cost and is better suited to the substations' operating environment.

**Keywords:** AASHTO 93, electrical substations, CBR, pavement.

## Prólogo

Como asesor de esta tesis, he tenido la oportunidad de acompañar de cerca el desarrollo de un trabajo que no solo responde a una necesidad técnica concreta, sino que también refleja un firme compromiso con la calidad y la rigurosidad del quehacer ingenieril, en especial en tema de pavimentos de vías de longitud corta y de muy bajo volumen de tránsito. La investigación realizada por el bachiller Deybith Junior Fabián Aquino aborda una problemática real dentro del campo de la infraestructura eléctrica: la evaluación y el diseño de pavimentos para vías internas en subestaciones eléctricas, una temática poco explorada, pero de gran relevancia para garantizar la operatividad y la seguridad de estos sistemas.

Aplicando la metodología AASHTO 93 y considerando condiciones geotécnicas propias del Perú, el autor ha desarrollado un análisis comparativo entre pavimentos rígidos y flexibles, integrando criterios técnicos, normativos y operativos además de una evaluación preliminar de costos unitarios para tres alternativas de pavimentación (pavimento flexible con concreto asfáltico en caliente, pavimento flexible con tratamiento superficial bicapa y pavimento rígido de concreto) en las subestaciones Moquegua, Chíncha y Yaros. Este análisis económico complementa la visión técnica, aportando criterios objetivos para la selección de la solución más eficiente en cada caso.

Especial énfasis se ha puesto en la interacción del pavimento con elementos clave de la subestación, como ductos eléctricos subterráneos, sistemas de drenaje y equipos de gran peso, lo cual evidencia una perspectiva integral y práctica del diseño vial en entornos eléctricos. Es igualmente destacable el esfuerzo por incorporar criterios normativos actualizados, como la IEC 61936 y el Manual de Suelos y Pavimentos del MTC, así como la propuesta de rangos óptimos de espesores en función del CBR del suelo y del tipo de subestación, contribuyendo así con lineamientos aplicables a futuros proyectos del sector. Con la convicción de que los resultados de esta tesis serán de utilidad tanto para profesionales como para entidades responsables del diseño, construcción y mantenimiento de subestaciones eléctricas. Felicito al autor por el nivel alcanzado en su investigación y lo animo a seguir desarrollando su carrera profesional con el mismo rigor y compromiso que ha demostrado en este trabajo académico.

Ing. Juan Apaclla Caja  
Asesor de la tesis

## Tabla de contenido

|                                                          |     |
|----------------------------------------------------------|-----|
| Resumen .....                                            | v   |
| Abstract .....                                           | vi  |
| Prólogo .....                                            | vii |
| Capítulo I. Introducción .....                           | 1   |
| 1.1 Generalidades .....                                  | 1   |
| 1.1.1. Antecedentes nacionales.....                      | 1   |
| 1.1.2. Antecedentes internacionales .....                | 2   |
| 1.2 Alcance y límite de la investigación .....           | 4   |
| 1.3 Problemática .....                                   | 5   |
| 1.4 Objetivos .....                                      | 7   |
| 1.4.1 Objetivo general.....                              | 7   |
| 1.4.2 Objetivos específicos: .....                       | 7   |
| 1.5 Formulación de la hipótesis.....                     | 7   |
| 1.5.1 Hipótesis general .....                            | 7   |
| 1.5.2 Hipótesis específicas .....                        | 7   |
| Capítulo II. Marco teórico y conceptual .....            | 8   |
| 2.1. Tipos de subestaciones eléctricas .....             | 8   |
| 2.1.1 Subestación eléctrica.....                         | 8   |
| 2.1.2 Clasificación de las subestaciones eléctricas..... | 11  |
| 2.1.3 Subestaciones eléctricas de transformación .....   | 12  |
| 2.1.4 Subestaciones eléctricas de maniobra.....          | 13  |
| 2.2. Tipos de pavimentos.....                            | 13  |
| 2.2.1 Pavimento flexible.....                            | 13  |
| 2.2.2 Pavimento rígido.....                              | 24  |
| Capítulo III: Metodología de la investigación .....      | 33  |
| 3.1. Metodología de investigación.....                   | 33  |
| 3.1.1. Tipo de investigación .....                       | 33  |
| 3.1.2. Nivel de investigación .....                      | 33  |
| 3.1.3. Diseño de la investigación .....                  | 33  |
| 3.1.4. Población de estudio.....                         | 33  |
| 3.1.5. Muestra .....                                     | 33  |

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Capítulo IV. Descripción de la infraestructura vial en el entorno de una subestación eléctrica .....    | 34 |
| 4.1. Introducción .....                                                                                 | 34 |
| 4.2. Importancia de la infraestructura vial interna.....                                                | 34 |
| 4.3. Características técnicas de las vías internas .....                                                | 37 |
| 4.4. Diseño y planificación de las vías internas.....                                                   | 39 |
| Capítulo V. Evaluación y análisis de pavimentos rígidos y flexibles en una subestación eléctrica .....  | 42 |
| 5.1. Ampliación de la subestación Moquegua 220kV .....                                                  | 42 |
| 5.1.1 Diseño pavimento rígido SE Moquegua. ....                                                         | 43 |
| 5.1.2 Diseño pavimento flexible SE Moquegua .....                                                       | 47 |
| 5.1.3 Interferencias potenciales en los pavimentos de la SE Moquegua 220 kV .....                       | 51 |
| 5.2. Subestación Yaros 500 kV/ 220kV/ 138kV .....                                                       | 53 |
| 5.2.1 Diseño pavimento rígido SE Yaros .....                                                            | 54 |
| 5.2.2 Diseño pavimento flexible SE Yaros. ....                                                          | 58 |
| 5.2.3 Interferencias potenciales en los pavimentos de la SE Yaros .....                                 | 63 |
| 5.3. Subestación Chíncha 220kV/ 60kV .....                                                              | 68 |
| 5.3.1 Diseño pavimento rígido SE Chíncha.....                                                           | 69 |
| 5.3.2 Diseño pavimento flexible SE Chíncha .....                                                        | 73 |
| 5.3.3 Interferencias potenciales y su influencia en los pavimentos de la SE Chíncha 220kV/60kV .....    | 78 |
| Capítulo VI. Validación del diseño de pavimentos rígidos y flexibles en una subestación eléctrica. .... | 83 |
| 6.1 SE Moquegua verificación de diseño. ....                                                            | 84 |
| 6.1.1 Pavimento flexible .....                                                                          | 84 |
| 6.1.2 Pavimento rígido .....                                                                            | 84 |
| 6.2 SE Yaros verificación de diseño. ....                                                               | 84 |
| 6.2.1 Pavimento flexible .....                                                                          | 84 |
| 6.2.2 Pavimento rígido .....                                                                            | 85 |
| 6.3 SE Chíncha verificación de diseño. ....                                                             | 85 |
| 6.3.1 Pavimento flexible .....                                                                          | 85 |
| 6.3.2 Pavimento rígido .....                                                                            | 86 |
| Capítulo VII. Propuesta de diseño de pavimentos en el entorno de una subestación eléctrica. ....        | 87 |
| 7.1 Vehículo de diseño.....                                                                             | 87 |
| 7.2 Pavimentos flexible con tratamiento superficial bicapa.....                                         | 89 |

|                                            |                                                                  |     |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.2.1                                      | Subestación eléctrica de maniobra.....                           | 89  |
| 7.2.2                                      | Subestación eléctrica de transformación .....                    | 91  |
| 7.3                                        | Pavimentos rígido. ....                                          | 92  |
| 7.3.1                                      | Subestación eléctrica de maniobra.....                           | 92  |
| Capítulo VIII. Análisis de resultados..... |                                                                  | 94  |
| 8.1                                        | Capacidad estructural de pavimento flexible. ....                | 94  |
| 8.2                                        | Capacidad estructural de pavimento rígido. ....                  | 95  |
| 8.3                                        | Interferencias Potenciales. ....                                 | 95  |
| 8.3.1                                      | Subestación eléctrica de maniobra.....                           | 96  |
| 8.3.2                                      | Subestación eléctrica de transformación. ....                    | 97  |
| 8.4                                        | Análisis de costo económico. ....                                | 97  |
| 8.4.1                                      | Costo pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente ..... | 98  |
| 8.4.2                                      | Costo pavimento Flexible con TSB.....                            | 100 |
| 8.4.3                                      | Costo pavimento rígido de concreto .....                         | 102 |
| 8.4.4                                      | Comparación de costos por tipo de pavimento.....                 | 103 |
| Conclusiones .....                         |                                                                  | 107 |
| Recomendaciones .....                      |                                                                  | 109 |
| Referencias Bibliográficas.....            |                                                                  | 110 |

## Lista de Tablas

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1: Tipos de subestaciones.....                                                                                                  | 12 |
| Tabla 2: Configuración de ejes .....                                                                                                  | 15 |
| Tabla 3: Factores de Distribución Direccional y de Carril .....                                                                       | 16 |
| Tabla 4: Ejes Equivalentes en pavimentos flexibles según cargas por eje .....                                                         | 17 |
| Tabla 5: Factor de ajuste por presión de neumático (Fp) .....                                                                         | 18 |
| Tabla 6: Factor de Crecimiento Acumulado (Fca) .....                                                                                  | 18 |
| Tabla 7: Desviación Estándar Normal (Zr) .....                                                                                        | 19 |
| Tabla 8: Índice de Servicialidad Inicial (Pi) - Servicialidad Final (Pt) .....                                                        | 20 |
| Tabla 9: Coeficientes Estructurales de la Capa superficial del Pavimento .....                                                        | 21 |
| Tabla 10: Coeficientes Estructurales de la Capa Base del Pavimento .....                                                              | 22 |
| Tabla 11: Coeficientes Estructurales de la Capa Sub-Base del Pavimento.....                                                           | 23 |
| Tabla 12: Coeficiente de drenaje para bases y subbases granulares no tratadas<br>en Pavimentos Flexibles .....                        | 23 |
| Tabla 13: Calidad del Drenaje.....                                                                                                    | 23 |
| Tabla 14: Ejes Equivalentes en pavimentos rígidos según cargas por eje .....                                                          | 26 |
| Tabla 15: Desviación Estándar Normal (Zr) para una sola etapa de diseño de 20<br>años.....                                            | 27 |
| Tabla 16: Índice de Servicialidad Inicial (Pi) - Servicialidad Final (Pt).....                                                        | 28 |
| Tabla 17: CBR mínimos recomendados para la SubBase Granular de Pavimentos<br>Rígidos según Intensidad de Tráfico expresado en EE..... | 29 |
| Tabla 18: Valores Recomendados de Resistencia del Concreto según rango de<br>Tráfico.....                                             | 29 |
| Tabla 19: Coeficiente de drenaje de las capas granulares Cd .....                                                                     | 30 |
| Tabla 20: Condición de drenaje .....                                                                                                  | 30 |
| Tabla 21: Valores de coeficiente de transmisión de carga J.....                                                                       | 31 |
| Tabla 22: Cálculo de ejes equivalentes.....                                                                                           | 43 |
| Tabla 23: Parámetros de vía y Tráfico Vehicular.....                                                                                  | 43 |
| Tabla 24: Parámetros de diseño Pavimento Rígido .....                                                                                 | 46 |
| Tabla 25: Cálculo de ejes equivalentes.....                                                                                           | 47 |
| Tabla 26. Parámetros de vía y Tráfico Vehicular.....                                                                                  | 47 |
| Tabla 27: Módulo de Resilencia según CBR.....                                                                                         | 48 |
| Tabla 28: Coeficiente estructural SE Moquegua .....                                                                                   | 49 |
| Tabla 29: Coeficiente de drenaje SE Moquegua.....                                                                                     | 49 |
| Tabla 30: Número Estructural SE Moquegua .....                                                                                        | 49 |

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 31: Cálculo SN SE Moquegua tratamiento superficial bicapa .....              | 50 |
| Tabla 32: Cálculo SN Suministrado SE Moquegua tratamiento superficial bicapa ..... | 50 |
| Tabla 33: Cálculo SN SE Moquegua carpeta asfáltica en caliente .....               | 50 |
| Tabla 34: Cálculo SN Suministrado SE Moquegua carpeta asfáltica en caliente .....  | 51 |
| Tabla 35: Altura de Banco de ductos de la SE Moquegua .....                        | 52 |
| Tabla 36: Altura de cuerpo de grava de la SE Moquegua .....                        | 53 |
| Tabla 37: Cálculo de ejes equivalentes, .....                                      | 54 |
| Tabla 38: Parámetros de vía y Tráfico Vehicular .....                              | 54 |
| Tabla 39: Parámetros de diseño Pavimento Rígido .....                              | 58 |
| Tabla 40: Cálculo de ejes equivalentes, .....                                      | 58 |
| Tabla 41: Parámetros de vía y Tráfico Vehicular .....                              | 59 |
| Tabla 42: Módulo de Resilencia según CBR .....                                     | 60 |
| Tabla 43: Coeficiente estructural SE Moquegua .....                                | 61 |
| Tabla 44: Coeficiente de drenaje SE Moquegua .....                                 | 61 |
| Tabla 45: Número Estructural SE Moquegua .....                                     | 61 |
| Tabla 46: Cálculo SN SE Yaros tratamiento superficial bicapa .....                 | 62 |
| Tabla 47: Cálculo SN Suministrado SE Yaros tratamiento superficial bicapa .....    | 62 |
| Tabla 48: Cálculo SN SE Yaros carpeta asfáltica en caliente .....                  | 62 |
| Tabla 49: Cálculo SN Suministrado SE Yaros carpeta asfáltica en caliente .....     | 63 |
| Tabla 50: Altura de Banco de ductos de la SE Yaros .....                           | 66 |
| Tabla 51: Altura de Tuberías Colectoras de la SE Yaros .....                       | 68 |
| Tabla 52: Cálculo de ejes equivalentes .....                                       | 69 |
| Tabla 53: Parámetros de vía y Tráfico Vehicular .....                              | 70 |
| Tabla 54: Parámetros de diseño Pavimento Rígido .....                              | 73 |
| Tabla 55: Cálculo de ejes equivalentes, .....                                      | 73 |
| Tabla 56: Parámetros de vía y Tráfico Vehicular .....                              | 74 |
| Tabla 57: Módulo de Resilencia según CBR .....                                     | 75 |
| Tabla 58: Coeficiente estructural SE Chincha .....                                 | 76 |
| Tabla 59: Coeficiente de drenaje SE Chincha .....                                  | 76 |
| Tabla 60: Número Estructural SE Chincha .....                                      | 76 |
| Tabla 61: Cálculo SN SE Chincha tratamiento superficial bicapa .....               | 77 |
| Tabla 62: Cálculo SN Suministrado SE Chincha tratamiento superficial bicapa .....  | 77 |
| Tabla 63: Cálculo SN SE Chincha carpeta asfáltica en caliente .....                | 77 |
| Tabla 64: Cálculo SN Suministrado SE Chincha carpeta asfáltica en caliente. ....   | 78 |
| Tabla 65: Altura de Banco de ductos de la SE Chincha .....                         | 80 |
| Tabla 66: Altura de Tuberías Colectoras de la SE Chincha .....                     | 82 |
| Tabla 67: Número estructural mínimo según MTC pavimento flexible TSB .....         | 83 |

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 68: Número estructural mínimo según MTC pavimento flexible CAC .....                                  | 83 |
| Tabla 69: Espesor mínimo de losa de concreto según MTC pavimento rígido .....                               | 83 |
| Tabla 70: Espesor mínimo de subbase según MTC pavimento rígido.....                                         | 83 |
| Tabla 71: Validación número estructural pavimento flexible TSB SE Moquegua.....                             | 84 |
| Tabla 72: Validación número estructural pavimento flexible CAC SE Moquegua .....                            | 84 |
| Tabla 73: Validación Espesor pavimento rígido SE Moquegua .....                                             | 84 |
| Tabla 74: Validación número estructural pavimento flexible TSB SE Yaros .....                               | 84 |
| Tabla 75: Validación número estructural pavimento flexible CAC SE Yaros .....                               | 85 |
| Tabla 76: Validación Espesor pavimento rígido SE Yaros.....                                                 | 85 |
| Tabla 77: Validación número estructural pavimento flexible TSB SE Chíncha .....                             | 85 |
| Tabla 78: Validación número estructural pavimento flexible CAC SE Chíncha.....                              | 85 |
| Tabla 79: Validación Espesor pavimento rígido SE Chíncha .....                                              | 86 |
| Tabla 80: Cálculo de FVP Pavimento Flexible .....                                                           | 88 |
| Tabla 81: Resumen Fvp Según tipo de vehículo Para pavimento flexible .....                                  | 88 |
| Tabla 82: Cálculo de FVP Pavimento Rígido .....                                                             | 88 |
| Tabla 83: Resumen Fvp Según tipo de vehículo Para pavimento rígido .....                                    | 88 |
| Tabla 84: CBR y Mr para pavimento flexibles .....                                                           | 89 |
| Tabla 85: Parámetros para el cálculo de W <sub>18</sub> .....                                               | 89 |
| Tabla 86: Espesores de pavimento con periodo de diseño de 10 años.....                                      | 89 |
| Tabla 87: Espesor de pavimento flexible según CBR.....                                                      | 90 |
| Tabla 88: Espesores de pavimento con periodo de diseño de 25 años.....                                      | 90 |
| Tabla 89: Espesor de pavimento flexible según CBR.....                                                      | 90 |
| Tabla 90: Parámetros para el cálculo de W <sub>18</sub> .....                                               | 91 |
| Tabla 91: Espesores de pavimento flexible con periodo de diseño de 10 años.....                             | 91 |
| Tabla 92: Espesor de pavimento flexible según CBR.....                                                      | 92 |
| Tabla 93: Espesores de pavimento con periodo de diseño de 25 años.....                                      | 92 |
| Tabla 94: Espesor de pavimento flexible según CBR.....                                                      | 92 |
| Tabla 95: Parámetros para el cálculo de W <sub>18</sub> .....                                               | 93 |
| Tabla 96: Espesores de pavimento con periodo de diseño de 25 años.....                                      | 93 |
| Tabla 97: Espesor de pavimento rígido según CBR.....                                                        | 93 |
| Tabla 98: Espesor de pavimento flexible, según su capacidad estructural<br>W <sub>18</sub> =44998.80.....   | 94 |
| Tabla 99: Espesor de pavimento flexible, según su capacidad estructural<br>W <sub>18</sub> =131631.21.....  | 94 |
| Tabla 100: Espesor de pavimento flexible, según su capacidad estructural<br>W <sub>18</sub> =107043.56..... | 94 |

|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 101: Espesor de pavimento flexible, según su capacidad estructural<br>$W_{18}=313125.55$ ..... | 94  |
| Tabla 102: Espesor de pavimento rígido, para una SE de maniobra y una SE de<br>transformación.....   | 95  |
| Tabla 103: Altura de banco de ductos de la SE Moquegua.....                                          | 95  |
| Tabla 104: Altura de banco de ductos de la SE Yaros .....                                            | 96  |
| Tabla 105: Altura de banco de ductos de la SE Chincha .....                                          | 96  |
| Tabla 106: Altura mínima de banco de ductos para $W_{18}=44998.80$ .....                             | 96  |
| Tabla 107: Altura mínima de banco de ductos para $W_{18}=131631.21$ .....                            | 97  |
| Tabla 108: Altura mínima de banco de ductos para $W_{18}=107043.56$ .....                            | 97  |
| Tabla 109: Altura mínima de banco de ductos para $W_{18}=313125.55$ .....                            | 97  |
| Tabla 110: Costo de pavimento flexible TSB.....                                                      | 104 |
| Tabla 111: Costo de pavimento flexible CAC .....                                                     | 104 |
| Tabla 112: Costo de pavimento Rígido .....                                                           | 105 |
| Tabla 113: Comparación de costos por tipo de pavimento SE Moquegua .....                             | 105 |
| Tabla 114: Comparación de costos por tipo de pavimento SE Yaros.....                                 | 106 |
| Tabla 115: Comparación de costos por tipo de pavimento SE Chincha .....                              | 106 |
| Tabla 116: Costos de mantenimiento en S/ por $m^2$ tipo de pavimento .....                           | 106 |
| Tabla 117: Costos de mantenimiento en S/ por $m^2$ por periodo de diseño .....                       | 106 |

## Lista de Figuras

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Transformador de potencia .....                                        | 8  |
| Figura 2: Interruptor de potencia. ....                                          | 9  |
| Figura 3: Seccionador de rotación Central. ....                                  | 9  |
| Figura 4: Apartarrayos. ....                                                     | 10 |
| Figura 5: Transformador de instrumentos. ....                                    | 11 |
| Figura 6: Esquema de distribución de energía. ....                               | 11 |
| Figura 7: Pavimento Flexible.....                                                | 14 |
| Figura 8: Diagrama de Flujo para diseño de pavimento flexible. ....              | 24 |
| Figura 9: Transferencia de carga en pavimentos rígidos.....                      | 31 |
| Figura 10: Diagrama de Flujo para diseño de pavimento Rígido. ....               | 32 |
| Figura 11: Disposición física de una SE eléctrica.....                           | 35 |
| Figura 12: Disposición de ductos subterráneos en una Subestación Eléctrica. .... | 36 |
| Figura 13: Ductos bajo vía de una Subestación Eléctrica.....                     | 36 |
| Figura 14: Ductos en típicos en una Subestación Eléctrica. ....                  | 37 |
| Figura 15: Esquema de distancia de seguridad en una subestación eléctrica.....   | 39 |
| Figura 16: Disposición de vías en una subestación eléctrica. ....                | 41 |
| Figura 17: Disposición física de la Subestación Moquegua.....                    | 42 |
| Figura 18: Correlación CBR y Módulo de reacción de la sub-rasante. ....          | 45 |
| Figura 19: Disposición de patio en 220kV de la ampliación SE Moquegua. ....      | 51 |
| Figura 20: Banco de ductos en patio 220kV SE Moquegua. ....                      | 52 |
| Figura 21: Sección de Ductos bajo vía en patio 220kV SE Moquegua. ....           | 52 |
| Figura 22: Detalle drenaje SE Moquegua. ....                                     | 53 |
| Figura 23: Disposición física de la Subestación Yaros 500 kV/220 kV/138 kV. .... | 54 |
| Figura 24: Correlación CBR y Módulo de reacción de la sub-rasante. ....          | 57 |
| Figura 25: Disposición de patio en 500/220/138 kV de la SE Yaros. ....           | 63 |
| Figura 26: Banco de ductos en patio 500kV SE Yaros. ....                         | 64 |
| Figura 27: Sección de Ductos Patio 500kV SE Yaros. ....                          | 65 |
| Figura 28: Ductos de Líneas Subterráneas SE Yaros. ....                          | 65 |
| Figura 29: Banco de ductos en patio 500kV SE Yaros. ....                         | 66 |
| Figura 30: Ductos subterráneos de línea de transmisión.....                      | 66 |
| Figura 31: Red de drenaje en patio de 220 kV SE Yaros. ....                      | 67 |
| Figura 32: Red de drenaje en patio de 500 kV SE Yaros. ....                      | 68 |
| Figura 33: Sección de colector y buzón bajo vías de la SE Yaros. ....            | 68 |
| Figura 34: Disposición física de la Subestación Chinchá 220 kV/60 kV. ....       | 69 |

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 35: Correlación CBR y Módulo de reacción de la sub-rasante. .... | 72 |
| Figura 36: Disposición de patio en 220/60 kV de la SE Chincha. ....     | 78 |
| Figura 37: Banco de ductos en patio 220kV SE Chincha. ....              | 79 |
| Figura 38: Sección de Ductos bajo vía en patio 220kV SE Chincha.....    | 79 |
| Figura 39: Banco de ductos en patio 60kV SE Chincha. ....               | 80 |
| Figura 40: Red de drenaje en patio de 220 kV SE Chincha. ....           | 81 |
| Figura 41: Red de drenaje en patio de 60 kV SE Chincha. ....            | 82 |
| Figura 42: Sección de colector y buzón bajo vías de la SE Chincha. .... | 82 |
| Figura 43: Peso de vehículo C2 y T2S3.....                              | 87 |
| Figura 44: Altura de banco de ductos bajo la vía de una SE. ....        | 95 |

## Lista de símbolos y siglas

|              |   |                                                                    |
|--------------|---|--------------------------------------------------------------------|
| CBR          | : | California Bearing Ratio (Índice de Capacidad de Soporte)          |
| $W_{18}$     | : | Número acumulado de ejes equivalentes                              |
| SN           | : | Número estructural (Structural Number)                             |
| MR           | : | Módulo de rotura (Modulus of Rupture)                              |
| $E_c$        | : | Módulo de elasticidad del concreto                                 |
| $f'_c$       | : | Resistencia a la compresión del concreto                           |
| J            | : | Factor de transferencia de carga                                   |
| $C_d$        | : | Coeficiente de drenaje                                             |
| $K_c$        | : | Módulo de reacción combinado                                       |
| $Z_r$        | : | Coeficiente relacionado con el nivel de confiabilidad              |
| $S_0$        | : | Desviación estándar combinada                                      |
| $\Delta PSI$ | : | Variación del índice de serviciabilidad (Serviceability Index)     |
| EE           | : | Ejes equivalentes (Equivalent Axles)                               |
| $F_{vp}$     | : | Factor vehículo pesado (Heavy vehicle factor)                      |
| AASHTO       |   | American Association of State Highway and Transportation Officials |
| IEC          | : | International Electrotechnical Commission                          |
| MTC          | : | Ministerio de Transportes y Comunicaciones                         |
| DF           | : | Disposición Física                                                 |
| ANSI         | : | American National Standards Institute.                             |

# Capítulo I. Introducción

## 1.1 Generalidades

En el contexto actual de la infraestructura eléctrica, las subestaciones son un factor importante en la distribución y transmisión eficiente de energía. Con el aumento de la demanda energética, impulsada por el crecimiento de la población, el desarrollo industrial, la urbanización acelerada y la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles, hay un interés creciente en optimizar y mantener estas instalaciones. La cadena de valor de la electricidad se compone de los siguientes sectores: generación, transmisión, distribución y comercialización a través de líneas de transmisión y subestaciones eléctricas. Hasta la fecha, esta cadena de valor ha mostrado una notable resistencia a los cambios. (Roldán & Jiménez, 2021).

Debido a la importancia de las subestaciones eléctricas, resulta esencial contar con un área estable que asegure un acceso continuo y una estabilidad a largo plazo para la circulación de vehículos livianos y pesados asociados con el funcionamiento y mantenimiento de una subestación eléctrica. En tal sentido, es fundamental identificar el tipo de pavimento a utilizar, tomando en consideración aspectos técnicos, económicos, flujo de tráfico vehicular y requerimientos de mantenimiento de los equipos pesados asociados a la operatividad de la subestación eléctrica.

### 1.1.1. *Antecedentes nacionales*

La investigación llevada a cabo por Espinoza (2020) ha revelado resultados importantes sobre la aplicación de la metodología AASHTO 93 en el cálculo de espesores de pavimento flexible, con especial atención a la implementación de un tratamiento superficial bicapa. Se ha observado una correlación directa entre el uso de la metodología AASHTO 93 y la mejora en la transitabilidad de la superficie de la carretera en la sección analizada. (Espinoza, 2020)

La aplicación del tratamiento superficial bicapa en el diseño de pavimentos flexibles ha demostrado mejorar notablemente la calidad y durabilidad del pavimento. La metodología AASHTO 93 ofrece un marco robusto para determinar los espesores adecuados del pavimento, considerando diversos factores como el tráfico, las condiciones del suelo y las características del material utilizado.

El estudio de Espinoza (2020) respalda la efectividad de este enfoque para mejorar la transitabilidad de la superficie de la carretera, subrayando su importancia en el diseño y construcción de pavimentos flexibles. Estas conclusiones son esenciales para comprender

las mejores prácticas en el diseño de pavimentos y su aplicación en distintos contextos, incluyendo el entorno de las subestaciones eléctricas.

La investigación realizada por Rodríguez (2022), evaluó la carretera Canchaque - Huancabamba, identificándola como una vía con bajo volumen de tránsito vehicular. La tesis propuso una intervención específica basada en una evaluación integral de su estado general. Se identificaron secciones homogéneas a lo largo de la carretera donde convergían los resultados de las evaluaciones superficial, estructural, funcional y de drenaje, lo que llevó a recomendar la reconstrucción total de esas secciones debido a su precaria condición, causada en parte por sobrecargas de vehículos pesados. (Rodríguez, 2022). Este estudio destaca la importancia de abordar la planificación y ejecución de intervenciones viales en vías con bajo tráfico, subrayando la necesidad de evaluaciones exhaustivas y soluciones adecuadas para garantizar la seguridad y funcionalidad de las carreteras.

Guerra (2020), examinó el diseño de un pavimento rígido permeable para drenar aguas pluviales en una zona específica. Determinando que la losa de concreto debería tener 20 cm de espesor y la subbase granular, de 30 a 40 cm. Recomendando además el uso de tuberías perforadas de diversos diámetros para el drenaje de las subcapas y una capa de transición de 5 cm para proteger la subbase. Este diseño promete una excelente calidad de drenaje, con una tasa de infiltración de agua de 1:36 horas según los estándares de AASHTO 93, y un comportamiento mecánico adecuado. Estas conclusiones respaldan la viabilidad de integrar pavimentos permeables en sistemas urbanos de drenaje sostenible, ofreciendo valiosa información para mejorar la gestión de aguas pluviales y la infraestructura vial, especialmente en entornos semejantes como las subestaciones eléctricas. (Guerra Chayña & Guerra Ramos, 2020)

### **1.1.2. Antecedentes internacionales**

Las subestaciones eléctricas, ocupan áreas que van desde aproximadamente 1,000 metros cuadrados hasta 10,000 metros cuadrados o más, según su capacidad y configuración específica, son cruciales para garantizar un suministro de energía confiable y seguro. Dentro de estas áreas, las vías internas representan un componente significativo, ocupando aproximadamente entre el 20% y el 40% del área total de la subestación eléctrica. Uno de los aspectos críticos en este contexto es el diseño y selección de pavimentos adecuados para las áreas circundantes a las subestaciones. Estos pavimentos son de altos estándares de seguridad y sostenibilidad, adaptándose a las necesidades específicas de bajo tráfico y los componentes propios (interruptores, seccionadores, bancos de capacitores, equipos de protección y control, banco de transformadores, banco

de reactores, sistemas de conexión a la red eléctrica, etc) de una subestación eléctrica. (Alcántar, 2015)

En los pavimentos, tanto rígidos como flexibles, existe una diferencia significativa en la manera en que se transfieren las cargas a la subrasante. Esta particularidad debe ser tomada en cuenta en el diseño de la estructura para garantizar que la subrasante, base y/o subbase sean adecuadas para soportar las cargas de tránsito transmitidas entre las distintas capas que conforman el pavimento. (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2018)

Los pavimentos rígidos de concreto hidráulico (cemento portland) se destacan por su alta rigidez, lo que les permite distribuir eficazmente cargas y esfuerzos al suelo en áreas extensas. Esta propiedad hace atractiva su aplicación en diversas condiciones. La rigidez de estos pavimentos no solo facilita una distribución uniforme de las cargas, sino que también reduce los costos de construcción, especialmente en terrenos con capacidad de soporte limitada o en carreteras con tráfico intenso. Incluso en vías con bajo volumen de tráfico, el pavimento de concreto puede ser construido directamente sobre la subrasante sin la necesidad de una capa adicional de soporte siempre y cuando se cuente con un suelo adecuado. (Londoño Naranjo & Alvarez Pabón, 2008). Comprender estas características y beneficios es esencial para apreciar la importancia de los pavimentos de concreto en la infraestructura vial y su relevancia en el diseño de pavimentos para subestaciones eléctricas.

En los pavimentos flexibles, la carga de un neumático provoca flexión en la estructura, generando esfuerzos y deformaciones en cada capa (Base, subbase y subrasante). Estos varían según el tipo de carga y la disposición de los ejes de los vehículos: sencillo, dual, tándem y trídem. (MTC, 2021). Estas respuestas influyen en el deterioro del pavimento y deben ser consideradas en el diseño del pavimento flexible, especialmente al considerar el peso de los equipos más pesados que componen una subestación eléctrica (transformadores de potencia, reactores, etc.).

El tipo de pavimento seleccionado para una subestación eléctrica estará determinado principalmente por los resultados del estudio geotécnico y de mecánica de suelos, así como por los sondeos exploratorios realizados. Los pavimentos que pueden ser desarrollados en una subestación son pavimentos flexibles, como carpeta asfáltica en caliente o en frío, así como pavimentos rígidos, como concreto hidráulico. Esta elección también está condicionada por la función específica de la subestación, ya sea de transformación o de maniobra, dado que esta determina el tipo de equipos instalados y, en consecuencia, el tipo de vehículos que circularán dentro de la subestación. Por ejemplo, una subestación de maniobra no cuenta con transformadores de potencia, por lo que los

vehículos que operan en ella suelen ser de menor peso, en contraste con una subestación de transformación, donde se debe contemplar la circulación de vehículos de gran tamaño para el transporte de transformadores de potencia. Además, se deben considerar la disposición física de todos los componentes de la subestación, como transformadores y equipos inductivos, para evaluar posibles interferencias con elementos como ductos eléctricos y tuberías de drenaje. Asimismo, se debe tener en cuenta las distancias de seguridad conforme a lo establecido en la normativa. (International Electrotechnical Commission, 2021).

## **1.2 Alcance y límite de la investigación**

Esta investigación se centra en el diseño comparativo de pavimentos rígidos y flexibles para vías internas de subestaciones eléctricas. Dentro de los pavimentos flexibles, se presta especial atención a aquellos con tratamiento superficial bicapa, debido a sus características económicas y funcionales adecuadas para las condiciones específicas de circulación y carga en este tipo de instalaciones. Por esta razón, el alcance del estudio se enfoca en analizar y dimensionar pavimentos rígidos (concreto) y flexibles con tratamiento superficial bicapa, aplicando la metodología AASHTO 93 para establecer los parámetros técnicos clave en su selección y diseño. Se considera la respuesta estructural de los materiales constitutivos típicos de pavimentos rígidos y flexibles, utilizando valores de diseño y propiedades recomendados por el MTC y la metodología AASHTO 93, para evaluar su desempeño ante las cargas vehiculares y equipos propios de las subestaciones eléctricas. Un aspecto central de la investigación es la evaluación de la variabilidad del CBR (California Bearing Ratio) del suelo de subrasante como factor determinante en la capacidad portante y su influencia directa en la elección del tipo de pavimento óptimo.

Específicamente, se desarrolla una propuesta de diseño que considera diferentes escenarios de CBR para orientar la selección del tipo de pavimento. Esta propuesta está basada en los datos y resultados obtenidos del diseño de pavimentos para tres subestaciones eléctricas (SE Moquegua; SE Yaros; SE Chincha).

No obstante, la presente investigación presenta limitaciones, incluyendo la dependencia de los resultados y conclusiones a las características geotécnicas, de tráfico y de carga de las tres subestaciones analizadas, lo que limita la extrapolación directa a otras infraestructuras sin un análisis individualizado y adaptación de los parámetros de diseño. Adicionalmente, la metodología AASHTO 93, a pesar de ser un estándar reconocido, presenta limitaciones en la predicción del comportamiento a largo plazo y no considera la interacción con factores ambientales complejos ni el impacto de cargas estáticas prolongadas relevantes en subestaciones eléctricas. Asimismo, el diseño de

pavimentos por la metodología metodología AASHTO 93 excluye una evaluación detallada de los sistemas de drenaje, cruciales para la durabilidad, y no aborda aspectos relacionados con los costos de construcción, el mantenimiento a largo plazo o el análisis del ciclo de vida.

En conclusión, este trabajo de investigación presenta un análisis comparativo fundamentado entre pavimentos rígidos y pavimentos flexibles, con énfasis particular en aquellos con tratamiento superficial bicapa, debido a su pertinencia y rendimiento específico para las vías internas de subestaciones eléctricas utilizando la metodología AASHTO 93. La propuesta técnica basada en variaciones del CBR busca contribuir a la mejora en la toma de decisiones para el diseño de pavimentos en este tipo de infraestructuras. Si bien las limitaciones mencionadas deben ser consideradas al interpretar y aplicar los resultados, el estudio ofrece una base sólida para futuras investigaciones y proyectos de diseño.

### **1.3 Problemática**

El Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) en Perú es crucial para el desarrollo económico, social y ambiental del país, garantizando un suministro eléctrico confiable y eficiente. Para 2024, la demanda energética proyectada alcanzó los 8017 MW. (COES, 2024). Para cumplir con esta demanda, se llevaron inversiones significativas, como la subestación Moquegua 220kV, parte del Proyecto Quellaveco desarrollado por Anglo American. Este proyecto implicó una inversión de aproximadamente 5,300 millones de dólares y generó más de 10,000 empleos directos en la región. (Anglo American, s.f). Asimismo, las subestaciones Yaros 500kV y Campas 500kV que forman parte del Proyecto Coya-Yana, desarrollado por la Red de Energía del Perú (ISA REP), representan una inversión de 500 millones de dólares. (Revista Energía, 2024)

El Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional (COES) regula y supervisa el SEIN, que actualmente cuenta con 367 subestaciones eléctricas y 13,895.5 km de líneas de transmisión (COES, 2024). Sin embargo, a pesar de la importancia crítica de estas subestaciones, existe una notable carencia: la ausencia de una normativa nacional que establezca criterios específicos para el diseño de obras civiles, incluyendo el diseño y selección de pavimentos para sus vías internas. En la práctica, los criterios de diseño se rigen por normativas nacionales e internacionales, según lo determine el concesionario responsable de cada subestación, generando inconsistencias y potencialmente comprometiendo la durabilidad y funcionalidad de las infraestructuras.

El tiempo de vida útil de una subestación se determina en su fase planificación y diseño, de acuerdo con las regulaciones establecidas por el COES. Esta puede tener una

duración mínima de aproximadamente 50 años, lo que resalta la importancia de considerar cuidadosamente el diseño de las áreas destinadas al flujo vehicular. Estas áreas son componentes esenciales para la operación y el mantenimiento adecuado de la subestación eléctrica.

El entorno de las subestaciones eléctricas presenta una serie de desafíos únicos en cuanto al diseño y construcción de pavimentos. La presencia de cargas considerables debido a la instalación de equipos pesados, como transformadores de potencia y maquinaria pesada, así como la coexistencia de elementos como ductos enterrados de cables eléctricos, tuberías de drenaje y otros componentes propios de la subestación, plantea una problemática que requiere una solución integral.

La selección del tipo de pavimento más adecuado es crucial para garantizar la integridad estructural y funcional a largo plazo en este entorno desafiante. En este contexto, la metodología AASHTO 93 ofrece un enfoque confiable y ampliamente utilizado en normativas de diversos países para el diseño de pavimentos rígidos y flexibles. Esta metodología considera factores esenciales como la resistencia estructural del pavimento, las cargas de tráfico esperadas, las características del suelo y los materiales de pavimentación. Además, se debe evaluar las interferencias previsibles como los ductos eléctricos y tuberías de drenaje que puedan afectar la integridad de los pavimentos dentro de una subestación, garantizando así una solución integral y duradera.

Asimismo, se deben tomar en cuenta medidas de mitigación para proteger el pavimento de los efectos negativos de la instalación de equipos pesados y otros elementos de la subestación. Esto puede incluir técnicas de refuerzo del suelo, sistemas de drenaje eficientes para controlar el nivel freático, así como el uso de tecnologías de construcción innovadoras para minimizar el impacto de las cargas sobre el pavimento.

La selección del tipo de pavimento rígido o flexible debe basarse en un análisis exhaustivo de las condiciones específicas del sitio y las necesidades del entorno de la subestación eléctrica. Se debe buscar un equilibrio entre la funcionalidad estructural, la durabilidad y la estética del pavimento para garantizar un rendimiento óptimo a lo largo del tiempo y una integración armoniosa con la subestación eléctrica.

Este planteamiento del problema sienta las bases para una investigación detallada que aborde las complejidades del diseño de pavimentos en subestaciones eléctricas, ofreciendo soluciones prácticas y efectivas para mejorar la integridad y la funcionalidad de los pavimentos en este entorno único.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 *Objetivo general.***

Comparar los diseños de pavimentos rígidos y flexibles basado en la metodología AASHTO 93 en las vías internas de una subestación eléctrica, considerando las condiciones geotécnicas del Perú, para una mejor evaluación de vías en el entorno de una subestación eléctrica.

### **1.4.2 *Objetivos específicos:***

- Evaluar la capacidad estructural de los pavimentos flexibles (tratamiento superficial bicapa) y rígidos basado en la metodología AASHTO 93 bajo condiciones específicas de las subestaciones eléctricas de transformación y maniobra.
- Investigar las interferencias potenciales, como ductos subterráneos de cables eléctricos, canaletas, tuberías de drenaje y su influencia en la integridad estructural de los pavimentos flexibles y rígidos.
- Determinar qué tipo de pavimento ofrece una mejor gestión efectiva respecto a las interferencias potenciales propias de una subestación eléctrica, haciendo uso de los conceptos del segundo objetivo.

## **1.5 Formulación de la hipótesis**

### **1.5.1 *Hipótesis general***

Al comparar los diseños de pavimentos rígidos y flexibles basado en la metodología AASHTO 93 en subestaciones eléctricas de transformación y transmisión, se determinaría que el pavimento rígido proporciona una mayor capacidad para soportar cargas estáticas y dinámicas, ofreciendo una durabilidad a largo plazo y una resistencia adecuada a interferencias como ductos de cables eléctricos y tuberías de drenaje.

### **1.5.2 *Hipótesis específicas***

- En condiciones específicas de las subestaciones eléctricas, se determinaría que el pavimento rígido presenta un comportamiento estructural superior.
- Las interferencias potenciales en el entorno de una subestación eléctrica serían de baja influencia en las estructuras de pavimentos rígidos y flexibles.
- El pavimento rígido ofrece una mejor gestión efectiva respecto a las interferencias potenciales propias de una subestación eléctrica.

## Capítulo II. Marco teórico y conceptual

### 2.1. Tipos de subestaciones eléctricas

#### 2.1.1 Subestación eléctrica

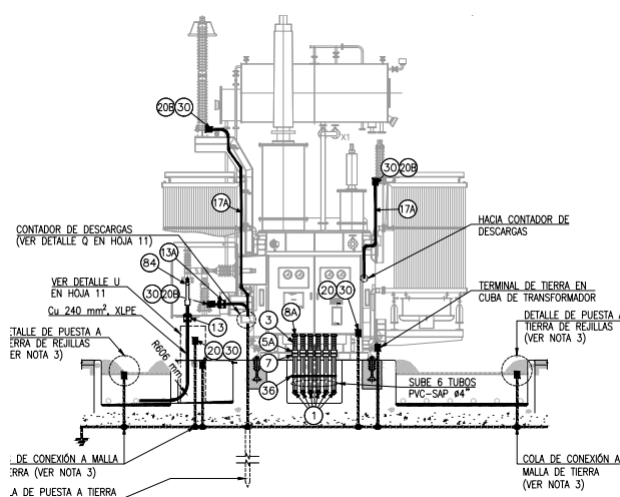
Una subestación eléctrica es una instalación fundamental en los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica, diseñada para modificar los parámetros de tensión, corriente y frecuencia de la electricidad según las necesidades específicas del sistema. Su función principal es facilitar la interconexión, el control y la protección de los componentes del sistema eléctrico, permitiendo la transferencia eficiente de energía eléctrica entre diferentes niveles de tensión. Esto se logra mediante el uso de transformadores, interruptores, dispositivos de protección y otros equipos especializados. Las subestaciones eléctricas juegan un rol vital en todas las etapas del suministro de energía, desde la generación hasta la distribución. Estas instalaciones están equipadas con dispositivos que ajustan los parámetros de la energía eléctrica, como la tensión y la corriente, y facilitan la interconexión y el despacho entre distintas líneas de un sistema eléctrico. (ELECTRICA, 2019).

#### Elementos generales de una Subestación eléctrica:

**Transformador de potencia:** Es una máquina eléctrica estática que transfiere energía eléctrica de un circuito a otro manteniendo la frecuencia constante, operando bajo el principio de inducción electromagnética. Sus circuitos eléctricos están enlazados magnéticamente, pero aislados eléctricamente. (ELECTRICA, 2019).

#### Figura 1

##### *Transformador de potencia*

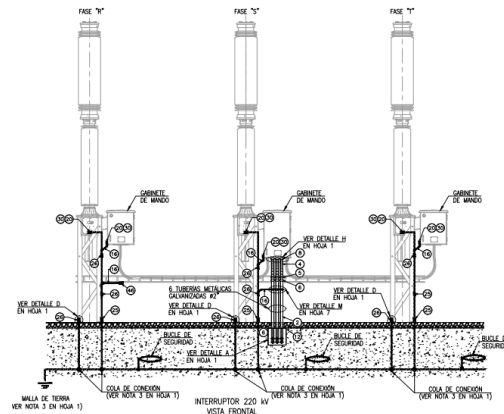


*Nota:* Adaptado de plano PE-CHIN-DISE1-S-01-K2613, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú).

**Interruptor de potencia:** Interrumpe y restablece la continuidad de un circuito eléctrico, incluso bajo carga o corrientes de cortocircuito. (ELECTRICA, 2019).

**Figura 2**

*Interruptor de potencia.*

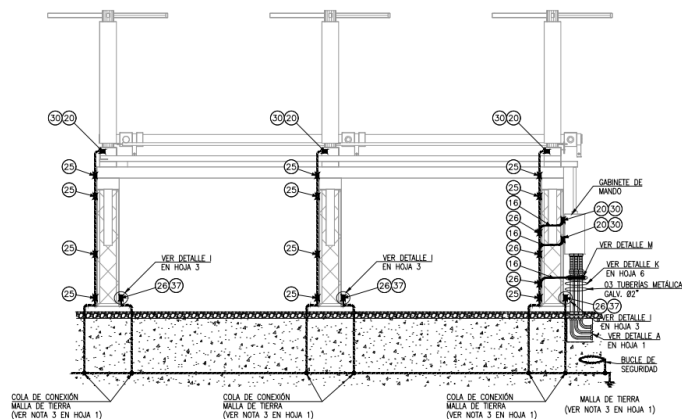


*Nota:* Adaptado de plano PE-CHIN-DISE1-S-01-K2613, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú).

**Seccionadores:** Los seccionadores son dispositivos de maniobra que permiten interrumpir de manera visible la continuidad de un circuito. Aunque su operación se realiza sin carga, algunos modelos cuentan con aditamentos que les permiten funcionar bajo ciertas limitaciones de carga. Se instalan en los circuitos primarios para aislar una sección del circuito y así poder ejecutar trabajos de reparación, conexión de ampliaciones u otros mantenimientos con el sistema desenergizado, garantizando la seguridad. Además, facilitan las maniobras para la localización de fallas mediante el método de seccionalización, mejorando la eficiencia en la detección y aislamiento de problemas. (Universidad Tecnológica de Puebla, 2004).

**Figura 3**

*Seccionador de rotación Central.*

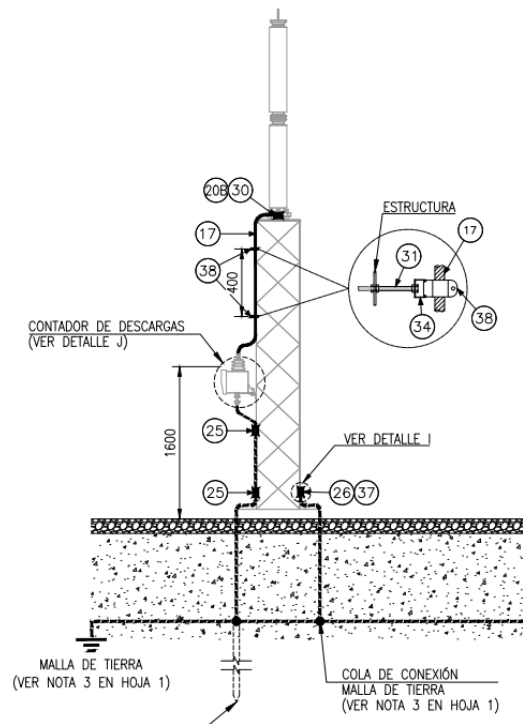


*Nota:* Adaptado de plano PE-CHIN-DISE1-S-01-K2613, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú).

**Apartarrayos:** Están conectados de manera permanente en el sistema y descargan la corriente a tierra cuando ocurre una sobretensión significativa. Su funcionamiento se basa en la creación de un arco eléctrico entre dos electrodos al alcanzar el valor para el cual han sido calibrados o dimensionados. (ELECTRICA, 2019).

**Figura 4**

*Apartarrayos.*

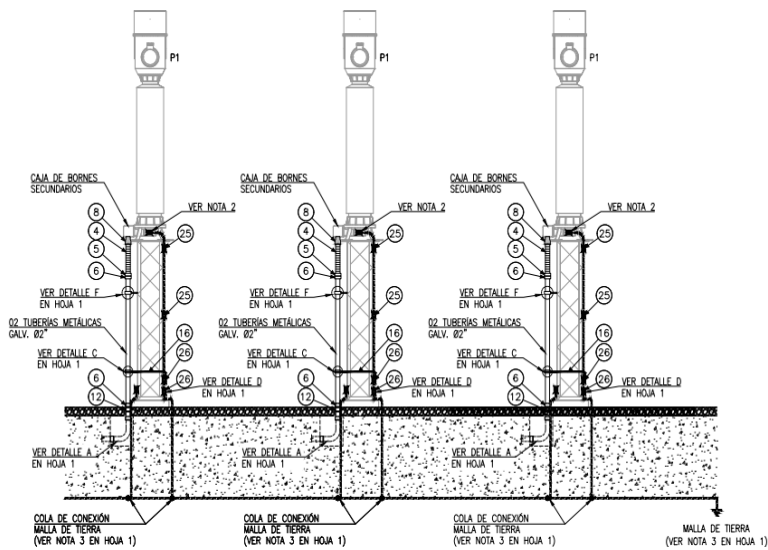


*Nota: Adaptado de plano PE-CHIN-DISE1-S-01-K2613, HMY Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú).*

**Transformadores de instrumento:** Existen 2 tipos, los transformadores de corriente (TC), que cambian el valor de la corriente en su primario a otro en el secundario, y los transformadores de potencial (TP), que transforman los valores de voltaje independientemente de la corriente. Estos valores se utilizan como lecturas en tiempo real para instrumentos de medición, control o protección que requieren señales de corriente o voltaje. (ELECTRICA, 2019).

**Figura 5**

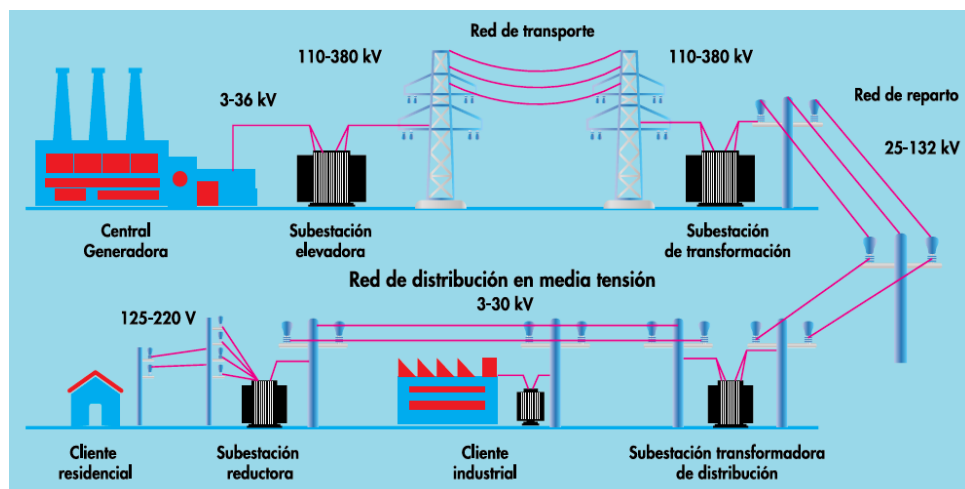
*Transformador de instrumentos.*



*Nota: Adaptado de plano PE-CHIN-DISE1-S-01-K2613, HMY Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú).*

**Figura 6**

*Esquema de distribución de energía.*



*Nota: fuente <https://electrica.mx/wp-content/uploads/2019/02/Electrica34.pdf> (Distribución de energía)*

### **2.1.2 Clasificación de las subestaciones eléctricas**

Las subestaciones eléctricas pueden clasificarse como elevadoras o reductoras de tensión. Dependiendo del enfoque de análisis, se pueden identificar varios tipos de subestaciones:

**Tabla 1***Tipos de subestaciones*

| Tipos de subestaciones    | Concepto                                                                                                                                                         |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Según la función          | <ul style="list-style-type: none"><li>• Transformación (Elevadoras y reductoras)</li><li>• Maniobra</li><li>• Transformación/Maniobra</li></ul>                  |
| Según el emplazamiento    | <ul style="list-style-type: none"><li>• Intemperie</li><li>• Interior</li></ul>                                                                                  |
| Según movilidad           | <ul style="list-style-type: none"><li>• Fija</li><li>• Móvil</li></ul>                                                                                           |
| Según aislamiento         | <ul style="list-style-type: none"><li>• Aisladas en aire (AIS)</li><li>• Aisladas en gas (GIS)</li><li>• Híbridas (HIS)</li></ul>                                |
| Según su ubicación        | <ul style="list-style-type: none"><li>• Urbanas</li><li>• Rurales</li><li>• Industriales</li></ul>                                                               |
| Según su nivel de tensión | <ul style="list-style-type: none"><li>• Muy alta tensión (500kV y 220kV)</li><li>• Alta tensión (138kV y 60kV)</li><li>• Media tensión (22.9kV y 10kV)</li></ul> |

*Nota:* Adaptado de (Trashorras, J., 2016)

En la presente investigación, se considerarán las subestaciones eléctricas clasificándolas de acuerdo con su función.

**2.1.3 Subestaciones eléctricas de transformación**

Estas subestaciones se ubican en puntos estratégicos de la red para elevar los niveles de tensión generados en las centrales eléctricas y transmitirlos a largas distancias con menores pérdidas, o para reducir los niveles de tensión y distribuirlos a los sistemas de distribución (Elgerd, 1982)

Christopoulos (2012) destaca que las subestaciones de transmisión son vitales para la interconexión de diferentes áreas geográficas y para la integración de fuentes de energía renovable a gran escala. Además de los componentes de las subestaciones de maniobra, las subestaciones de transmisión incorporan transformadores de potencia, equipos de compensación reactiva y sistemas de control avanzados (Pabla, 2005).

**2.1.3.1 Subestación eléctrica elevadora.**

Una subestación eléctrica se denomina elevadora cuando está equipada con un banco de transformadores que incrementa el nivel de tensión de las fuentes de alimentación. Estas subestaciones son comúnmente utilizadas en plantas generadoras, donde se requiere aumentar los voltajes de generación a niveles adecuados para la transmisión. Esto implica modificar los parámetros fundamentales de la generación de energía eléctrica mediante transformadores de potencia, los cuales elevan el voltaje y disminuyen la corriente, permitiendo así la transmisión de grandes cantidades de energía

eléctrica a largas distancias con pérdidas mínimas a través de las líneas de transmisión (Alcantar, 2015).

#### **2.1.3.2 Subestación eléctrica reductora.**

Una subestación eléctrica se clasifica como reductora cuando posee un banco de transformación que disminuye el nivel de tensión de las fuentes de alimentación. En estas subestaciones, los niveles de voltaje de transmisión (400kV y 230kV) se reducen a voltajes de subtransmisión (115kV, 69kV y 34.5kV) y distribución (13.8kV), reduciendo la tensión y aumentando la corriente mediante transformadores de potencia. Las subestaciones reductoras se conectan a líneas de transmisión, subtransmisión o distribución para transmitir la energía eléctrica a distancias medias o cortas y alimentar las redes de distribución de bajos voltajes para su comercialización. Estas subestaciones representan la mayor cantidad dentro de un sistema eléctrico. (Alcántar, 2015).

#### **2.1.4 Subestaciones eléctricas de maniobra**

Estas subestaciones se distinguen por la ausencia de un banco de transformación que altere el nivel de tensión de las fuentes de alimentación. Se utilizan cuando no es necesario modificar el nivel de tensión de los circuitos y/o fuentes de alimentación, y están diseñadas únicamente para realizar operaciones de maniobra (conexión y desconexión) (Alcantar, 2015).

Stevenson (1994) señala que las subestaciones de maniobra son esenciales para la flexibilidad operativa de la red, permitiendo la reconfiguración del sistema en caso de contingencias y facilitando la coordinación de la protección. Sus componentes principales incluyen interruptores de alta tensión, seccionadores, barras colectoras y equipos de protección y control (Gonen, 2014)

### **2.2. Tipos de pavimentos**

Según el Manual de carreteras Suelos Geología, Geotecnia y Pavimentos sección Suelos y Pavimentos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), los pavimentos son estructuras instaladas sobre una subrasante, cuya principal función es soportar los esfuerzos generados por el tráfico vehicular, mejorando al mismo tiempo las condiciones de comodidad y seguridad para los usuarios de la vía. El MTC (2014) afirma que "el pavimento es una estructura compuesta por varias capas construida sobre la subrasante del camino, diseñada para resistir y distribuir los esfuerzos producidos por los vehículos, mejorando así la seguridad y la comodidad del tránsito" (MTC, 2014, p. 21).

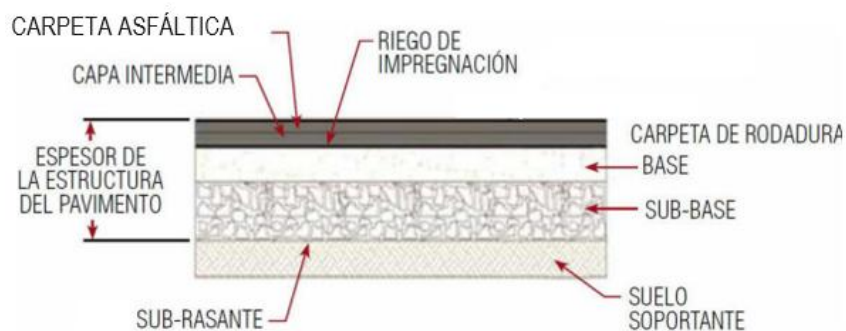
#### **2.2.1 Pavimento flexible**

El pavimento flexible se define como una estructura formada por varias capas granulares, tales como la sub-base y la base, con una capa de rodadura constituida por

materiales bituminosos que actúan como aglomerantes, además de agregados y, en ciertos casos, aditivos. Generalmente, se considera como capa de rodadura asfáltica aquella que se encuentra sobre capas granulares, como el mortero asfáltico, el tratamiento superficial bicapa, los micropavimentos, el macadam asfáltico, así como el concreto asfáltico en frío y en caliente (MTC, 2014, p. 22)

**Figura 7**

*Pavimento Flexible.*



Nota: fuente [https://www.investinperu.pe/\(Estructura de pavimento flexible\)](https://www.investinperu.pe/(Estructura de pavimento flexible))

Según la metodología indicada en la Guía AASHTO para el diseño de estructuras de pavimento de la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (por sus siglas en inglés, AASHTO, de American Association of State Highway, AASHTO, 1993), señala que para el diseño de un pavimento flexible se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R S_O + 9.36 \log_{10}(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log_{10} \left( \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(M_R) - 8.07$$

Donde:

- $W_{18}$ : Número acumulado de ejes simples equivalentes (EE).
- $M_R$ : Módulo de resiliencia (Mr).
- $Z_R$ : Coeficiente estadístico de la desviación estándar normal.
- $S_O$ : Desviación estándar combinada.
- $\Delta PSI$ : Variación de servicialidad.
- $SN$ : Número estructural base

## Número acumulado de ejes simples equivalentes ( $W_{18}$ )

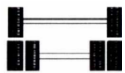
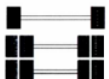
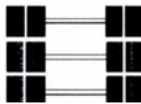
Corresponde al total acumulado de ejes simples equivalentes de 18,000 lb (80 kN) proyectado para el período de diseño, equivalente al número de repeticiones de ejes equivalentes de 8.2 toneladas. Este cálculo se basa en los datos recolectados a partir del estudio del tráfico. (MTC, 2014).

Los ejes equivalentes (EE) son factores de equivalencia que indican el impacto destructivo de las diferentes cargas ejercidas por cada eje de los vehículos pesados sobre la estructura del pavimento.

Para determinar el efecto de los ejes equivalentes se debe tomar en cuenta la configuración de ejes mostrada en la Tabla 2. (MTC, 2014)

**Tabla 2**

### *Configuración de ejes*

| Conjunto de ejes                                               | Nomenclatura | N° de Neumáticos | Gráfico                                                                               |
|----------------------------------------------------------------|--------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Eje simple</b><br>(Con rueda simple)                        | 1RS          | 2                |  |
| <b>Eje simple</b><br>(Con rueda doble)                         | 1RD          | 4                |  |
| <b>Eje tandem</b><br>(1 Eje rueda simple + 1 Eje rueda doble)  | 1RS+1RD      | 6                |  |
| <b>Eje tandem</b><br>(2 Ejes rueda doble)                      | 2RD          | 8                |  |
| <b>Eje tridem</b><br>(1 Eje rueda simple + 2 Ejes rueda doble) | 1RS+2RD      | 10               |  |
| <b>Eje tridem</b><br>(3 Ejes rueda doble)                      | 3RD          | 12               |  |

*Nota:* Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

El cálculo de los Ejes Equivalentes (EE) requiere el uso de relaciones simplificadas para las diversas configuraciones de ejes de vehículos pesados y el tipo de pavimento (pavimentos flexibles). (MTC, 2014)

$$W_{18} = \sum [ EE_{\text{día-carril}} \cdot Fca \cdot 365 ]$$

Donde:

$EE_{\text{día-carril}}$ : Ejes equivalentes por cada tipo de vehículo.  
 $Fca$ : Factor de crecimiento acumulado por tipo de vehículo pesado.

El valor de  $EE_{\text{día-carril}}$  se determina empleando la siguiente ecuación. (MTC, 2014).

$$EE_{\text{día-carril}} = IMD_{pi} \cdot F_d \cdot F_c \cdot F_{vpi} \cdot F_{pi}$$

Donde:

$IMD_{pi}$ : índice medio diario según tipo de vehículo pesado  
 $F_d$ : Factor direccional, ver Tabla 3.  
 $F_c$ : Factor carril de diseño, ver Tabla 3.  
 $F_{vpi}$ : Factor vehículo pesado, ver Tabla 4.  
 $F_{pi}$ : Factor de presión de neumáticos, ver Tabla 5.

El Factor Direccional y el Factor de Carril están relacionados con el tráfico en el carril de diseño del pavimento. Por lo tanto, se considera el número de direcciones o sentidos y el número de carriles por calzada, de acuerdo con el porcentaje o factor ponderado aplicado al Índice Medio Diario (IMD). El factor direccional y el factor carril son tomados de la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Factores de Distribución Direccional y de Carril*

| Número de calzadas                        | Número de sentidos | Número de carriles por sentido | Factor Direccional (Fd) | Factor Carril (Fc) | Factor Ponderado Fd x Fc para carril de diseño |
|-------------------------------------------|--------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------------------------------|
| 1 calzada<br>(para IMDa total de calzada) | 1 sentido          | 1                              | 1.00                    | 1.00               | 1.00                                           |
|                                           | 1 sentido          | 2                              | 1.00                    | 0.80               | 0.80                                           |
|                                           | 1 sentido          | 3                              | 1.00                    | 0.60               | 0.60                                           |
|                                           | 1 sentido          | 4                              | 1.00                    | 0.50               | 0.50                                           |
|                                           | 2 sentido          | 1                              | 0.50                    | 1.00               | 0.50                                           |

| Número de calzadas                                                 | Número de sentidos | Número de carriles por sentido | Factor Direccional (Fd) | Factor Carril (Fc) | Factor Ponderado Fd x Fc para carril de diseño |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------------------------------|
| 2 calzadas con separador central (para IMDa total de dos calzadas) | 2 sentido          | 2                              | 0.50                    | 0.80               | 0.40                                           |
|                                                                    | 2 sentido          | 1                              | 0.50                    | 1.00               | 0.50                                           |
|                                                                    | 2 sentido          | 2                              | 0.50                    | 0.80               | 0.40                                           |
|                                                                    | 2 sentido          | 3                              | 0.50                    | 0.60               | 0.30                                           |
|                                                                    | 2 sentido          | 4                              | 0.50                    | 0.50               | 0.25                                           |

*Nota:* Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

El Factor Vehículo Pesado (Fvp) se define como el número promedio de ejes equivalentes por tipo de vehículo pesado (autobús o camión). Este promedio se obtiene dividiendo la suma total de ejes equivalentes (EE) de un tipo específico de vehículo pesado entre el número total de vehículos de ese mismo tipo. El cálculo de los factores de EE se realizará según se detalla en la Tabla 4. (MTC, 2014).

**Tabla 4**

*Ejes Equivalentes en pavimentos flexibles según cargas por eje*

| Tipo de Eje                                                                  | Eje Equivalente (EE <sub>8,2 tn</sub> )        |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Eje Simple de ruedas simples (EE <sub>S1</sub> )                             | $EE_{S1} = \left(\frac{P}{6,6}\right)^4$       |
| Eje Simple de ruedas dobles (EE <sub>S2</sub> )                              | $EE_{S1} = \left(\frac{P}{8,2}\right)^4$       |
| Eje Tándem (1 eje ruedas doble + 1 eje rueda simple) (EE <sub>TA1</sub> )    | $EE_{TA1} = \left(\frac{P}{14,8}\right)^4$     |
| Eje Tándem (2 ejes de ruedas dobles) (EE <sub>TA2</sub> )                    | $EE_{TA2} = \left(\frac{P}{15,1}\right)^4$     |
| Ejes Trídem (2 ejes ruedas dobles + 1 eje rueda simple) (EE <sub>TR1</sub> ) | $EE_{TR1} = \left(\frac{P}{20,7}\right)^{3,9}$ |
| Ejes Trídem (3 ejes de ruedas dobles) (EE <sub>TR2</sub> )                   | $EE_{TR2} = \left(\frac{P}{21,8}\right)^{3,9}$ |

*Nota:* Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

Para el cálculo de EE se toma en cuenta el Factor de Presión de Neumáticos (Fp), éste es un coeficiente de ajuste que se aplica en función de la presión de los neumáticos como se muestra en la Tabla 5. Para efectos del Manual se toma una presión de 80 psi, correspondiéndole el valor de 1.0.

**Tabla 5**

*Factor de ajuste por presión de neumático (Fp)*

| Espesor de capa de rodadura (mm) | Presión de contacto del neumático (PCN) en psi<br>PCN=0,90x[Presión de inflado del neumático] (psi) |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
|                                  | 80                                                                                                  | 90   | 100  | 110  | 120  | 130  | 140  |
| 50                               | 1.00                                                                                                | 1.36 | 1.80 | 2.31 | 2.91 | 3.59 | 4.37 |
| 60                               | 1.00                                                                                                | 1.33 | 1.72 | 2.18 | 2.69 | 3.27 | 3.92 |
| 70                               | 1.00                                                                                                | 1.30 | 1.65 | 2.05 | 2.49 | 2.99 | 3.53 |
| 80                               | 1.00                                                                                                | 1.28 | 1.59 | 1.94 | 2.32 | 2.74 | 3.20 |
| 90                               | 1.00                                                                                                | 1.25 | 1.53 | 1.84 | 2.17 | 2.52 | 2.91 |
| 100                              | 1.00                                                                                                | 1.23 | 1.48 | 1.75 | 2.04 | 2.35 | 2.68 |
| 110                              | 1.00                                                                                                | 1.21 | 1.43 | 1.66 | 1.91 | 2.17 | 2.44 |
| 120                              | 1.00                                                                                                | 1.19 | 1.38 | 1.59 | 1.80 | 2.02 | 2.25 |
| 130                              | 1.00                                                                                                | 1.17 | 1.34 | 1.52 | 1.70 | 1.89 | 2.09 |
| 140                              | 1.00                                                                                                | 1.15 | 1.30 | 1.46 | 1.62 | 1.78 | 1.94 |
| 150                              | 1.00                                                                                                | 1.13 | 1.26 | 1.39 | 1.52 | 1.66 | 1.79 |
| 160                              | 1.00                                                                                                | 1.12 | 1.24 | 1.36 | 1.47 | 1.59 | 1.71 |
| 170                              | 1.00                                                                                                | 1.11 | 1.21 | 1.31 | 1.41 | 1.51 | 1.61 |
| 180                              | 1.00                                                                                                | 1.09 | 1.18 | 1.27 | 1.36 | 1.45 | 1.53 |
| 190                              | 1.00                                                                                                | 1.08 | 1.16 | 1.24 | 1.31 | 1.39 | 1.46 |
| 200                              | 1.00                                                                                                | 1.08 | 1.15 | 1.22 | 1.28 | 1.35 | 1.41 |

*Nota:* Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

El factor de crecimiento acumulado (FCA) para el diseño, contempla la tasa anual de crecimiento (r) y el periodo de análisis en años.

$$Fca : \frac{(1 + r)^n - 1}{r}$$

Donde

*r*: Tasa anual de crecimiento

*n*: Periodo de diseño, ver documento de referencia

**Tabla 6**

*Factor de Crecimiento Acumulado (Fca)*

| Periodo de análisis (años) | Factor sin crecimiento | Tasa anual de crecimiento (r%) |      |      |      |      |       |       |       |
|----------------------------|------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
|                            |                        | 2                              | 3    | 4    | 5    | 6    | 7     | 8     | 10    |
| 1.00                       | 1.00                   | 1.00                           | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00  | 1.00  | 1.00  |
| 2.00                       | 2.00                   | 2.02                           | 2.03 | 2.04 | 2.05 | 2.06 | 2.07  | 2.08  | 2.10  |
| 3.00                       | 3.00                   | 3.06                           | 3.09 | 3.12 | 3.15 | 3.18 | 3.21  | 3.25  | 3.31  |
| 4.00                       | 4.00                   | 4.12                           | 4.18 | 4.25 | 4.31 | 4.37 | 4.44  | 4.51  | 4.64  |
| 5.00                       | 5.00                   | 5.20                           | 5.19 | 5.42 | 5.53 | 5.64 | 5.75  | 5.87  | 6.11  |
| 6.00                       | 6.00                   | 6.31                           | 6.47 | 6.63 | 6.80 | 6.98 | 7.15  | 7.34  | 7.72  |
| 7.00                       | 7.00                   | 7.43                           | 7.66 | 7.90 | 8.14 | 8.39 | 8.65  | 8.92  | 9.49  |
| 8.00                       | 8.00                   | 8.58                           | 8.89 | 9.21 | 9.55 | 9.90 | 10.26 | 10.64 | 11.44 |

| Periodo de análisis (años) | Factor sin crecimiento | Tasa anual de crecimiento (r%) |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------|------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                            |                        | 2                              | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 10    |
| 9.00                       | 9.00                   | 9.75                           | 10.16 | 10.58 | 11.03 | 11.49 | 11.98 | 12.49 | 13.58 |
| 10.00                      | 10.00                  | 10.95                          | 11.46 | 12.01 | 12.58 | 13.18 | 13.82 | 14.49 | 15.94 |
| 11.00                      | 11.00                  | 12.17                          | 12.81 | 13.49 | 14.21 | 14.97 | 15.78 | 16.65 | 18.53 |
| 12.00                      | 12.00                  | 13.41                          | 14.19 | 15.03 | 15.92 | 16.87 | 17.89 | 18.98 | 21.38 |
| 13.00                      | 13.00                  | 14.68                          | 15.62 | 16.63 | 17.71 | 18.88 | 20.14 | 21.50 | 24.52 |
| 14.00                      | 14.00                  | 15.97                          | 17.09 | 18.29 | 19.16 | 21.01 | 22.55 | 24.21 | 27.97 |
| 15.00                      | 15.00                  | 17.29                          | 18.60 | 20.02 | 21.58 | 23.28 | 25.13 | 27.15 | 31.77 |
| 16.00                      | 16.00                  | 18.64                          | 20.16 | 21.82 | 23.66 | 25.67 | 27.89 | 30.32 | 35.95 |
| 17.00                      | 17.00                  | 20.01                          | 21.76 | 23.70 | 25.84 | 28.21 | 30.84 | 33.75 | 40.55 |
| 18.00                      | 18.00                  | 21.41                          | 23.41 | 25.65 | 28.13 | 30.91 | 34.00 | 37.45 | 45.60 |
| 19.00                      | 19.00                  | 22.84                          | 25.12 | 27.67 | 30.54 | 33.76 | 37.38 | 41.45 | 51.16 |
| 20.00                      | 20.00                  | 24.30                          | 26.87 | 29.78 | 33.06 | 36.79 | 41.00 | 45.76 | 57.28 |

*Nota:* Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

### Módulo de resiliencia ( $M_R$ )

Según el MTC (2014), el módulo de resiliencia es una medida de la rigidez del suelo de subrasante, se mide a través de un ensayo de resiliencia. La guía AASHTO (1993) nos da la siguiente ecuación que relaciona al CBR con el módulo de resiliencia.

$$M_R(Psi) = 2555 * CBR^{0.64}$$

Cuando el CBR es menor a 6% se deberá realizar un reemplazo de material o aplicar técnicas de estabilización del suelo de subrasante que deberá tener un CBR mínimo de 10%, además el material de reemplazo debe cumplir lo indicado en la sección 207 del manual de carretera, sección Suelos y Pavimentos (MTC, 2014).

### Coeficiente estadístico de la desviación estándar normal ( $Z_R$ )

Según MTC (2014), el valor de para  $Z_R$  corresponde al nivel de confiabilidad elegido para un conjunto de datos que sigue una distribución normal. Este valor se detalla en la Tabla 7.

**Tabla 7**

*Desviación Estándar Normal ( $Z_r$ )*

| Tipo de caminos                     | Trafico | Ejes equivalentes acumulados |         | Nivel de confiabilidad (R) | Desviación estándar normal (Z <sub>R</sub> ) |
|-------------------------------------|---------|------------------------------|---------|----------------------------|----------------------------------------------|
| Caminos de bajo volumen de tránsito | TP0     | 100000                       | 150000  | 65%                        | -0.385                                       |
|                                     | TP1     | 150001                       | 300000  | 70%                        | -0.524                                       |
|                                     | TP2     | 300001                       | 500000  | 75%                        | -0.674                                       |
|                                     | TP3     | 500001                       | 750000  | 80%                        | -0.842                                       |
|                                     | TP4     | 750001                       | 1000000 | 80%                        | -0.842                                       |
|                                     | TP5     | 1000001                      | 1500000 | 85%                        | -1.036                                       |

| Tipo de caminos  | Trafico | Ejes equivalentes acumulados |          | Nivel de confiabilidad (R) | Desviación estándar normal (ZR) |
|------------------|---------|------------------------------|----------|----------------------------|---------------------------------|
| Resto de caminos | TP6     | 1500001                      | 3000000  | 85%                        | -1.036                          |
|                  | TP7     | 3000001                      | 5000000  | 85%                        | -1.036                          |
|                  | TP8     | 5000001                      | 7500000  | 90%                        | -1.282                          |
|                  | TP9     | 7500001                      | 10000000 | 90%                        | -1.282                          |
|                  | TP10    | 10000001                     | 12500000 | 90%                        | -1.282                          |
|                  | TP11    | 12500001                     | 15000000 | 90%                        | -1.282                          |
|                  | TP12    | 15000001                     | 20000000 | 90%                        | -1.282                          |
|                  | TP13    | 20000001                     | 25000000 | 90%                        | -1.282                          |
|                  | TP14    | 25000001                     | 30000000 | 90%                        | -1.282                          |
|                  | TP15    | >30000000                    |          | 95%                        | -1.645                          |

Nota: Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

### Desviación estándar combinada ( $S_o$ )

La Desviación Estándar Combinada ( $S_o$ ) es un parámetro que considera la variabilidad esperada en la predicción del tránsito y otros factores que influyen en el desempeño del pavimento, tales como la construcción, el medio ambiente y la incertidumbre del modelo. Según la Guía AASHTO, se recomienda que para pavimentos flexibles, los valores de  $S_o$  estén entre 0.40 y 0.50. En el Manual de Carreteras "Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos", se adopta un valor de 0.45 para los diseños de pavimentos. (MTC, 2014).

### Variación de servicialidad ( $\Delta PSI$ )

"El Índice de Servicialidad Presente es la comodidad de circulación ofrecida al usuario. Su valor varía de 0 a 5. Un valor de 5 refleja la mejor comodidad teórica y por el contrario un valor de 0 refleja el peor. Cuando la condición de la vía decrece por deterioro, el PSI también decrece". (MTC, 2014, pág. 158)

**Tabla 8**

*Índice de Servicialidad Inicial ( $P_i$ ) - Servicialidad Final ( $P_f$ )*

| Tipo de caminos                     | Trafico | Ejes equivalentes acumulados | Índice de servicialidad inicial ( $P_i$ ) | Índice de servicialidad final ( $P_f$ ) |
|-------------------------------------|---------|------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Caminos de bajo volumen de tránsito | TP1     | 150001-300000                | 3.80                                      | 2.00                                    |
|                                     | TP2     | 300001-500000                | 3.80                                      | 2.00                                    |
|                                     | TP3     | 500001-750000                | 3.80                                      | 2.00                                    |
|                                     | TP4     | 750001-1000000               | 3.80                                      | 2.00                                    |
|                                     | TP5     | 1000001-1500000              | 4.00                                      | 2.50                                    |
| Resto de caminos                    | TP6     | 1500001-3000000              | 4.00                                      | 2.50                                    |
|                                     | TP7     | 3000001-5000000              | 4.00                                      | 2.50                                    |
|                                     | TP8     | 5000001-7500000              | 4.00                                      | 2.50                                    |

| Tipo de caminos | Trafico | Ejes equivalentes acumulados | Índice de serviciabilidad inicial (Pi) | Índice de serviciabilidad final (PT) |
|-----------------|---------|------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|
|                 | TP9     | 7500001-10000000             | 4.00                                   | 2.50                                 |
|                 | TP10    | 10000001-12500000            | 4.00                                   | 2.50                                 |
|                 | TP11    | 12500001-15000000            | 4.00                                   | 2.50                                 |
|                 | TP12    | 15000001-20000000            | 4.20                                   | 3.00                                 |
|                 | TP13    | 20000001-25000000            | 4.20                                   | 3.00                                 |
|                 | TP14    | 25000001-30000000            | 4.20                                   | 3.00                                 |
|                 | TP15    | >30000000                    | 4.20                                   | 3.00                                 |

Nota: Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

### Cálculo del número estructural base (SN)

Los datos recopilados y procesados se utilizan en la ecuación de diseño AASHTO para obtener el Número Estructural, que indica el espesor total del pavimento a colocar. Este número debe transformarse en el espesor efectivo de cada una de las capas que conformarán el pavimento, tales como la capa de rodadura, la base y la subbase. Esta conversión se realiza mediante el uso de coeficientes estructurales, aplicando la siguiente ecuación: (MTC ,2014).

$$SN = a_1 \times d_1 + a_2 \times d_2 \times m_2 + a_3 \times d_3 \times m_3$$

Donde

- $a_1, a_2, a_3$  coeficientes estructurales de las capas: Superficial, base y sub base, de forma respectiva.
- $d_1, d_2, d_3$  espesores (en centímetro) de las capas: Superficial, base y sub base, de forma respectiva.
- $m_2, m_3$  coeficientes de drenaje para las capas de base y sub base, de forma respectiva.

**Tabla 9**

#### *Coeficientes Estructurales de la Capa superficial del Pavimento*

| Componente del Pavimento                                                      | Coeficiente | Valor Coeficiente Estructural $a_i$ (cm) | Observación                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| <b>Capa Superficial</b>                                                       |             |                                          |                                                               |
| Carpeta Asfáltica en Caliente, módulo 2,965 MPa (430,000 PSI) a 20 °C (68 °F) | $a_1$       | 0.170/cm                                 | Capa Superficial recomendada para todos los tipos de Tráfico  |
| Carpeta Asfáltica en Frío, mezcla asfáltica con emulsión                      | $a_1$       | 0.125/cm                                 | Capa Superficial recomendada para Tráfico $\leq 1'000,000$ EE |

| Componente del Pavimento                            | Coefficiente | Valor Coeficiente Estructural $a_i$ (cm) | Observación                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------------------------------|--------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Micropavimento 25mm                                 | $a_1$        | 0.130/cm                                 | Capa Superficial recomendada para Tráfico $\leq 1'000,000$ EE                                                                                                                                                                            |
| Tratamiento Superficial Bicapa.                     | $a_1$        | (*)                                      | Capa Superficial recomendada para Tráfico $\leq 500,000$ EE. No Aplica en tramos con pendiente mayor a 8%; y, en vías con curvas pronunciadas, curvas de volteo, curvas y contracurvas, y en tramos que obliguen al frenado de vehículos |
| Lechada asfáltica (slurry seal) de 12mm.            | $a_1$        | (*)                                      | Capa Superficial recomendada para Tráfico $\leq 500,000$ EE No Aplica en tramos con pendiente mayor a 8% y en tramos que obliguen al frenado de vehículos                                                                                |
| (*) no se considera por no tener aporte estructural |              |                                          |                                                                                                                                                                                                                                          |

*Nota:* Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

**Tabla 10**

*Coefficientes Estructurales de la Capa Base del Pavimento*

| Componente del Pavimento                                                                        | Coefficiente | Valor Coeficiente Estructural $a_i$ (cm) | Observación                                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>Base</b>                                                                                     |              |                                          |                                                            |
| Base Granular CBR 80%, compactada al 100% de la MDS                                             | $a_2$        | 0.052 / cm                               | Capa de Base recomendada para Tráfico $\leq 10'000,000$ EE |
| Base Granular CBR 100%, compactada al 100% de la MDS                                            | $a_2$        | 0.054 / cm                               | Capa de Base recomendada para Tráfico $> 10'000,000$ EE    |
| Base Granular Tratada con Asfalto (Estabilidad Marshall = 1500 lb)                              | $a_2$        | 0.115 / cm                               | Capa de Base recomendada para todos los tipos de tráfico   |
| Base Granular Tratada con Cemento (resistencia a la compresión 7 días = 35 kg/cm <sup>2</sup> ) | $a_2$        | 0.070 cm                                 | Capa de Base recomendada para todos los tipos de Tráfico   |
| Base Granular Tratada con Cal (resistencia a la compresión 7 días = 12 kg/cm <sup>2</sup> )     | $a_2$        | 0.080 cm                                 | Capa de Base recomendada para todos los tipos de Tráfico   |

*Nota:* Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

**Tabla 11***Coeficientes Estructurales de la Capa Sub-Base del Pavimento*

| Componente del Pavimento                                | Coeficiente | Valor Coeficiente Estructural $a_i$ (cm) | Observación                                                  |
|---------------------------------------------------------|-------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>Sub-Base</b>                                         |             |                                          |                                                              |
| Sub-Base Granular CBR 40%, compactada al 100% de la MDS | $a_3$       | 0.047 / cm                               | Capa de Sub-Base recomendada para todos los tipos de tráfico |

*Nota:* Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

EL MTC (2014) señala que la ecuación correspondiente al Número Estructural (SN) requiere el coeficiente de drenaje para las capas granulares de las dos primeras capas del pavimento. Este coeficiente tiene como objetivo considerar el impacto del drenaje en la estructura del pavimento. El valor del coeficiente de drenaje depende de dos factores: (a) la calidad del drenaje y (b) la exposición a la saturación.

**Tabla 12***Coeficiente de drenaje para bases y subbases granulares no tratadas en Pavimentos Flexibles*

| <b>P=% Del tiempo en que el pavimento este expuesto a niveles de humedad cercano a la saturación.</b> |              |             |             |               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------|-------------|---------------|
| Calidad del drenaje                                                                                   | Menor a < 1% | 1% - 5%     | 5% - 25%    | Mayor a > 25% |
| Excelente                                                                                             | 1.40 – 1.35  | 1.35 - 1.30 | 1.30 – 1.20 | 1.20          |
| Bueno                                                                                                 | 1.35 – 1.25  | 1.25 – 1.15 | 1.15 – 1.00 | 1.00          |
| Mediano                                                                                               | 1.25 – 1.15  | 1.15 – 1.05 | 1.00 – 0.80 | 0.80          |
| Malo                                                                                                  | 1.15 – 1.05  | 1.05 – 0.80 | 0.80 – 0.60 | 0.60          |
| Muy malo                                                                                              | 1.05 – 0.95  | 0.95 – 0.75 | 0.75 – 0.40 | 0.40          |

*Nota:* Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

**Tabla 13***Calidad del Drenaje*

| Calidad del drenaje | Tiempo en que tarda el agua en ser evacuada |
|---------------------|---------------------------------------------|
| Excelente           | 2 horas                                     |
| Bueno               | 1 día                                       |
| Mediano             | 1 semana                                    |
| Malo                | 1 mes                                       |
| Muy malo            | El agua no evacua                           |

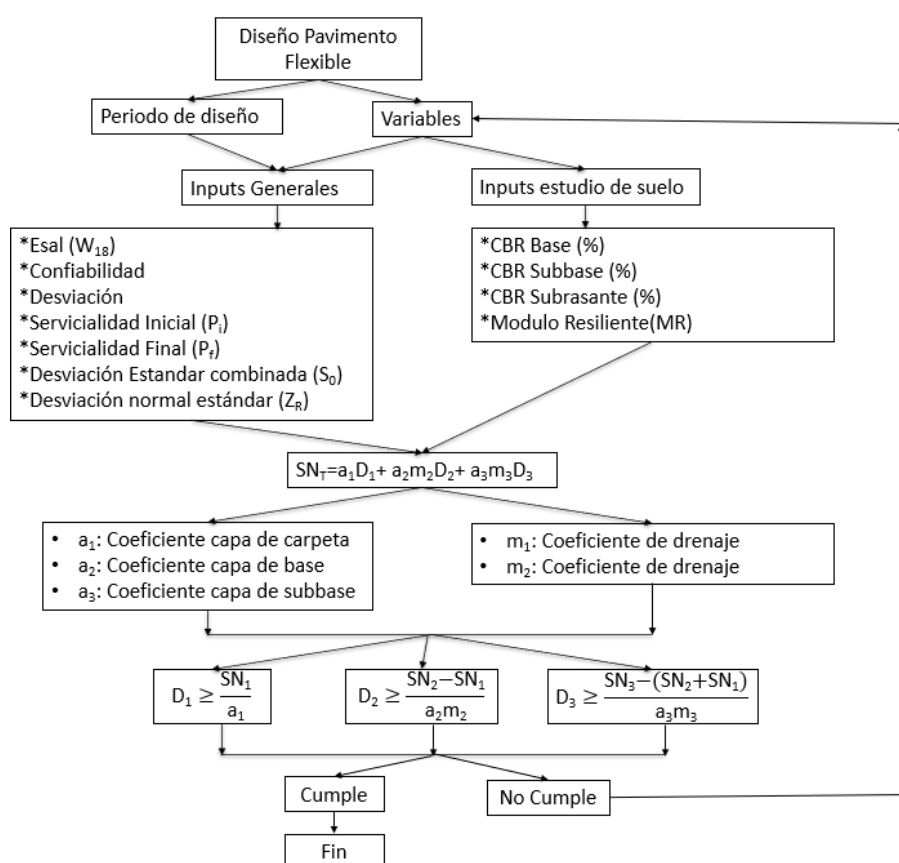
*Nota:* Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

El coeficiente de drenaje utilizado para las capas de base y subbase se fijó en 1.00, de acuerdo con lo establecido en el Manual de Carreteras "Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos", Sección: Suelos y Pavimentos. (MTC ,2014),

Para el diseño de las secciones de estructuras de pavimento flexible, los espesores mínimos de las capas granulares (Base y Sub base) es de 15 cm. (MTC ,2014).

**Figura 8**

*Diagrama de Flujo para diseño de pavimento flexible.*



*Nota: fuente elaboración propia*

## 2.2.2 Pavimento rígido

Las variables que intervienen en el diseño de pavimentos rígidos se basan en criterios empíricos, por lo que es crucial comprender y evaluar cada una de ellas. El proceso de diseño de pavimentos rígidos requiere un análisis detallado de varios factores, como el tráfico, el drenaje, las condiciones climáticas, las características del suelo, la capacidad de transferencia de carga, el nivel de serviciabilidad proyectado y el grado de confiabilidad, dependiendo de la importancia de la vía. Estos factores son indispensables para garantizar un desempeño fiable de la estructura del pavimento y prevenir su deterioro hasta el punto de colapso durante su vida útil. (Sotomayor, 2017)

El diseño de pavimentos rígidos según la metodología ASSTHO 93 sigue la siguiente formulación.

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R S_O + 7,35 \log_{10}(D + 25,4) - 10,39 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,5 - 1,5}\right)}{1 + \frac{1,25 \times 10^{19}}{(D + 25,4)^{8,46}}} + (4,22 - 0,32 P_t) \log_{10} \left( \frac{M_R C_d (0,09 D^{0,75} - 1,132)}{1,51 J (0,09 D^{0,75} - \frac{7,38}{(\frac{E_c}{k})^{0,25}})} \right)$$

Donde:

- $W_{18}$ : Número acumulado de ejes simples equivalentes (EE).
- $M_R$ : Resistencia media del concreto (en Mpa) a flexo tracción a los 28 días (método de carga en los tercios de luz)
- $Z_R$ : Coeficiente estadístico de la desviación estándar normal.
- $S_O$ : Desviación estándar combinada.
- $\Delta PSI$ : Variación de servicialidad.
- $P_t$ : índice de serviciabilidad o servicio final
- $D$ : Espesor de pavimento de concreto, en milímetros
- $J$ : Coeficiente de transmisión de carga en las juntas
- $C_d$ : Coeficiente de drenaje
- $E_c$ : Módulo de elasticidad del concreto, en Mpa
- $K$ : Módulo de reacción, dado en Mpa/m de la superficie (base, subbase o subrasante) en la que se apoya el pavimento de concreto.

#### Número acumulado de ejes simples equivalentes ( $W_{18}$ )

La fórmula utilizada para calcular el número acumulado de ejes simples equivalentes es la mismas que se usa para el diseño de pavimentos flexibles:

$$W_{18} = \sum [ EE_{día-carril} \cdot Fca \cdot 365 ]$$

Donde:

- $EE_{día-carril}$ : Ejes equivalentes por cada tipo de vehículo.
- $Fca$ : Factor de crecimiento acumulado por tipo de vehículo pesado.

El valor de  $EE_{día-carril}$  se determina empleando la siguiente ecuación:

$$EE_{\text{día-carrit}}: IMD_{pi} \cdot F_d \cdot F_c \cdot F_{vpi} \cdot F_{pi}$$

Donde:

|              |                                                   |
|--------------|---------------------------------------------------|
| $IMD_{pi}$ : | índice medio diario según tipo de vehículo pesado |
| $F_d$ :      | Factor direccional, ver Tabla 3.                  |
| $F_c$ :      | Factor carril de diseño, ver Tabla 3.             |
| $F_{vpi}$ :  | Factor vehículo pesado, ver Tabla 14.             |
| $F_{pi}$ :   | Factor de presión de neumáticos, ver Tabla 5.     |

El Factor Vehículo Pesado (Fvp) se define como el número promedio de ejes equivalentes por tipo de vehículo pesado. Este promedio se obtiene dividiendo la suma total de ejes equivalentes (EE) de un tipo específico de vehículo pesado entre el número total de vehículos de ese mismo tipo. (MTC, 2014).

**Tabla 14**

*Ejes Equivalentes en pavimentos rígidos según cargas por eje*

| Tipo de Eje                                                            | Eje Equivalente<br>( $EE_{8,2 \text{ tn}}$ )   |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Eje Simple de ruedas simples ( $EE_{S1}$ )                             | $EE_{S1} = \left(\frac{P}{6,6}\right)^{4.1}$   |
| Eje Simple de ruedas dobles ( $EE_{S2}$ )                              | $EE_{S1} = \left(\frac{P}{8,2}\right)^{4.1}$   |
| Eje Tandem (1 eje ruedas doble + 1 eje rueda simple) ( $EE_{TA1}$ )    | $EE_{TA1} = \left(\frac{P}{13}\right)^{4.1}$   |
| Eje Tandem (2 ejes de ruedas dobles) ( $EE_{TA2}$ )                    | $EE_{TA2} = \left(\frac{P}{13,2}\right)^{4.1}$ |
| Ejes Trídem (2 ejes ruedas dobles + 1 eje rueda simple) ( $EE_{TR1}$ ) | $EE_{TR1} = \left(\frac{P}{16,6}\right)^4$     |
| Ejes Trídem (3 ejes de ruedas dobles) ( $EE_{TR2}$ )                   | $EE_{TR2} = \left(\frac{P}{17,5}\right)^4$     |

*Nota:* Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

### **Coeficiente estadístico de la desviación estándar normal ( $Z_R$ )**

Tiene un significado similar al aplicado a los pavimentos flexibles, es decir, se refiere al nivel de confianza de que un diseño específico podrá alcanzar el final de su vida útil manteniéndose en buenas condiciones.

**Tabla 15***Desviación Estándar Normal (Zr) para una sola etapa de diseño de 20 años*

| Tipo de caminos                     | Trafico | Ejes equivalentes acumulados |          | Nivel de confiabilidad (R) | Desviación estándar normal (ZR) |
|-------------------------------------|---------|------------------------------|----------|----------------------------|---------------------------------|
| Caminos de bajo volumen de tránsito | TP0     | 100000                       | 150000   | 65%                        | -0.385                          |
|                                     | TP1     | 150001                       | 300000   | 70%                        | -0.524                          |
|                                     | TP2     | 300001                       | 500000   | 75%                        | -0.674                          |
|                                     | TP3     | 500001                       | 750000   | 80%                        | -0.842                          |
|                                     | TP4     | 750001                       | 1000000  | 80%                        | -0.842                          |
| Resto de caminos                    | TP5     | 1000001                      | 1500000  | 85%                        | -1.036                          |
|                                     | TP6     | 1500001                      | 3000000  | 85%                        | -1.036                          |
|                                     | TP7     | 3000001                      | 5000000  | 85%                        | -1.036                          |
|                                     | TP8     | 5000001                      | 7500000  | 90%                        | -1.282                          |
|                                     | TP9     | 7500001                      | 10000000 | 90%                        | -1.282                          |
|                                     | TP10    | 10000001                     | 12500000 | 90%                        | -1.282                          |
|                                     | TP11    | 12500001                     | 15000000 | 90%                        | -1.282                          |
|                                     | TP12    | 15000001                     | 20000000 | 90%                        | -1.282                          |
|                                     | TP13    | 20000001                     | 25000000 | 90%                        | -1.282                          |
|                                     | TP14    | 25000001                     | 30000000 | 90%                        | -1.282                          |
|                                     | TP15    | >30000000                    |          | 95%                        | -1.645                          |

*Nota:* Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

### **Desviación estándar combinada ( $S_o$ )**

La Desviación Estándar Combinada ( $S_o$ ) es un parámetro que considera la variabilidad esperada en la predicción del tránsito y otros factores que influyen en el desempeño del pavimento, tales como la construcción, el medio ambiente y la incertidumbre del modelo. Según la Guía AASHTO, se recomienda que para pavimentos rígido, los valores de  $S_o$  estén entre 0.30 y 0.40. En el Manual de Carreteras "Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos", se adopta un valor de 0.35 para los diseños de pavimentos rígidos. (MTC, 2014).

### **Variación de servicialidad ( $\Delta PSI$ )**

La servicialidad se refiere a la capacidad del pavimento para soportar el tránsito que circula por la vía y se evalúa en una escala de 0 a 5, donde 0 indica una condición intransitable y 5 representa un estado óptimo, aunque este valor raramente se alcanza en la realidad. El valor 0 es considerado excesivamente pesimista, la normativa AASHTO 93 establece un índice de servicialidad terminal del pavimento de 1.5.

El manual de carretera "Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos", establece los valores de índice de servicialidad según lo indicado en la Tabla 16 (MTC, 2014)

**Tabla 16**

*Índice de Serviciabilidad Inicial (Pi) - Serviciabilidad Final (Pt)*

| Tipo de caminos                     | Trafico | Ejes equivalentes acumulados | Índice de serviciabilidad inicial (Pi) | Índice de serviciabilidad final (PT) |
|-------------------------------------|---------|------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|
| Caminos de bajo volumen de tránsito | TP1     | 150001-300000                | 4.10                                   | 2.00                                 |
|                                     | TP2     | 300001-500000                | 4.10                                   | 2.00                                 |
|                                     | TP3     | 500001-750000                | 4.10                                   | 2.00                                 |
|                                     | TP4     | 750001-1000000               | 4.10                                   | 2.00                                 |
| Resto de caminos                    | TP5     | 1000001-1500000              | 4.30                                   | 2.50                                 |
|                                     | TP6     | 1500001-3000000              | 4.30                                   | 2.50                                 |
|                                     | TP7     | 3000001-5000000              | 4.30                                   | 2.50                                 |
|                                     | TP8     | 5000001-7500000              | 4.30                                   | 2.50                                 |
|                                     | TP9     | 7500001-10000000             | 4.30                                   | 2.50                                 |
|                                     | TP10    | 10000001-12500000            | 4.30                                   | 2.50                                 |
|                                     | TP11    | 12500001-15000000            | 4.30                                   | 2.50                                 |
|                                     | TP12    | 15000001-20000000            | 4.50                                   | 3.00                                 |
|                                     | TP13    | 20000001-25000000            | 4.50                                   | 3.00                                 |
|                                     | TP14    | 25000001-30000000            | 4.50                                   | 3.00                                 |
|                                     | TP15    | >30000000                    | 4.50                                   | 3.00                                 |

*Nota:* Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

### **Módulo de reacción combinado ( $K_C$ )**

El parámetro que define el tipo de subrasante es el módulo de reacción de la subrasante ( $K$ ). Además, se considera la posibilidad de mejorar la capacidad de soporte de la subrasante mediante la colocación de capas intermedias granulares o tratadas, lo cual optimiza las condiciones de apoyo y puede reducir el espesor de concreto calculado. Esta mejora se representa mediante el módulo de reacción combinado ( $K_C$ ). (MTC, 2014).

$$K_C = \left[ 1 + \left( \frac{h}{38} \right)^2 \times \left( \frac{K_1}{K_0} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{0.5} \times K_0$$

Donde:

|                                        |                                                 |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------|
| $K_1 \left( \frac{kg}{cm^3} \right)$ : | Coeficiente de reacción de la sub base granular |
| $K_C \left( \frac{kg}{cm^3} \right)$ : | Coeficiente de reacción combinado.              |
| $K_0 \left( \frac{kg}{cm^3} \right)$ : | Coeficiente de reacción de la subrasante.       |
| $h(cm)$ :                              | Espesor de la subbase granular.                 |

**Tabla 17**

*CBR mínimos recomendados para la SubBase Granular de Pavimentos Rígidos según Intensidad de Tráfico expresado en EE*

| Tráfico                                | Ensayo Norma | Requerimiento  |
|----------------------------------------|--------------|----------------|
| Para tráfico < 15 x 10 <sup>6</sup> EE | MTC E 132    | CBR mínimo 40% |
| Para tráfico > 15 x 10 <sup>6</sup> EE | MTC E 132    | CBR mínimo 60% |

*Nota:* Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

### **Resistencia a flexo tracción del concreto ( $M_R$ )**

Dado que los pavimentos de concreto operan principalmente bajo flexión, este parámetro se incluye en la ecuación AASHTO 93. El módulo de rotura (MR) está estandarizado según la norma ASTM C-78. En la prueba, el concreto se muestrea en forma de vigas. A los 28 días, las vigas deben ser sometidas a ensayos aplicando cargas en los tercios, provocando la falla en el tercio central de la viga (MTC, 2014).

**Tabla 18**

*Valores Recomendados de Resistencia del Concreto según rango de Tráfico*

| Rangos de tráfico pesado expresado en EE            | Resistencia Mínima a la flexo tracción del concreto (MR) | Resistencia Mínima equivalente a la compresión del concreto ( $F'_c$ ) |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| <5 x 10 <sup>6</sup> EE                             | 40 kg/cm <sup>2</sup>                                    | 280 kg/cm <sup>2</sup>                                                 |
| >5 x 10 <sup>6</sup> EE<br><15 x 10 <sup>6</sup> EE | 42 kg/cm <sup>2</sup>                                    | 300 kg/cm <sup>2</sup>                                                 |
| >15 x 10 <sup>6</sup> EE                            | 45 kg/cm <sup>2</sup>                                    | 350 kg/cm <sup>2</sup>                                                 |

*Nota:* Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

### **Módulo de elástico del concreto (E)**

El módulo de elasticidad del concreto es un factor crucial para el diseño de estructuras de concreto armado. Su predicción puede realizarse a partir de la resistencia a compresión o flexo tracción, mediante correlaciones establecidas.

Para concretos de alto desempeño, con resistencia a compresión superior a 40 MPa, la estimación utilizando fórmulas de diversos códigos puede ser incierta debido a variables no consideradas, lo que requiere estudios y ajustes continuos.

AASHTO'93 sugiere que el módulo elástico puede estimarse mediante una correlación, especificando la recomendada por el ACI (MTC, 2014)

$$E = 57000[F'_c]^{0.5}$$

Donde:

$E(psi)$ : Módulo de elasticidad del concreto

$F'c(psi)$ : Resistencia a la compresión del concreto

El ensayo ASTM C – 469 calcula el módulo de elasticidad del concreto

### Drenaje ( $C_d$ )

La metodología de diseño AASHTO 93 incluye el coeficiente de drenaje ( $C_d$ ) como un factor en el diseño. Las condiciones de drenaje indican la probabilidad de que la estructura bajo la losa de concreto retenga agua libre o humedad durante un tiempo determinado. Generalmente, el nivel de drenaje de las capas intermedias depende de los tipos de drenaje diseñados, la permeabilidad y tipo de las capas de subbase, el tipo de subrasante, las condiciones climáticas, el grado de precipitaciones, entre otros factores.

El coeficiente de drenaje  $C_d$  varía entre 0.70 y 1.25, dependiendo de las condiciones mencionadas. Un  $C_d$  alto indica un buen drenaje, lo que beneficia a la estructura al reducir el espesor de concreto necesario. (MTC, 2014).

**Tabla 19**

*Coeficiente de drenaje de las capas granulares  $C_d$*

| P=% Del tiempo en que el pavimento este expuesto a niveles de humedad cercano a la saturación. |              |             |             |               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------|-------------|---------------|
| Calidad del drenaje                                                                            | Menor a < 1% | 1% - 5%     | 5% - 25%    | Mayor a > 25% |
| Excelente                                                                                      | 1.25 – 1.20  | 1.20 - 1.15 | 1.15 – 1.10 | 1.10          |
| Bueno                                                                                          | 1.20 – 1.15  | 1.15 – 1.10 | 1.10 – 1.00 | 1.00          |
| Mediano                                                                                        | 1.15 – 1.10  | 1.10 – 1.00 | 1.00 – 0.90 | 0.90          |
| Malo                                                                                           | 1.10 – 1.00  | 1.00 – 0.90 | 0.90 – 0.80 | 0.80          |
| Muy malo                                                                                       | 1.00 – 0.90  | 0.90 – 0.80 | 0.80 – 0.70 | 0.70          |

*Nota:* Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

**Tabla 20**

*Condición de drenaje*

| Calidad del drenaje | 50% de saturación en: | 85% de saturación en: |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| Excelente           | 2 horas               | 2 horas               |
| Bueno               | 1 día                 | 2 a 5 horas           |
| Mediano             | 1 semana              | 5 a 10 horas          |
| Malo                | 1 mes                 | Mas de 10 horas       |
| Muy malo            | El agua no evacua     | Mucho mas de 10 horas |

*Nota:* Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

## Transferencia de cargas (J)

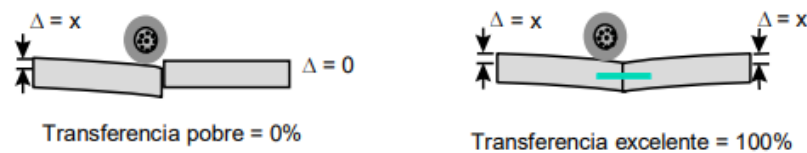
Este parámetro se utiliza en el diseño de pavimentos de concreto y representa la capacidad de la estructura para transferir cargas entre juntas y grietas. Los valores de este parámetro varían según el tipo de pavimento de concreto a construir, la presencia o ausencia de una berma lateral y su tipo, así como la existencia de dispositivos de transferencia de cargas.

El valor de J tiene una relación directa con el espesor final de la losa de concreto: a menor valor de J, menor será el espesor del concreto. (MTC, 2014).

El concepto de transferencia de cargas en las juntas transversales se refiere a la capacidad de una losa para transmitir una parte de su carga a la losa adyacente. De esta manera, una junta con una transferencia de carga del 100% es aquella que transfiere la mitad de su carga a la losa vecina, lo que disminuye las tensiones en sus bordes.

**Figura 9**

*Transferencia de carga en pavimentos rígidos.*



*Nota: fuente elaboración propia*

**Tabla 21**

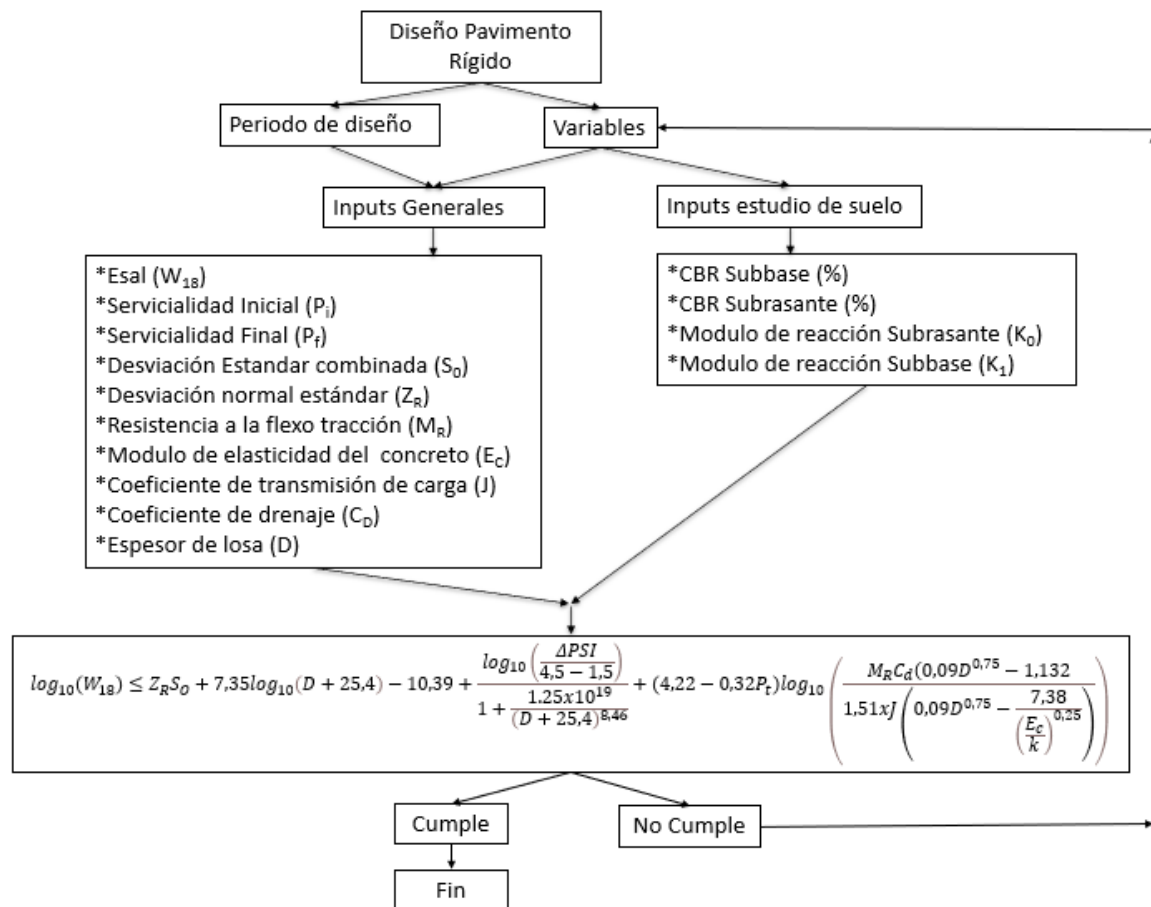
*Valores de coeficiente de transmisión de carga J*

| Tipo de Berma | J                     |                       |                       |                       |
|---------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|               | Granular o Asfáltica  |                       | Concreto Hidráulico   |                       |
|               | Si<br>(Con pasadores) | No<br>(con pasadores) | Si<br>(Con pasadores) | No<br>(con pasadores) |
| Valores J     | 3.2                   | 3.8-4.4               | 2.8                   | 3.8                   |

*Nota: Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).*

**Figura 10**

*Diagrama de Flujo para diseño de pavimento Rígido.*



*Nota: fuente elaboración propia*

## **Capítulo III. Metodología de la investigación**

### **3.1. Metodología de investigación**

#### **3.1.1. Tipo de investigación**

La investigación adoptó una metodología de tipo aplicada. Según Arias (2012), este tipo de metodología se enfoca en la construcción, el conocimiento y la modificación de una realidad problemática específica, utilizando aportes teóricos y conceptuales preexistentes.

#### **3.1.2. Nivel de investigación**

Además, dado que el objetivo es comparar los diseños de pavimentos rígidos y flexibles basado en la metodología AASHTO 93 en las vías internas de una subestación eléctrica, para una mejor evaluación de vías en el entorno de una subestación eléctrica, la investigación se enmarcó en un nivel descriptivo. Hernández et al. (2014) señala que este nivel se enfoca en especificar las propiedades y características inherentes al objeto de estudio.

#### **3.1.3. Diseño de la investigación**

Finalmente, en cuanto al diseño metodológico empleado, este se ubicó dentro de los estudios no experimentales transversales descriptivos, los cuales, según Hernández et al. (2014), se limitan a estudiar los fenómenos de interés en un momento específico, sin manipulación de las variables.

#### **3.1.4. Población de estudio**

Para Hernández et al. (2014) “una población es el conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones” (p.174), Para la presente tesis, la población está constituida por todas las Subestaciones de 22,9kV a 500kV dentro del territorio peruano que estén conectados al SEIN.

#### **3.1.5. Muestra**

La muestra para la presente investigación es del tipo no probabilística, según Hernández et al. (2014) “suponen un procedimiento de selección orientado por las características de la investigación” (p. 189). Para la presente investigación, se han considerado las subestaciones eléctricas Moquegua 220 kV, Yaros 500 kV/220 kV/138 kV y Chincha 220 kV/60 kV como unidades de análisis, dado que representan los tipos de subestaciones de transformación y maniobra, integrando componentes esenciales de ingeniería civil y eléctrica en su diseño.

## **Capítulo IV. Descripción de la infraestructura vial en el entorno de una subestación eléctrica**

### **4.1. Introducción**

La infraestructura vial interna de una subestación eléctrica (SE) es fundamental para garantizar su operación y mantenimiento eficientes. Estas vías facilitan el movimiento seguro de personal, equipos y vehículos, permitiendo tareas esenciales como el mantenimiento, las inspecciones y las operaciones de los componentes del sistema eléctrico. Como señala un artículo de revisión sobre diseño de subestaciones, la accesibilidad y la seguridad son consideraciones primordiales en el diseño del layout de una subestación (Oliveira et al., 2019).

El diseño de estas vías debe considerar la disposición física de los elementos de la SE, la ubicación estratégica de los ductos eléctricos subterráneos, y el cumplimiento estricto de las distancias de seguridad. Estas consideraciones son cruciales para la seguridad del personal, la integridad de los equipos y el correcto funcionamiento de la instalación (IEC 61936, 2021). Un estudio de caso sobre la modernización de una subestación en Brasil resalta la importancia de "una planificación cuidadosa del acceso y la circulación interna para minimizar los riesgos y optimizar los tiempos de respuesta" (Silva et al., 2020).

En este capítulo se describen las características técnicas de las vías internas de la subestación eléctrica, la relevancia de los ductos eléctricos subterráneos y la organización física de los equipos. Además, se analizará la importancia de respetar las distancias de seguridad establecidas para garantizar un funcionamiento seguro.

En este capítulo se describen las características técnicas y funcionales de las vías internas, la relevancia del diseño y protección de los ductos subterráneos, así como la organización física de los equipos, enfatizando la importancia de respetar las distancias de seguridad para un funcionamiento seguro y eficiente.

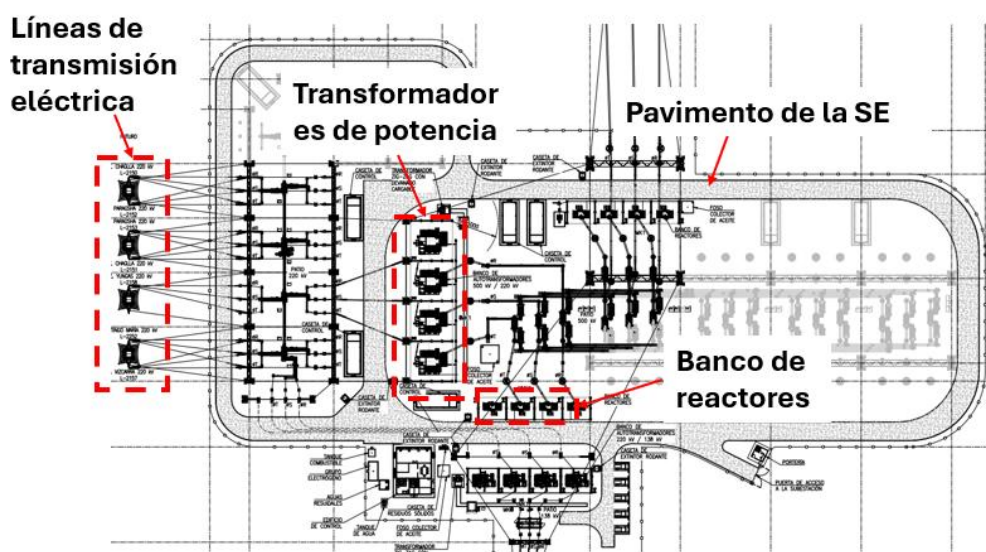
### **4.2. Importancia de la infraestructura vial interna**

Las vías internas de una SE garantizan la accesibilidad continua a equipos clave como transformadores, interruptores y sistemas de control. Permiten el transporte de vehículos y maquinaria, crucial para realizar mantenimiento, inspecciones y maniobras operativas de manera rápida y segura. Un artículo sobre confiabilidad de subestaciones destaca que un acceso rápido y eficiente a los equipos reduce los tiempos de inactividad y mejora la confiabilidad del sistema eléctrico (Billinton & Allan, 1996).

La disposición física de los componentes es esencial para la eficiencia y seguridad de la SE. Se refiere a la organización espacial de los equipos y áreas operativas, considerando las distancias de seguridad. Estas distancias previenen riesgos eléctricos, aseguran un entorno de trabajo seguro y minimizan interferencias electromagnéticas o descargas accidentales. Un estudio sobre seguridad en subestaciones señala que una disposición física inadecuada puede aumentar el riesgo de accidentes y fallas en los equipos (Brown, 2009).

**Figura 11**

*Disposición física de una SE eléctrica.*

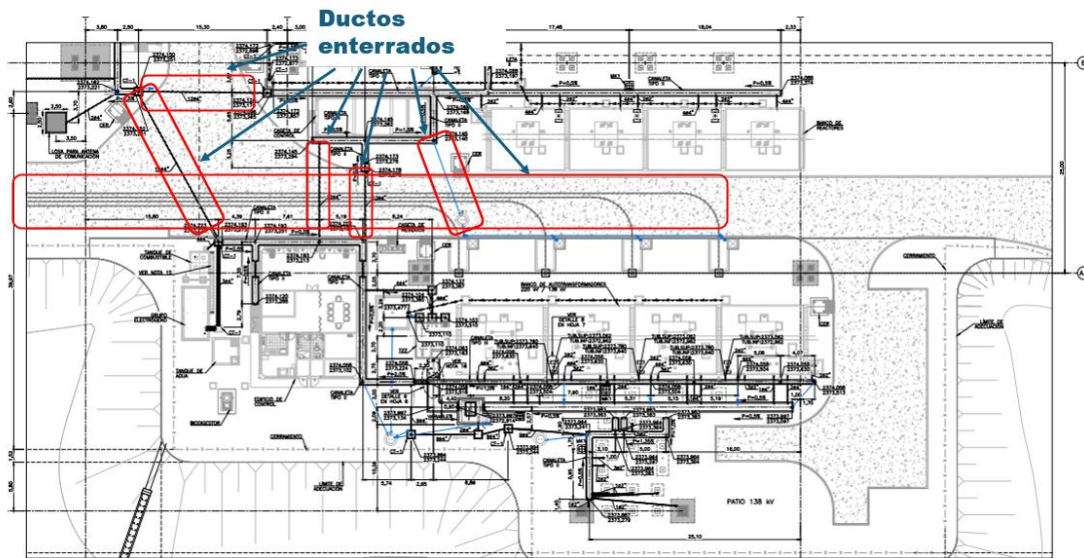


*Nota:* Adaptado de plano PE-YANA-13Z01-S-04-K2402, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú).

La ubicación de los ductos eléctricos subterráneos, que contienen cables de potencia y control, es una consideración clave. Cualquier interferencia con estos ductos puede causar daños significativos. Por lo tanto, se deben implementar medidas de protección adicionales durante la construcción y el mantenimiento de las vías internas. La norma IEEE Std 484 (2019) proporciona recomendaciones para la instalación de baterías en subestaciones, incluyendo la protección de los cables subterráneos.

**Figura 12**

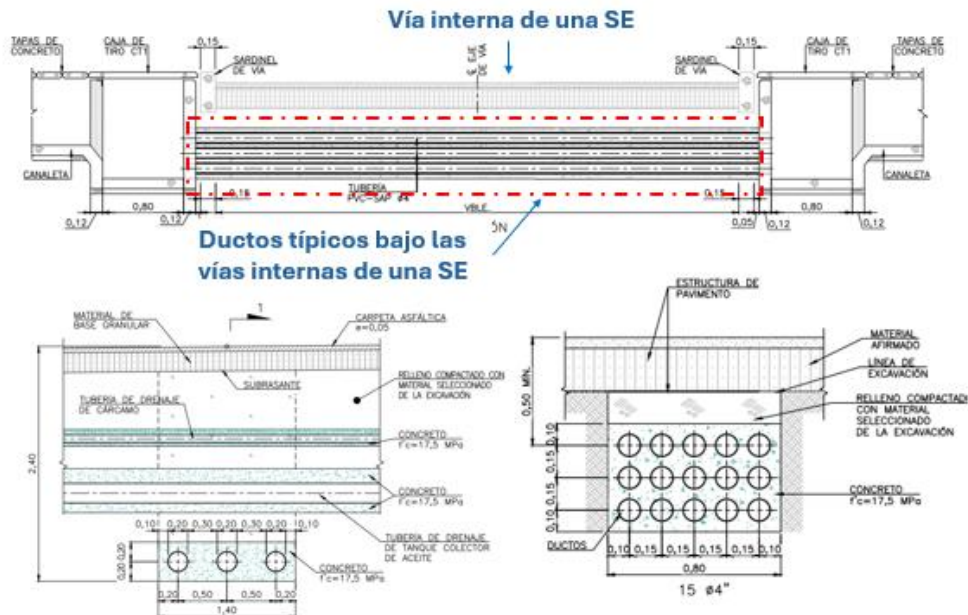
*Disposición de ductos subterráneos en una Subestación Eléctrica.*



*Nota:* Adaptado de plano PE-YANA-13Z01-S-04-K2402, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú).

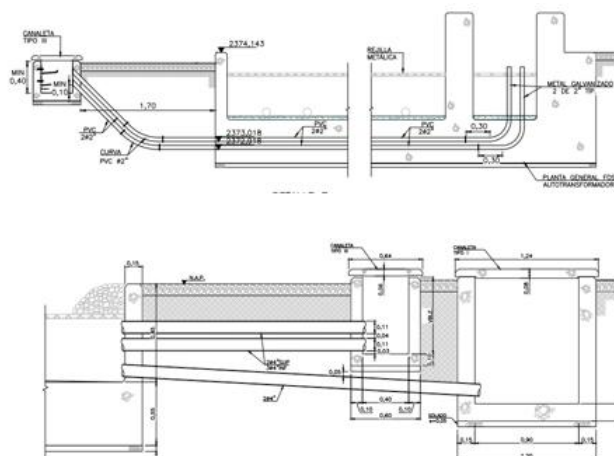
**Figura 13**

*Ductos bajo vía de una Subestación Eléctrica.*



*Nota:* Adaptado de plano PE-YANA-13Z01-S-04-K2402, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú).

### *Ductos en típicos en una Subestación Eléctrica.*



### 4.3. Características técnicas de las vías internas

- a) **Ancho de las vías internas:** El ancho debe permitir el paso de vehículos de mantenimiento, grúas y camiones. El ancho recomendado varía entre 3 y 6 metros. Según el Manual de Diseño Geométrico del MTC, el ancho de las vías debe basarse en el tipo y tamaño de los vehículos que se espera que las utilicen (DG, 2018).
- b) **Capacidad de carga:** Las vías internas deben estar diseñadas para soportar el peso de vehículos pesados y maquinaria utilizada para el mantenimiento y la operación de la subestación. Esto implica el uso de materiales de alta resistencia en la construcción de la base y la capa de rodadura de las vías. Un artículo sobre diseño de pavimentos destaca la importancia de seleccionar materiales con la resistencia y durabilidad adecuadas para soportar las cargas de tráfico esperadas (Huang, 2004).
- c) **Superficie y drenaje:** La superficie de las vías internas debe ser antideslizante y resistente al desgaste para evitar accidentes y daños en los equipos. Es esencial que exista un adecuado sistema de drenaje que prevenga la acumulación de agua en las vías. Las cunetas, zanjas de filtro, cajas de inspección y tuberías colectoras en el sistema de drenaje interno de una subestación eléctrica cumplen una función fundamental: gestionar y evacuar eficientemente el agua acumulada debido a

precipitaciones, lavado de equipos o infiltraciones. Este sistema debe ser diseñado para prevenir el estancamiento de agua que podría comprometer la integridad de los equipos eléctricos, la estabilidad del terreno y la seguridad operativa, garantizando así un entorno seco y controlado (ANSI/IEEE, 2017).

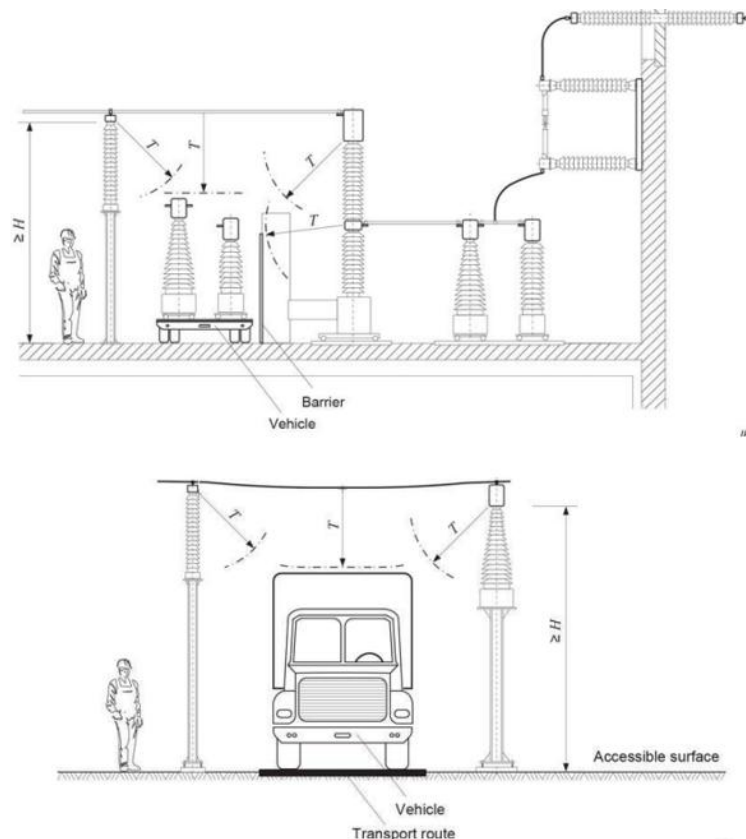
- d) **Organización y señalización interna:** Para facilitar la circulación dentro de la subestación, las vías internas deben estar organizadas de manera eficiente, con señalización clara que identifique las rutas principales y las zonas de riesgo. Esto también incluye el marcaje de zonas de estacionamiento para vehículos de mantenimiento y áreas restringidas.
- e) **Ductos eléctricos subterráneos:** Un aspecto crucial a considerar es la disposición de los ductos eléctricos subterráneos que transportan los cables de potencia y control entre los equipos de la subestación. Estos ductos suelen ubicarse por debajo de las vías internas, por lo que es fundamental que el diseño vial contemple protecciones adicionales para evitar cualquier daño o interferencia durante la construcción o el mantenimiento de las vías. Además, se deben incluir accesos adecuados para la inspección y mantenimiento de los cables sin afectar las vías (IEEE Std 484, 2019).
- f) **Disposición física de los equipos:** La disposición física dentro de la subestación debe asegurar que los equipos clave, como transformadores, interruptores, y bancos de reactores, estén distribuidos de manera que se mantengan las distancias de seguridad necesarias entre ellos. Esto minimiza el riesgo de interferencias electromagnéticas, facilita el acceso a los equipos para labores de mantenimiento y reparación, y mejora la seguridad operativa. Además, es crucial prever espacios amplios para la instalación de futuros equipos o expansiones, considerando los márgenes adecuados para la seguridad (IEC 61936, 2021).

**Distancias de seguridad:** según IEC 61936 Las distancias de seguridad entre los equipos eléctricos en una subestación son esenciales para prevenir accidentes y garantizar un entorno de trabajo seguro. La normativa IEC 61936 establece las distancias mínimas de seguridad que deben respetarse en instalaciones eléctricas de alta tensión. Estas distancias varían en función de la tensión nominal de los equipos y se aplican tanto para distancias horizontales como verticales. Estas distancias permiten garantizar un aislamiento adecuado, evitar contactos directos e indirectos con partes energizadas, y asegurar que el personal de mantenimiento pueda operar en un entorno seguro. Adicionalmente, estas distancias deben ser respetadas al diseñar las vías internas, para asegurar que los vehículos y equipos de mantenimiento puedan circular sin comprometer la seguridad.

- Para tensiones de hasta 72,5 kV, la distancia mínima recomendada es de 1,0 metro.
- Para tensiones de 123 kV, se requiere una distancia de al menos 1,4 metros.
- Para tensiones de 245 kV, la distancia mínima es de 2,4 metros.
- En instalaciones de 420 kV, la distancia mínima de seguridad debe ser de 3,6 metros.

**Figura 15**

*Esquema de distancia de seguridad en una subestación eléctrica.*



Nota: Adaptado de IEC 61936, "Power installations exceeding 1 kV a.c." (esquema de distancias de seguridad en una subestación eléctrica)

- g) **Acceso a zonas críticas:** Las vías internas deben proporcionar acceso directo y seguro a todas las áreas críticas de la subestación, como la sala de control, los transformadores y los equipos de alta tensión. La disposición de estas vías debe garantizar que se puedan realizar labores de mantenimiento sin interrumpir el flujo normal de operación, respetando las distancias de seguridad entre los equipos.

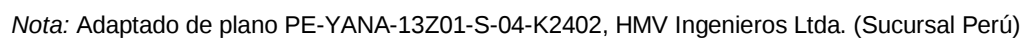
#### **4.4. Diseño y planificación de las vías internas**

El diseño de las vías internas, la disposición física de los equipos y las distancias de seguridad dentro de una subestación eléctrica debe estar alineado con el diseño general de la instalación. Es crucial que estas vías y la disposición de los equipos sean planificadas

de manera que faciliten el acceso a todas las áreas necesarias sin generar interferencias en la operatividad de la subestación, mientras se respeta la ubicación de los ductos eléctricos subterráneos y se mantienen las distancias de seguridad recomendadas por normativas como la IEC 61936 y la NFA 850. Los aspectos clave que deben considerarse incluyen:

- **Estudio geotécnico:** Es necesario realizar un estudio geotécnico del suelo para asegurar que las vías internas sean estables y capaces de soportar las cargas impuestas por el tráfico de vehículos y maquinaria pesada, teniendo en cuenta la ubicación de los ductos subterráneos.
- **Trazado y disposición de las vías:** Las vías internas deben estar dispuestas de manera eficiente para minimizar el recorrido entre las diferentes áreas de la subestación. Es fundamental evitar curvas pronunciadas y pendientes excesivas para facilitar el movimiento seguro de los vehículos, asegurándose además de no comprometer la integridad de los ductos eléctricos subterráneos (MTC, 2018).
- **Protección de los ductos eléctricos subterráneos:** En el diseño vial, se debe prever la instalación de protecciones adicionales para los ductos, como recubrimientos especiales, cámaras de inspección, o sistemas de monitoreo que permitan identificar cualquier potencial problema con los cables. Esto es particularmente importante en zonas donde los vehículos pesados transiten regularmente (IEEE Std 484, 2019).
- **Disposición física de los equipos:** La disposición de los equipos debe planificarse de acuerdo con criterios de seguridad, accesibilidad y eficiencia operativa. Se deben respetar las distancias mínimas de seguridad entre equipos de alta tensión y proporcionar acceso adecuado para el mantenimiento de cada componente. También es importante dejar espacio para futuras expansiones o modificaciones en la subestación (Oliveira et al., 2019).

*Disposición de vías en una subestación eléctrica.*



## Capítulo V. Evaluación y análisis de pavimentos rígidos y flexibles en una subestación eléctrica

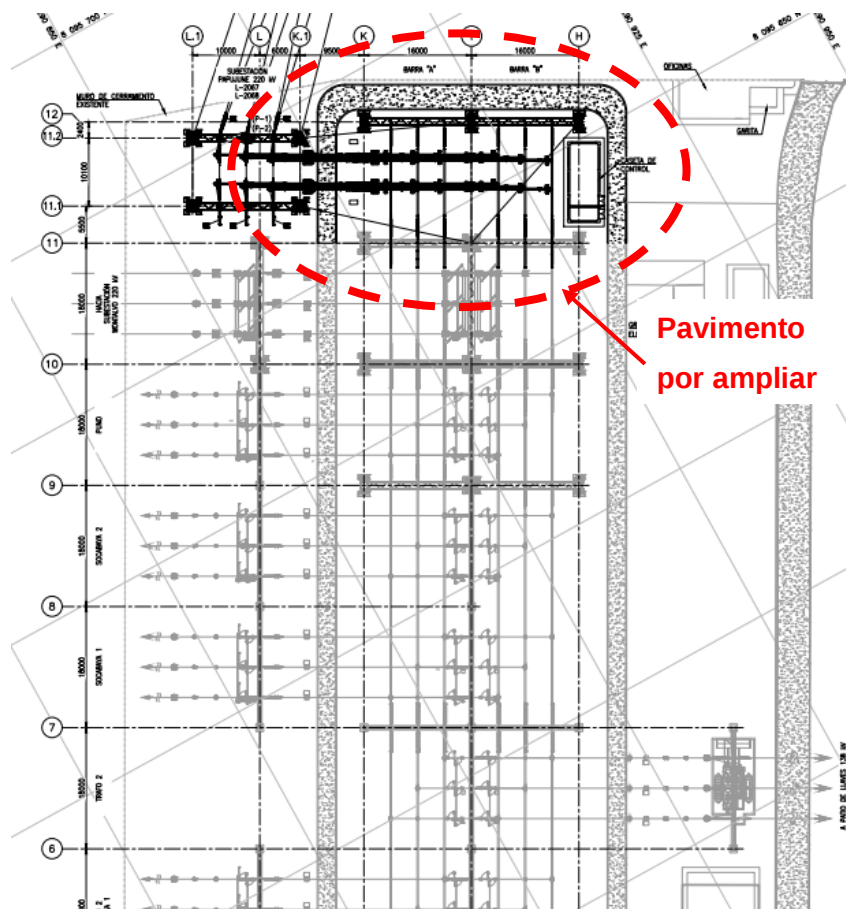
### 5.1. Ampliación de la subestación Moquegua 220kV

La subestación Moquegua forma parte del proyecto Quellaveco, la cual pertenece a la concesión otorgada a favor de la empresa Anglo American Quellaveco S.A, la cual tiene la concesión definitiva para desarrolla la actividad de transmisión de energía eléctrica en la línea de transmisión en 220kV SE. Moquegua-SE. Papujune y subestaciones asociadas, (Ministerio de Energía y Minas, 2020).

Como parte de la ampliación de esta subestación Moquegua, se ha planteado el diseño de pavimentos para sus vías internas, considerando las condiciones específicas de carga y tránsito de vehículos pesados.

### Figura 17

*Disposición física de la Subestación Moquegua.*



*Nota:* Adaptado de plano PE-MOPA-GP024-S-01-K2402, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú).

### 5.1.1 Diseño pavimento rígido SE Moquegua.

#### Cálculo de ejes equivalentes.

**Tabla 22**

*Cálculo de ejes equivalentes.*

| Vehículo | Eje equivalente $EE_{8,2t}$ |                     |                     |                     |
|----------|-----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|          | Eje delantero               |                     | Eje posterior       |                     |
|          | Simple                      | Simple rueda dobles | Tandem              | Tridem              |
|          | $EE=[P/6,6]^{4.1}$          | $EE=[P/8,2]^{4.1}$  | $EE=[P/13,3]^{4.1}$ | $EE=[P/17,5]^{4.0}$ |
| PESO(TN) | 7                           | 11                  | 0                   | 0                   |
| C2       | 1,27                        | 3,33                | 0,00                | 0,00                |

Nota: Elaboración propia

**Tabla 23**

*Parámetros de vía y Tráfico Vehicular*

| Parámetro             | Valor | Descripción                                                             |
|-----------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------|
| $IMD_p=$              | 5     | Se proyecta 5 vehículos C2 diarios (HMV Ingenieros Ltda. Sucursal Perú) |
| $F_d=$                | 0,5   | Se considera 1 calzada con 2 sentidos, ver Tabla 3                      |
| $F_c=$                | 1     | Se considera un tránsito homogéneo en ambos sentidos, ver Tabla 3,      |
| $F_{vp} (EE_{8,2t})=$ | 4,61  | Vehículo C2                                                             |
| $F_p=$                | 1     | El 90% de la presión en los neumáticos es 80 PSI*                       |

Nota: Elaboración propia

Con los datos indicados en Tabla 22 y Tabla 23 se calcula los ejes equivalentes por cada tipo de vehículo  $EE_{día-carril}$

$$EE_{día-carril}: IMD_{pi}, F_d, F_c, F_{vpi}, F_{pi}=11,52$$

El factor de crecimiento acumulado por tipo de vehículo  $F_{ca}$  se calcula considerando lo indicado en los criterios de diseño del proyecto Quellaveco correspondiente a la ampliación de la subestación Moquegua

$$F_{ca} : \frac{(1+r)^n - 1}{r}$$

Donde,

$r$ : 2% Tasa anual de crecimiento  
 $n$ : 25 años Periodo de diseño

$$F_{ca} = 32,03$$

Por lo tanto, el número de ejes equivalentes simples W18 es el siguiente:

$$W_{18} = \sum [EE_{\text{día-carril}}, Fca, 365] = 134671,08$$

### **Módulo de rotura (MR)**

De acuerdo con la Tabla 18, para un  $W_{18} = 134671,08$  de debería considerar un Módulo de Ruptura  $MR = 40 \text{ kg/cm}^2$  y una resistencia a la compresión de  $F'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ , Sin embargo, el estudio de suelo realizado en la zona de la subestación indica que se deberá usar una resistencia a la compresión de  $F'c$  de 31 MPa, asociado a un Módulo de Ruptura  $MR$  de  $42 \text{ kg/cm}^2$ .

### **Módulo de elasticidad (e)**

Se considera una resistencia de la compresión del concreto de 31 Mpa,

$$E(\text{psi}) = 57000[F'c]^{0,5}$$

$$E = 3859534,03 \text{ psi} = 26610,50 \text{ Mpa}$$

### **Coefficiente desviación estándar normal $Z_R$**

De acuerdo con la Tabla 15, para un  $W_{18} = 134671,08$  se considera un nivel de tráfico TP0 con un nivel de confiabilidad  $R=65\%$  que le corresponde una desviación estándar normal de -0,385.

### **Desviación estándar combinada $s_0$**

Se considera un valor de 0,35 a la desviación estándar combinada, según lo recomendado en el manual de carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección: Suelo y Pavimentos (MTC, 2014).

### **Variación de servicialidad ( $\Delta PSI$ )**

De acuerdo con la Tabla 16, para un  $W_{18} = 134671,08$  se considera una variación de servicialidad igual a 2,10.

### **Índice de serviciabilidad o servicio final (pt)**

De acuerdo con la Tabla 16, para un  $W_{18} = 134671,08$  se considera una servicialidad final igual a 2,00.

### **Transferencia de carga (j)**

De acuerdo con la Tabla 21 y dadas las condiciones de concepción del diseño; es decir, losas en concreto con varillas pasa-losas en juntas transversales y juntas de

dilatación; y además la confinación de las losas y las capas granulares con cunetas perimetrales, se adopta un valor de  $J = 2,8$ .

### Drenaje ( $C_d$ )

Para las condiciones de la subestación se adopta un valor de  $C_d = 1,0$ . Tomando como referencia al manual de carreteras suelos y pavimentos (MTC, 2014).

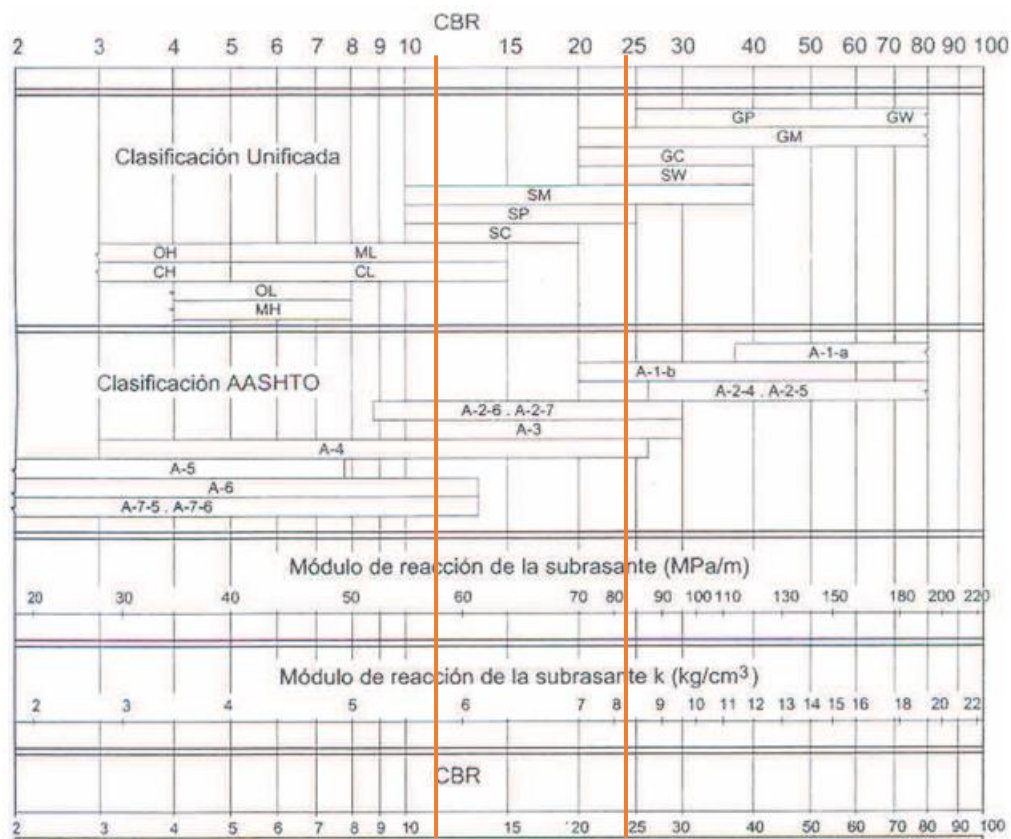
### Módulo de reacción combinado ( $K_C$ )

Según el estudio de suelo realizado en la subestación Moquegua, se tiene los siguientes valores de CBR.

- Para un CBR del 40 % (Sub base)
- Para un CBR del 15,8% (sub rasante)

**Figura 18**

*Correlación CBR y Módulo de reacción de la sub-rasante.*



*Nota:* fuente [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/manuales.html](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html). (Tabla para el cálculo del módulo de reacción).

$$K_C = \left[ 1 + \left( \frac{h}{38} \right)^2 \times \left( \frac{K_1}{K_0} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{0,5} \times K_0$$

Donde:

|                                        |                                                       |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| $K_1 \left( \frac{kg}{cm^3} \right)$ : | 12 (Coeficiente de reacción de la sub base granular), |
| $K_C \left( \frac{kg}{cm^3} \right)$ : | 7,22 (Coeficiente de reacción combinado),             |
| $K_0 \left( \frac{kg}{cm^3} \right)$ : | 6,5 (Coeficiente de reacción de la subrasante),       |
| $h(cm)$ :                              | 15 (Espesor de la subbase granular),                  |

De acuerdo con el valor de CBR, para la base granular y subbase se obtiene una reacción combinado  $K_C$  de 7,22 kg/cm<sup>3</sup> (70,85 Mpa).

**Tabla 24**

*Parámetros de diseño Pavimento Rígido*

|                              |              |          |
|------------------------------|--------------|----------|
| Módulo de rotura             | $M_R$ , Mpa  | 4,12     |
| Nivel de confiabilidad       | $R$          | 65%      |
| Desviación Normal            | $Z_R$        | -0,385   |
| Desviación Estándar          | $S_o$        | 35%      |
| Variación Serviciabilidad    | $\Delta PSI$ | 2,1      |
| Serviciabilidad final        | $P_t$        | 2        |
| Espesor de concreto          | $D$ , mm     | 150      |
| Transferencia de carga       | $J$          | 2,8      |
| Drenaje                      | $C_d$        | 1        |
| Módulo de Elasticidad        | $E_c$ , Mpa  | 26610,50 |
| Módulo de reacción combinado | $K_C$ , Mpa  | 70,85    |

Nota: Elaboración propia

Con los parámetros calculados se procede a verificar que el espesor del concreto cumpla la ecuación propuesta por la metodología AASTHO 93.

$$\log_{10}(W_{18}) \leq Z_R S_o + 7,35 \log_{10}(D + 25,4) - 10,39 + \frac{\log_{10} \left( \frac{\Delta PSI}{4,5 - 1,5} \right)}{1 + \frac{1,25 \times 10^{19}}{(D + 25,4)^{8,46}}} + (4,22 - 0,32 P_t) \log_{10} \left( \frac{M_R C_d (0,09 D^{0,75} - 1,132)}{1,51 J (0,09 D^{0,75} - \frac{7,38}{(\frac{E_c}{k})^{0,25}})} \right)$$

$$5,129 \leq 6,206$$

Se verifica que para una subbase granular de 15cm y un concreto de 15 cm de espesor, se obtiene un factor de 6,206 que es mayor a 5,129.

### 5.1.2 Diseño pavimento flexible SE Moquegua

#### Cálculo de ejes equivalentes.

**Tabla 25**

*Cálculo de ejes equivalentes*

| Vehículo | Eje equivalente $EE_{8,2t}$ |                     |                 |                     |
|----------|-----------------------------|---------------------|-----------------|---------------------|
|          | Eje delantero               |                     | Eje posterior   |                     |
|          | Simple                      | Simple rueda dobles | Tandem          | Tridem              |
|          | $EE=[P/6,6]^4$              | $EE=[P/8,2]^4$      | $EE=[P/15,1]^4$ | $EE=[P/21,8]^{3,9}$ |
| PESO(TN) | 7                           | 11                  | 0               | 0                   |
| C2       | 1,27                        | 3,24                | 0,00            | 0,00                |

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 26**

*Parámetros de vía y Tráfico Vehicular*

| Parámetro             | Valor | Descripción                                                             |
|-----------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------|
| $IMD_p=$              | 5     | Se proyecta 5 vehículos C2 diarios (HVM Ingenieros Ltda. Sucursal Perú) |
| $F_d=$                | 0,5   | Se considera 1 calzada con 2 sentidos, ver Tabla 3                      |
| $F_c=$                | 1     | Se considera un tránsito homogéneo en ambos sentidos, ver Tabla 3,      |
| $F_{vp} (EE_{8,2t})=$ | 4,50  | Vehículo C2                                                             |
| $F_p=$                | 1     | El 90% de la presión en los neumáticos es 80 PSI*                       |

*Nota:* Elaboración propia

Con los datos indicados en Tabla 22 y Tabla 23 se calcula los ejes equivalentes por cada tipo de vehículo  $EE_{día-carril}$

$$EE_{día-carril}: IMD_{pi}, F_d, F_c, F_{vpi}, F_{pi}=11,26$$

El factor de crecimiento acumulado por tipo de vehículo  $F_{ca}$  se calcula considerando lo indicado en los criterios de diseño del proyecto Quellaveco correspondiente a la ampliación de la subestación Moquegua

$$F_{ca} : \frac{(1+r)^n - 1}{r}$$

Donde,

$r$ : 2% Tasa anual de crecimiento  
 $n$ : 25 años Periodo de diseño

$$F_{ca} = 32,03$$

Por lo tanto, el número de ejes equivalentes simples  $W_{18}$  es el siguiente:

$$W_{18} = \sum [ EE_{día-carril}, F_{ca}, 365 ] = 131631,21$$

### Módulo de resiliencia ( $M_R$ )

Para el cálculo del módulo de resiliencia se hace uso del valor de CBR según la siguiente ecuación:

$$M_R(Psi) = 2555 * CBR^{0,64}$$

**Tabla 27**

*Módulo de Resiliencia según CBR*

|             | CBR (%) | Mr (Psi) |
|-------------|---------|----------|
| Sub rasante | 15,8    | 14946,22 |
| Sub base    | 40      | 27083,78 |
| Base        | 80      | 42205,45 |

Nota: Elaboración propia

### Coefficiente desviación estándar normal $Z_R$

De acuerdo con la Tabla 15, para un  $W_{18} = 131631,21$  se considera un nivel de tráfico TP0 con un nivel de confiabilidad  $R=65\%$  que le corresponde una desviación estándar normal de -0,385.

### Desviación estándar combinada $s_0$

Se considera un valor de 0,45 a la desviación estándar combinada, según lo recomendado en el manual de carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección: Suelo y Pavimentos (MTC, 2014)

### Variación de servicialidad ( $\Delta PSI$ )

De acuerdo con la Tabla 8, para un  $W_{18} = 131631,21$  se considera una variación de servicialidad igual a 1,8.

### Índice de serviciabilidad o servicio final (pt)

De acuerdo con la Tabla 8, para un  $W_{18} = 131631,21$  se considera una serviciabilidad final igual a 2,0.

### Drenaje ( $C_d$ )

Para las condiciones de la subestación se adopta un valor de  $C_d = 1,0$ .

### Coefficiente estructural ( $a_i$ )

Para calcular el número estructural, se toman en cuenta los valores descritos en la Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 11.

**Tabla 28**Coeficiente estructural SE Moquegua

| Coeficiente Estructural |                                                         |       |
|-------------------------|---------------------------------------------------------|-------|
| $a_1/cm$                | Tratamiento Superficial Bicapa,                         | 0     |
| $a_1/cm$                | Carpeta asfáltica en caliente                           | 0,170 |
| $a_2/cm$                | Base Granular CBR 80%, compactada al 100% de la MDS     | 0,052 |
| $a_3/cm$                | Sub Base Granular CBR 40%, compactada al 100% de la MDS | 0,047 |

Nota: Elaboración propia

**Coeficiente de drenaje ( $m_i$ )**

Los coeficientes de drenaje para la base y la subbase, respectivamente, se han considerado iguales a 1,00, dado que el pavimento de la subestación eléctrica cuenta con un sistema de drenaje eficiente.

**Tabla 29**Coeficiente de drenaje SE Moquegua

| Coeficiente Drenaje |   |
|---------------------|---|
| $m_2$               | 1 |
| $m_3$               | 1 |

Nota: Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

**Cálculo de numero estructural (SN)**

Iterando la ecuación siguiente, se establece el valor del número estructural necesario para el diseño del pavimento flexible con tratamiento superficial bicapa.

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R S_o + 9.36 \log_{10}(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + \underbrace{2.32 \log_{10}(M_R) - 8.07}_{* \log_{10}(W_{18})}$$

**Tabla 30**Número Estructural SE Moquegua

| Sub Rasante      |              |
|------------------|--------------|
| <b>W18</b>       | 131631,208   |
| <b>LOG(W18)</b>  | 5,119        |
| <b>*LOG(W18)</b> | 5,119        |
| <b>SN</b>        | <b>1,610</b> |

Nota: Elaboración propia

$$SN = a_1 \times d_1 + a_2 \times d_2 \times m_2 + a_3 \times d_3 \times m_3$$

|                 |                                                                                             |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| $a_1, a_2, a_3$ | coeficientes estructurales de las capas: Superficial, base y sub base, de forma respectiva, |
| $d_1, d_2, d_3$ | espesores (en centímetro) de las capas: Superficial, base y sub base, de forma respectiva,  |
| $m_2, m_3$      | coeficientes de drenaje para las capas de base y sub base, de forma respectiva,             |

#### 5.1.2.1 Cálculo de espesores (SN) Tratamiento superficial bicapa.

**Tabla 31**

*Cálculo SN SE Moquegua tratamiento superficial bicapa*

| Coeficiente Estructural |       | Coeficiente Drenaje |   | SN   |       |
|-------------------------|-------|---------------------|---|------|-------|
| $a_1/cm$                | 0     |                     |   | /SN1 | 0,00  |
| $a_2/cm$                | 0,052 | $m_2$               | 1 | /SN2 | 1,246 |
| $a_3/cm$                | 0,047 | $m_3$               | 1 | /SN3 | 0,364 |

Nota: Elaboración propia

**Tabla 32**

*Cálculo SN Suministrado SE Moquegua tratamiento superficial bicapa*

| Espesor suministrado   |           | SN Suministrado      |              |
|------------------------|-----------|----------------------|--------------|
| <b>Carpeta h1(cm)</b>  | <b>0</b>  | <b>*SN1 TSB</b>      | <b>0,000</b> |
| <b>Base h2(cm)</b>     | <b>25</b> | <b>*SN2 Base</b>     | <b>1,300</b> |
| <b>Sub base h3(cm)</b> | <b>15</b> | <b>*SN3 Sub base</b> | <b>0,705</b> |

Nota: Elaboración propia

$$SN \leq SN \text{ Sumistrado}$$

$$1,610 \leq 2,005$$

Se verifica que para una base granular de 25cm y una subbase de 15 cm de espesor, se obtiene un numero estructural SN de 2,005 que es mayor a 1,610.

#### 5.1.2.2 Cálculo de espesores (SN) Carpeta asfáltica en caliente

**Tabla 33**

*Cálculo SN SE Moquegua carpeta asfáltica en caliente*

| Coeficiente Estructural |       | Coeficiente Drenaje |   | SN   |       |
|-------------------------|-------|---------------------|---|------|-------|
| $a_1/cm$                | 1,010 |                     |   | /SN1 | 1,010 |
| $a_2/cm$                | 0,052 | $m_2$               | 1 | /SN2 | 0,236 |
| $a_3/cm$                | 0,047 | $m_3$               | 1 | /SN3 | 0,364 |

Nota: Elaboración propia

*Cálculo SN Suministrado SE Moquegua carpeta asfáltica en caliente*

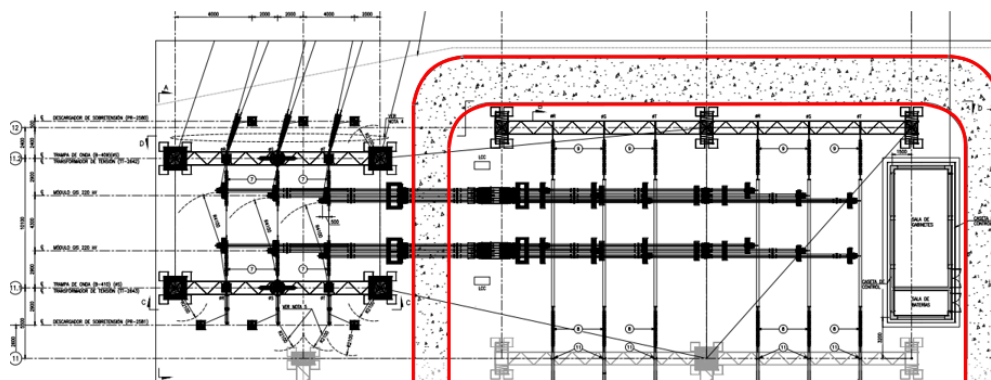
*Nota:* Elaboración propia

$$1,610 \leq 1,800$$

### 5.1.3 Interferencias potenciales en los pavimentos de la SE Moquegua 220 kV

### Figura 19

*Disposición de patio en 220kV de la ampliación SE Moquegua.*



*Nota:* Adaptado de plano PE-MOPA-GP024-S-01-K2402, H MV Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú)

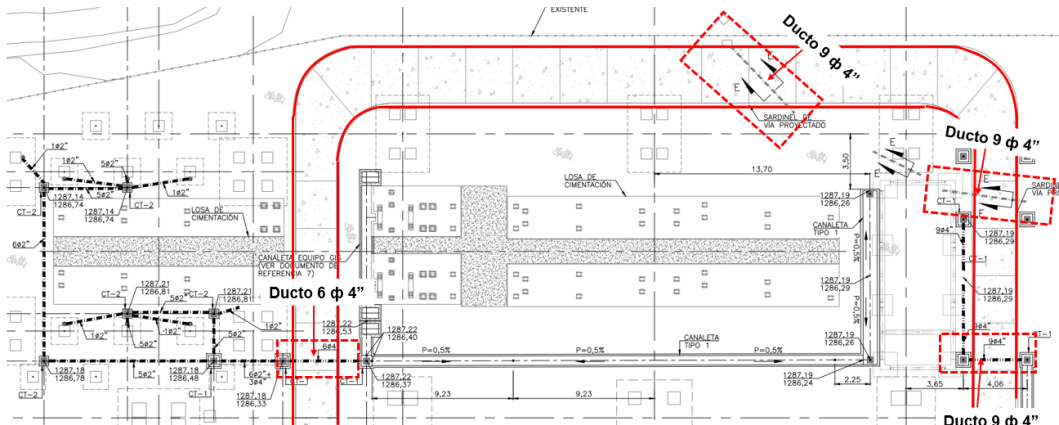
**a) Ductos eléctricos.**

En el patio de 220 kV de la Ampliación de la Subestación Moquegua, los ductos que atraviesan las vías internas tienen diámetros de 4", Estos ductos están organizados en bancos conformados por combinaciones de 6 y 9 ductos, lo que permite una distribución

eficiente de los cables eléctricos que transportan señales y potencia, La disposición de estos ductos garantiza la protección del cableado contra condiciones ambientales adversas y facilita las labores de inspección y mantenimiento, Además, su diseño asegura un flujo ordenado de las conexiones entre los diferentes equipos del sistema, contribuyendo al óptimo funcionamiento de la subestación.

**Figura 20**

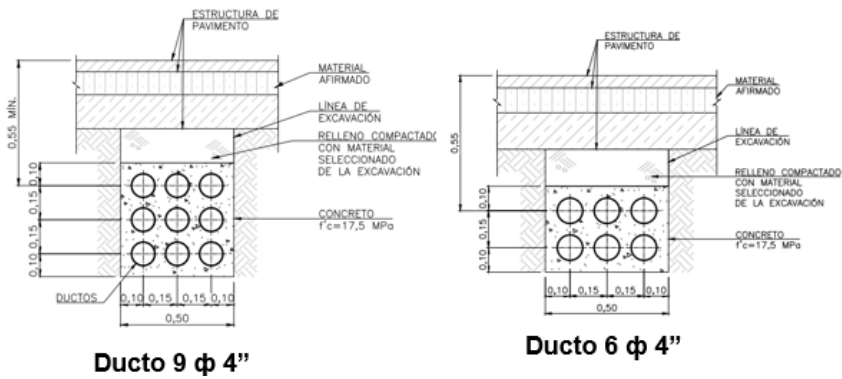
*Banco de ductos en patio 220kV SE Moquegua.*



*Nota:* Adaptado de plano PE-MOPA-GP024-S-01-K2402, HMV Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú)

**Figura 21**

*Sección de Ductos bajo vía en patio 220kV SE Moquegua.*



*Nota:* Adaptado de plano PE-MOPA-GP024-S-01-K2402, HMV Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú)

**Tabla 35**

*Altura de Banco de ductos de la SE Moquegua*

| Banco de Ductos | Ancho de Zanja (m) | Altura mínima de banco de ductos respecto a la vía (m) |
|-----------------|--------------------|--------------------------------------------------------|
| 6 φ 4"          | 0,50               | 0,80                                                   |
| 9 φ 4"          | 0,50               | 0,80                                                   |

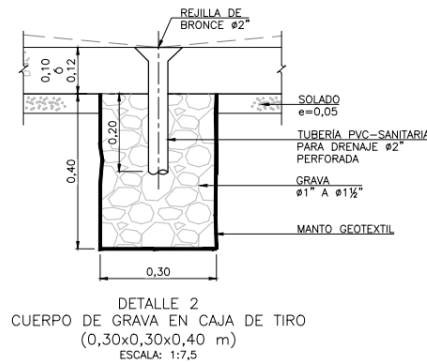
*Nota:* Elaboración propia

## b) Sistema de drenaje.

En el patio de 220 kV correspondiente a la ampliación de la Subestación Moquegua, la red de drenaje está constituida por un sistema de cuerpo de gravas, ubicado estratégicamente en puntos clave como las canaletas y las cajas de tiro, donde se lleva a cabo la inspección del drenaje de los ductos eléctricos. Este sistema no interfiere directamente con las vías internas de la subestación eléctrica; sin embargo, se requiere especial precaución, ya que su funcionamiento depende de la capacidad del terreno para permitir el drenaje del agua.

**Figura 22**

*Detalle drenaje SE Moquegua.*



*Nota:* Adaptado de plano PE-MOPA-GP024-S-01-K2402, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú)

**Tabla 36**

*Altura de cuerpo de grava de la SE Moquegua*

| Diámetro de Tubería | Ancho de Zanja (m) | Altura mínima respecto a la vía (m) |
|---------------------|--------------------|-------------------------------------|
| Ø 2"                | 0,30               | 0,40                                |

*Nota:* Elaboración propia

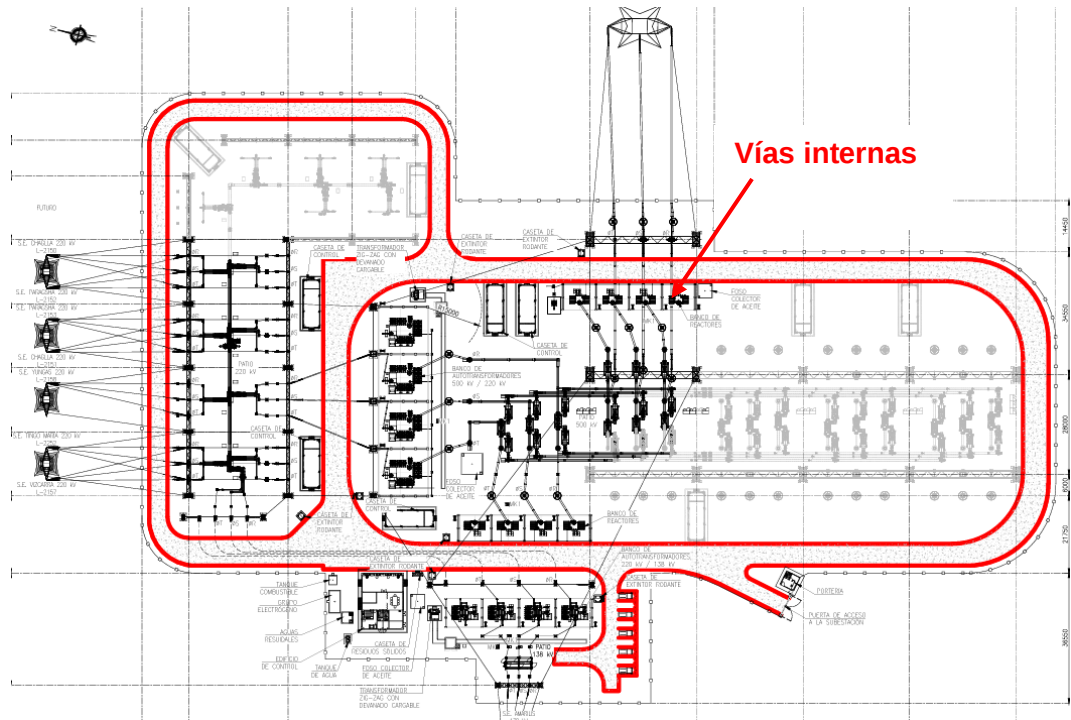
## 5.2. Subestación Yaros 500 kV/ 220kV/ 138kV

La Subestación Yaros 500 kV/220 kV/138 kV forma parte del proyecto denominado "Enlace 500 kV Nueva Yanango - Nueva Huánuco y Subestaciones Asociadas", liderado por el Consorcio Transmantaro S, A, Este proyecto tiene gran relevancia en la infraestructura energética de Perú, (MINEN, 2015),

Dentro del alcance del proyecto para la ejecución de la Subestación Yaros 500 kV/220 kV/138 kV se debe desarrollar el diseño de pavimentos para las vías internas de la subestación.

Figura 23

Disposición física de la Subestación Yaros 500 kV/220 kV/138 kV.



Nota: Adaptado de plano PE-YANA-13Z01-S-04-K2402, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú)

5.2.1 Diseño pavimento rígido SE Yaros

Cálculo de ejes equivalentes.

Tabla 37

Cálculo de ejes equivalentes

| Vehículo | Eje equivalente EE <sub>8,2t</sub> |                           |                            |                            |
|----------|------------------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
|          | Eje delantero                      |                           | Eje posterior              |                            |
|          | Simple                             | Simple rueda dobles       | Tandem                     | Tridem                     |
|          | EE=[P/6,6] <sup>4,1</sup>          | EE=[P/8,2] <sup>4,1</sup> | EE=[P/13,3] <sup>4,1</sup> | EE=[P/17,5] <sup>4,0</sup> |
| PESO(TN) | 7                                  | 11                        | 0                          | 25                         |
| T2S3     | 1,27                               | 3,33                      | 0,00                       | 4,16                       |
| PESO(TN) | 7                                  | 11                        | 0                          | 0                          |
| C2       | 1,27                               | 3,33                      | 0,00                       | 0,00                       |

Nota: Elaboración propia

Tabla 38

Parámetros de vía y Tráfico Vehicular

| Parámetro | Valor | Descripción                                                                     |
|-----------|-------|---------------------------------------------------------------------------------|
| IMDp=     | 5     | Se proyecta 5 vehículos C2 y T2S3 diarios ((HVM Ingenieros Ltda. Sucursal Perú) |
| Fd=       | 0,5   | Se considera 1 calzada con 2 sentidos, ver Tabla 3                              |

| Parámetro             | Valor | Descripción                                                        |
|-----------------------|-------|--------------------------------------------------------------------|
| $F_c=$                | 1     | Se considera un tránsito homogéneo en ambos sentidos, ver Tabla 3, |
| $F_{vp} (EE_{8,2t})=$ | 13,38 | Vehículo C2 y T2S3                                                 |
| $F_p=$                | 1     | El 90% de la presión en los neumáticos es 80 PSI*                  |

Nota: Elaboración propia

Con los datos indicados en Tabla 22 y Tabla 23 se calcula los ejes equivalentes por cada tipo de vehículo  $EE_{día-carril}$

$$EE_{día-carril}: IMD_{pi}, F_d, F_c, F_{vpi}, F_{pi}=33,4506$$

El factor de crecimiento acumulado por tipo de vehículo  $F_{ca}$  se calcula considerando lo indicado en los criterios de diseño del proyecto Nueva Yanango correspondiente a la subestación Yaros.

$$F_{ca} : \frac{(1+r)^n - 1}{r}$$

Donde,

$r$ : 2% Tasa anual de crecimiento  
 $n$ : 25 años Periodo de diseño

$$F_{ca} = 32,03$$

Por lo tanto, el número de ejes equivalentes simples  $W_{18}$  es el siguiente:

$$W_{18} = \sum [ EE_{día-carril}, F_{ca}, 365 ] = 391073,31$$

### Módulo de rotura (MR)

De acuerdo con la Tabla 18, para un  $W_{18} = 391073,31$  de debería considerar un Módulo de Ruptura  $MR = 40 \text{ kg/cm}^2$  y una resistencia a la compresión de  $F'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$ .

### Módulo de elasticidad (e)

Se considera una resistencia de la compresión del concreto de 31 Mpa,

$$E(psi) = 57000[F'_c]^{0,5}$$

$$E = 25044,53 \text{ Mpa}$$

### **Coeficiente desviación estándar normal $Z_R$**

De acuerdo con la Tabla 15, para un  $W_{18} = 391073,31$  se considera un nivel de tráfico TP2 con un nivel de confiabilidad  $R=75\%$  que le corresponde una desviación estándar normal de -0,674.

### **Desviación estándar combinada $S_0$**

Se considera un valor de 0,35 a la desviación estándar combinada, según lo recomendado en el manual de carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección: Suelo y Pavimentos (MTC, 2014).

### **Variación de servicialidad ( $\Delta PSI$ )**

De acuerdo con la Tabla 16, para un  $W_{18} = 391073,31$  se considera una variación de servicialidad igual a 2,10.

### **Índice de serviciabilidad o servicio final (pt)**

De acuerdo con la Tabla 16, para un  $W_{18} = 391073,31$  se considera una servicialidad final igual a 2,00.

### **Transferencia de carga (J)**

De acuerdo con la Tabla 21 y dadas las condiciones de concepción del diseño; es decir, losas en concreto con varillas pasa-losas en juntas transversales y juntas de dilatación; y además la confinación de las losas y las capas granulares con cunetas perimetrales, se adopta un valor de  $J= 2,8$ .

### **Drenaje ( $C_d$ )**

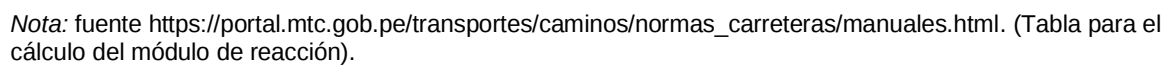
Para las condiciones de la subestación se adopta un valor de  $C_d = 1,0$ .

### **Módulo de reacción combinado ( $K_c$ )**

Según el estudio de suelo realizado en la subestación Yaros, se tiene los siguientes valores de CBR.

- Para un CBR del 40 % (Sub base)
- Para un CBR del 10 % (sub rasante)

*Correlación CBR y Módulo de reacción de la sub-rasante.*



Donde:

$h(cm)$ : 15 (Espesor de la subbase granular),

57

**Tabla 39**

*Parámetros de diseño Pavimento Rígido*

|                              |              |          |
|------------------------------|--------------|----------|
| Módulo de rotura             | $M_R$ , Mpa  | 3,92     |
| Nivel de confiabilidad       | $R$          | 75%      |
| Desviación Normal            | $Z_R$        | -0,674   |
| Desviación Estándar          | $S_o$        | 35%      |
| Variación Serviciabilidad    | $\Delta PSI$ | 2,1      |
| Serviciabilidad final        | $P_t$        | 2        |
| Espesor de concreto          | $D$ , mm     | 150      |
| Transferencia de carga       | $J$          | 2,8      |
| Drenaje                      | $C_d$        | 1        |
| Módulo de Elasticidad        | $E_c$ , Mpa  | 25044,53 |
| Módulo de reacción combinado | $K_c$ , Mpa  | 60,62    |

Nota: Elaboración propia

Con los parámetros calculados se procede a verificar que el espesor del concreto cumpla la ecuación propuesta por la metodología AASTHO 93.

$$\log_{10}(W_{18}) \leq Z_R S_o + 7,35 \log_{10}(D + 25,4) - 10,39 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,5 - 1,5}\right)}{1 + \frac{1,25 \times 10^{19}}{(D + 25,4)^{8,46}}} + (4,22 - 0,32 P_t) \log_{10} \left( \frac{M_R C_d (0,09 D^{0,75} - 1,132)}{1,51 x J (0,09 D^{0,75} - \frac{7,38}{(\frac{E_c}{k})^{0,25}})} \right)$$

$$5,592 \leq 6,001$$

Se verifica que para una subbase granular de 15cm y un concreto de 15 cm de espesor, se obtiene un factor de 6,001 que es mayor a 5,592.

**5.2.2 Diseño pavimento flexible SE Yaros.**

**Cálculo de ejes equivalentes.**

**Tabla 40**

*Cálculo de ejes equivalentes*

| Vehículo | Eje equivalente $EE_{8,2t}$ |                     |                 |                     |
|----------|-----------------------------|---------------------|-----------------|---------------------|
|          | Eje delantero               |                     | Eje posterior   |                     |
|          | Simple                      | Simple rueda dobles | Tandem          | Tridem              |
|          | $EE=[P/6,6]^4$              | $EE=[P/8,2]^4$      | $EE=[P/15,1]^4$ | $EE=[P/21,8]^{3,9}$ |
| PESO(TN) | 7                           | 11                  | 0               | 25                  |
| T2S3     | 1,27                        | 3,24                | 0,00            | 1,71                |
| PESO(TN) | 7                           | 11                  | 0               | 0                   |
| C2       | 1,27                        | 3,24                | 0,00            | 0,00                |

Nota: Elaboración propia

**Tabla 41***Parámetros de vía y Tráfico Vehicular*

| Parámetro             | Valor | Descripción                                                             |
|-----------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------|
| $IMD_p=$              | 5     | Se proyecta 5 vehículos C2 diarios (HNV Ingenieros Ltda. Sucursal Perú) |
| $F_d=$                | 0,5   | Se considera 1 calzada con 2 sentidos, ver Tabla 3                      |
| $F_c=$                | 1     | Se considera un tránsito homogéneo en ambos sentidos, ver Tabla 3,      |
| $F_{vp} (EE_{8,2t})=$ | 10,71 | Vehículo C2 y T2S3                                                      |
| $F_p=$                | 1     | El 90% de la presión en los neumáticos es 80 PSI*                       |

Nota: Elaboración propia

Con los datos indicados en Tabla 22 y Tabla 23 se calcula los ejes equivalentes por cada tipo de vehículo  $EE_{día-carril}$

$$EE_{día-carril}: IMD_{pi}, F_d, F_c, F_{vpi}, F_{pi}=26,78$$

El factor de crecimiento acumulado por tipo de vehículo  $F_{ca}$  se calcula considerando lo indicado en los criterios de diseño del proyecto Quellaveco correspondiente a la ampliación de la subestación Moquegua

$$F_{ca} : \frac{(1 + r)^n - 1}{r}$$

Donde,

$r$ : 2% Tasa anual de crecimiento  
 $n$ : 25 años Periodo de diseño

$$F_{ca} = 32,03$$

Por lo tanto, el número de ejes equivalentes simples  $W_{18}$  es el siguiente:

$$W_{18} = \sum [ EE_{día-carril}, F_{ca}, 365 ] = 313125,55$$

**Módulo de resiliencia ( $M_R$ )**

Para el cálculo del módulo de resiliencia se hace uso del valor de CBR según la siguiente ecuación

$$M_R(PSi) = 2555 * CBR^{0,64}$$

**Tabla 42***Módulo de Resilencia según CBR*

|                    | <b>CBR (%)</b> | <b>Mr (Psi)</b> |
|--------------------|----------------|-----------------|
| <i>Sub rasante</i> | 10             | 11152,98        |
| <i>Sub base</i>    | 40             | 27083,78        |
| <i>Base</i>        | 80             | 42205,45        |

*Nota:* Elaboración propia**Coeficiente desviación estándar normal  $Z_R$** 

De acuerdo con la Tabla 15, para un  $W_{18} = 313125,55$  se considera un nivel de tráfico TP2 con un nivel de confiabilidad  $R=75\%$  que le corresponde una desviación estándar normal de -0,674.

**Desviación estándar combinada  $s_0$** 

Se considera un valor de 0,45 a la desviación estándar combinada, según lo recomendado en el manual de carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección: Suelo y Pavimentos (MTC, 2014).

**Variación de servicialidad ( $\Delta PSI$ )**

De acuerdo con la Tabla 8, para un  $W_{18} = 313125,55$  se considera una variación de servicialidad igual a 1,8.

**Índice de serviciabilidad o servicio final (pt)**

De acuerdo con la Tabla 8, para un  $W_{18} = 313125,55$  se considera una servicialidad final igual a 2,0.

**Drenaje ( $C_d$ )**

Para las condiciones de la subestación se adopta un valor de  $C_d = 1,0$ .

**Coeficiente estructural ( $a_i$ )**

Para calcular el número estructural, se toman en cuenta los valores descritos en la Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 11.

**Tabla 43****Coeficiente estructural SE Moquegua**

| <b>Coeficiente Estructural</b> |                                                         |       |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------|-------|
| $a_1/cm$                       | Tratamiento Superficial Bicapa,                         | 0     |
| $a_1/cm$                       | Carpeta asfáltica en caliente                           | 0,170 |
| $a_2/cm$                       | Base Granular CBR 80%, compactada al 100% de la MDS     | 0,052 |
| $a_3/cm$                       | Sub Base Granular CBR 40%, compactada al 100% de la MDS | 0,047 |

Nota: Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

**Coeficiente de drenaje ( $m_i$ )**

Los coeficientes de drenaje para la base y la subbase, respectivamente, se han considerado iguales a 1,00, dado que el pavimento de la subestación eléctrica cuenta con un sistema de drenaje eficiente.

**Tabla 44****Coeficiente de drenaje SE Moquegua**

| <b>Coeficiente Drenaje</b> |   |
|----------------------------|---|
| $m_2$                      | 1 |
| $m_3$                      | 1 |

Nota: Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

**Cálculo de numero estructural (SN)**

Iterando la ecuación siguiente, se establece el valor del número estructural necesario para el diseño del pavimento flexible.

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R S_o + 9.36 \log_{10}(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + \underbrace{2.32 \log_{10}(M_R) - 8.07}_{* \log_{10}(W_{18})}$$

**Tabla 45****Número Estructural SE Moquegua**

| <b>Sub Rasante</b> |              |
|--------------------|--------------|
| <b>W18</b>         | 313125,55    |
| <b>LOG(W18)</b>    | 5,496        |
| <b>*LOG(W18)</b>   | 5,496        |
| <b>SN</b>          | <b>2,208</b> |

Nota: Elaboración propia

$$SN = a_1 \times d_1 + a_2 \times d_2 \times m_2 + a_3 \times d_3 \times m_3$$

|                 |                                                                                             |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| $a_1, a_2, a_3$ | coeficientes estructurales de las capas: Superficial, base y sub base, de forma respectiva, |
| $d_1, d_2, d_3$ | espesores (en centímetro) de las capas: Superficial, base y sub base, de forma respectiva,  |
| $m_2, m_3$      | coeficientes de drenaje para las capas de base y sub base, de forma respectiva              |

### 5.2.2.1 Cálculo de espesores (SN) Tratamiento superficial bicapa.

**Tabla 46**

*Cálculo SN SE Yaros tratamiento superficial bicapa*

| Coeficiente Estructural |       | Coeficiente Drenaje |   | SN   |       |
|-------------------------|-------|---------------------|---|------|-------|
| $a_1/cm$                | 0     |                     |   | /SN1 | 0,00  |
| $a_2/cm$                | 0,052 | $m_2$               | 1 | /SN2 | 1,55  |
| $a_3/cm$                | 0,047 | $m_3$               | 1 | /SN3 | 0,658 |

Nota: Elaboración propia

**Tabla 47**

*Cálculo SN Suministrado SE Yaros tratamiento superficial bicapa*

| Espesor suministrado                 |    | SN Suministrado      |              |
|--------------------------------------|----|----------------------|--------------|
| <i>Carpeta <math>h_1(cm)</math></i>  | 0  | <b>*SN1 TSB</b>      | <b>0,000</b> |
| <i>Base <math>h_2(cm)</math></i>     | 30 | <b>*SN2 Base</b>     | <b>1,56</b>  |
| <i>Sub base <math>h_3(cm)</math></i> | 15 | <b>*SN3 Sub base</b> | <b>0,705</b> |

Nota: Elaboración propia

$$SN \leq SN \text{ Sumistrado}$$

$$2,208 \leq 2,265$$

Se verifica que para una base granular de 30cm y una subbase de 15 cm de espesor, se obtiene un numero estructural SN de 2,265 que es mayor a 2,208.

### 5.2.2.2 Cálculo de espesores (SN) carpeta asfáltica en caliente.

**Tabla 48**

*Cálculo SN SE Yaros carpeta asfáltica en caliente*

| Coeficiente Estructural |       | Coeficiente Drenaje |   | SN   |       |
|-------------------------|-------|---------------------|---|------|-------|
| $a_1/cm$                | 0,170 |                     |   | /SN1 | 1,279 |
| $a_2/cm$                | 0,052 | $m_2$               | 1 | /SN2 | 0,270 |
| $a_3/cm$                | 0,047 | $m_3$               | 1 | /SN3 | 0,658 |

Nota: Elaboración propia

**Tabla 49**

*Cálculo SN Suministrado SE Yaros carpeta asfáltica en caliente*

| Espesor suministrado |       | SN Suministrado      |              |
|----------------------|-------|----------------------|--------------|
| Carpeta h1(cm)       | 8,00  | <b>*SN1 CAC</b>      | <b>1,360</b> |
| Base h2(cm)          | 20,00 | <b>*SN2 Base</b>     | <b>1,040</b> |
| Sub base h3(cm)      | 0,00  | <b>*SN3 Sub base</b> | <b>2,400</b> |

Nota: Elaboración propia

$$SN \leq SN \text{ Sumistrado}$$

$$2,208 \leq 2,400$$

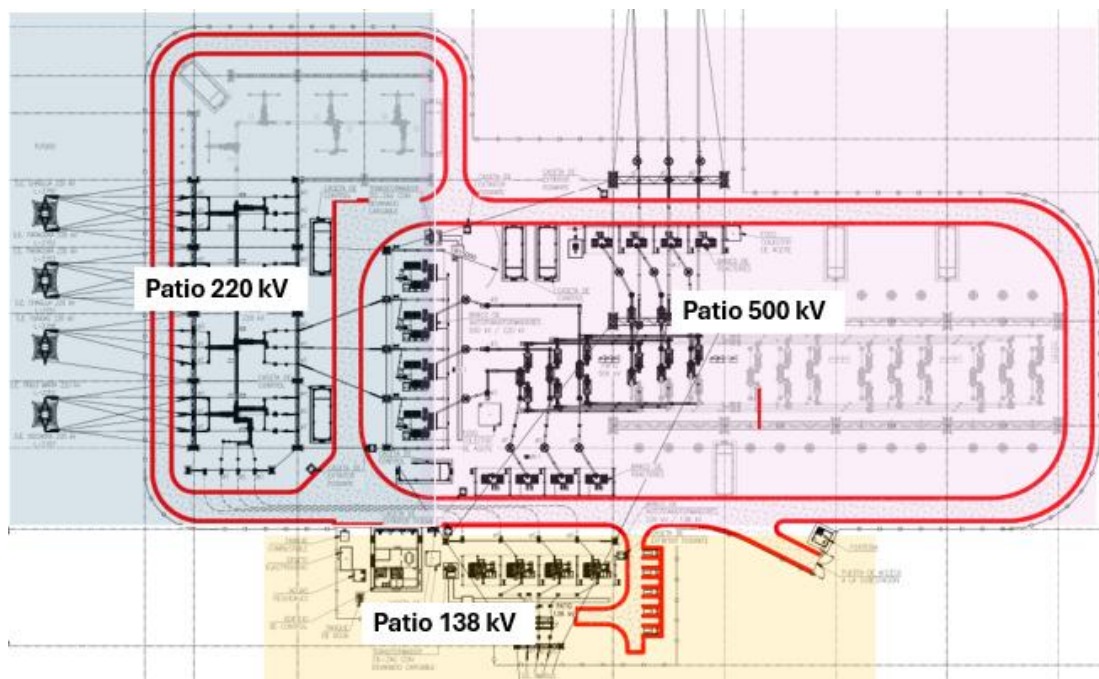
Se verifica que para una base granular de 20cm y una carpeta asfáltica en caliente de 8 cm de espesor, se obtiene un numero estructural SN de 2.400 que es mayor a 2,208.

### 5.2.3 Interferencias potenciales en los pavimentos de la SE Yaros

La Subestación Yaros está conformada por tres patios de operación, uno de 500 kV, de 220 kV y 138kV, En su interior, cuenta con un sistema de banco de ductos eléctricos diseñado para recopilar información de todo el equipamiento, la cual es dirigida hacia las casetas y el edificio de control, Asimismo, dispone de un sistema de drenaje compuesto por filtros, colectores, cunetas, cajas de inspección y buzones, garantizando un adecuado manejo de aguas pluviales.

**Figura 25**

*Disposición de patio en 500/220/138 kV de la SE Yaros.*



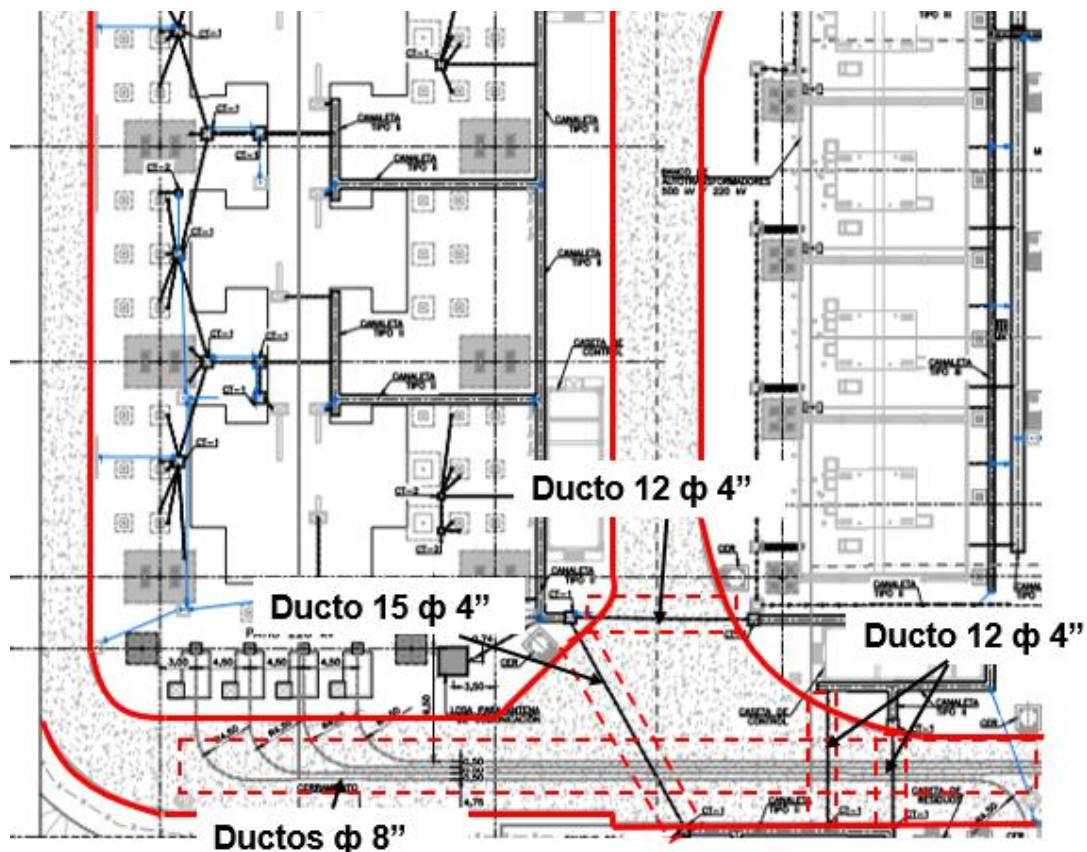
Nota: Adaptado de plano PE-YANA-13Z01-S-04-K2402, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú)

### a) Ductos eléctricos

En el patio de 220 kV de la Subestación Yaros, los ductos que atraviesan las vías internas tienen diámetros de 4", Estos ductos están organizados en bancos conformados por combinaciones de 12 y 15 ductos. Adicionalmente, en la vía del patio de 220 kV existen ductos subterráneos con diámetros de 8 pulgadas, los cuales conectan los transformadores de potencia del patio de 138 kV con el patio de 220 kV. Esta disposición facilita una distribución eficiente de los cables eléctricos encargados de transportar señales y potencia. La disposición de estos ductos garantiza la protección del cableado contra condiciones ambientales adversas y facilita las labores de inspección y mantenimiento, Además, su diseño asegura un flujo ordenado de las conexiones entre los diferentes equipos del sistema, contribuyendo al óptimo funcionamiento de la subestación.

**Figura 26**

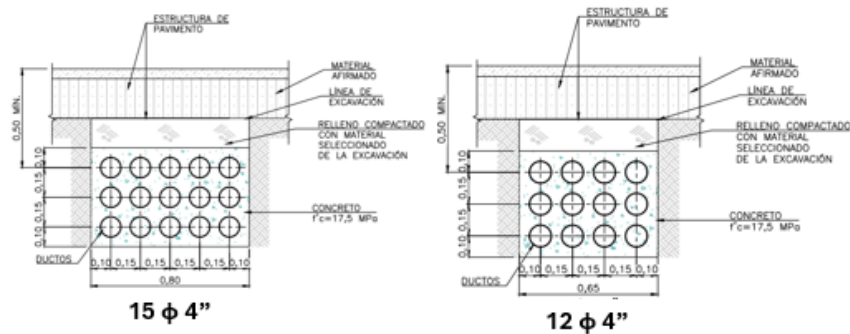
*Banco de ductos en patio 500kV SE Yaros.*



*Nota:* Adaptado de plano PE-YANA-13Z01-S-04-K2402, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú)

**Figura 27**

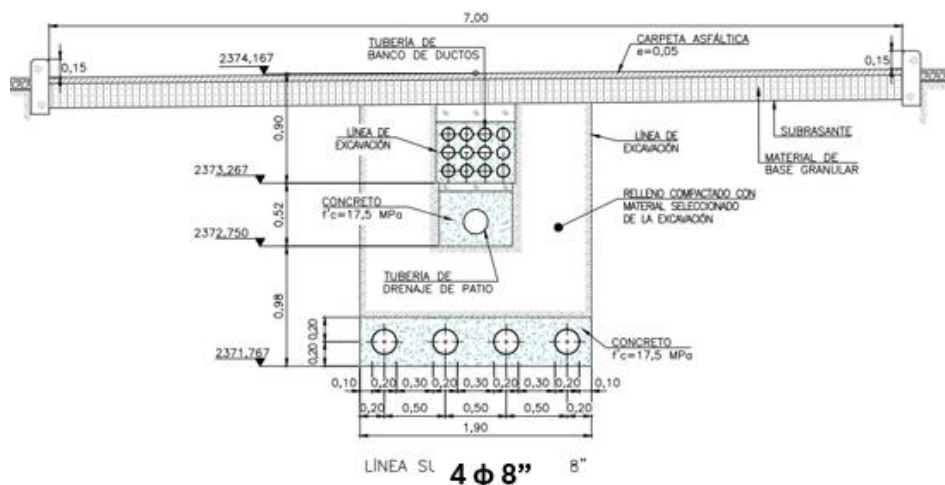
*Sección de Ductos Patio 500kV SE Yaros.*



*Nota:* Adaptado de plano PE-YANA-13Z01-S-04-K2402, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú)

**Figura 28**

*Ductos de Líneas Subterráneas SE Yaros.*

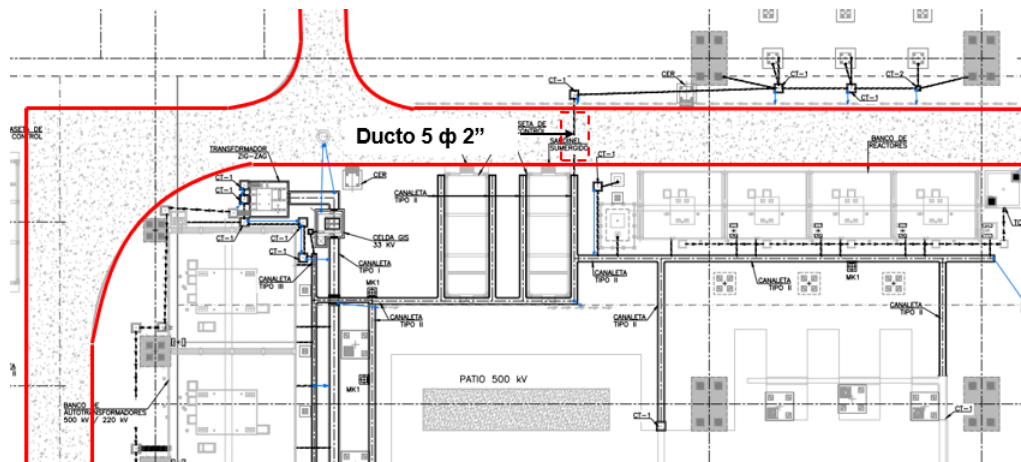


*Nota:* Adaptado de plano PE-YANA-13Z01-S-04-K2402, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú)

En el patio de 500 kV de la Subestación Yaros, los ductos que atraviesan las vías internas tienen diámetros de 2", Estos ductos están organizados en bancos conformados por combinaciones de 5 ductos. Lo que permite una distribución eficiente de los cables eléctricos que transportan señales y potencia, La disposición de estos ductos garantiza la protección del cableado contra condiciones ambientales adversas y facilita las labores de inspección y mantenimiento, Además, su diseño asegura un flujo ordenado de las conexiones entre los diferentes equipos del sistema, contribuyendo al óptimo funcionamiento de la subestación.

**Figura 29**

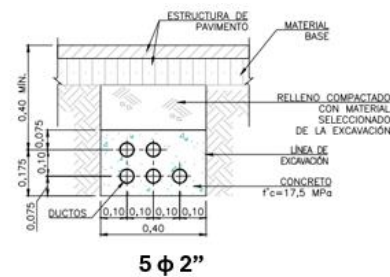
*Banco de ductos en patio 500kV SE Yaros.*



*Nota:* Adaptado de plano PE-YANA-13Z01-S-04-K2402, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú)

**Figura 30**

*Ductos subterráneos de línea de transmisión.*



*Nota:* Adaptado de plano PE-YANA-13Z01-S-04-K2402, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú)

En la Tabla 50 se detalla las alturas mínimas correspondientes a los bancos de ductos ubicados bajo las vías internas de la Subestación Yaros. Esta información es fundamental para garantizar la adecuada instalación y disposición de los ductos dentro del sistema, asegurando su funcionalidad y cumplimiento de las normativas técnicas aplicables.

**Tabla 50**

*Altura de Banco de ductos de la SE Yaros*

| Banco de Ductos | Ancho de Zanja (m) | Altura mínima de banco de ductos respecto a la vía (m) |
|-----------------|--------------------|--------------------------------------------------------|
| 5 φ 2"          | 0,40               | 0,575                                                  |
| 12 φ 4"         | 0,65               | 0,90                                                   |
| 15 φ 4"         | 0,80               | 0,90                                                   |
| 4 φ 8"          | 1,00               | 2,40                                                   |

*Nota:* Elaboración propia

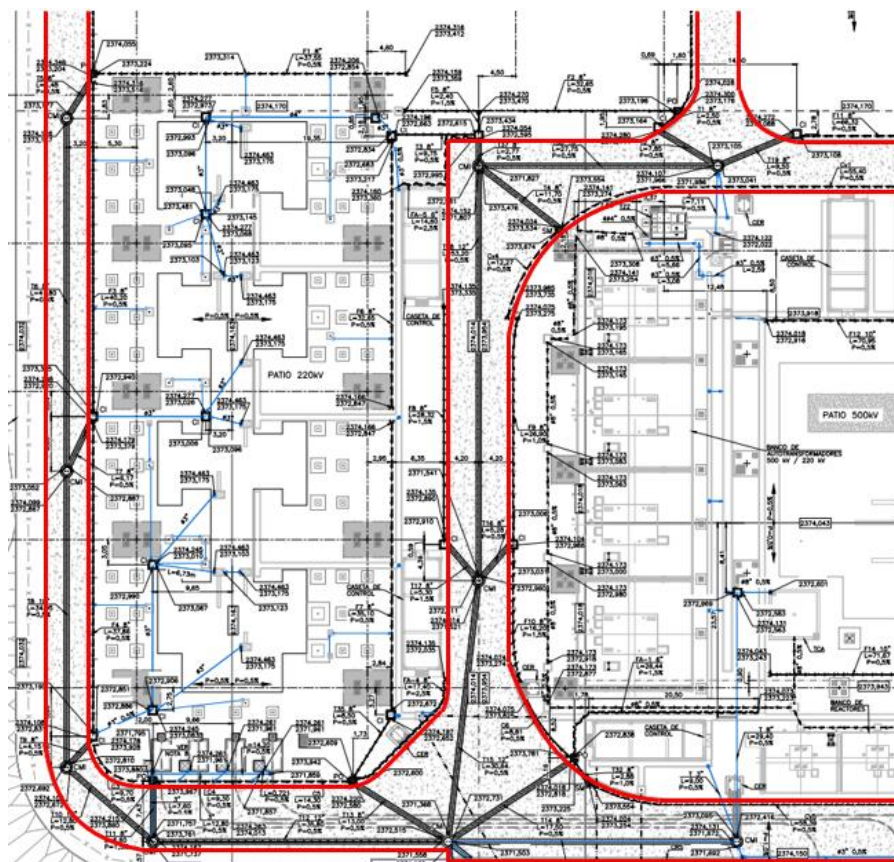
En el patio de 138 kV de la Subestación Yaros, los ductos están ubicados de manera que no atraviesan las vías internas de la subestación, Por consiguiente, no generan ningún impacto directo sobre dichas vías.

## b) Sistema de drenaje

En el patio de 500 kV, 220kV y 138kV de la Subestación Yaros, la red de drenaje está compuesta por cunetas diseñadas para captar las aguas provenientes de las vías, de acuerdo con el sistema de bombeo implementado, Además, cuenta con filtros y colectores ubicados estratégicamente en los perímetros del patio, Dentro de las vías internas, se encuentran buzones y tuberías colectoras embebidas en concreto, Los buzones están alineados al nivel de las vías para evitar interferencias y desniveles que puedan afectar la circulación de los vehículos, Asimismo, las tuberías colectoras están enterradas a una profundidad adecuada, garantizando que no comprometan la integridad estructural de las vías.

**Figura 31**

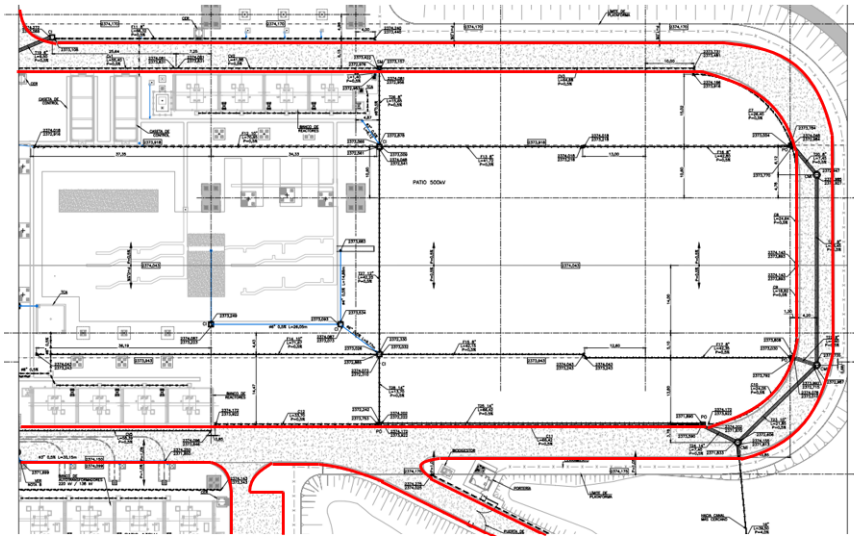
*Red de drenaje en patio de 220 kV SE Yaros.*



*Nota:* Adaptado de plano PE-YANA-13Z01-S-04-K2402, HMV Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú)

**Figura 32**

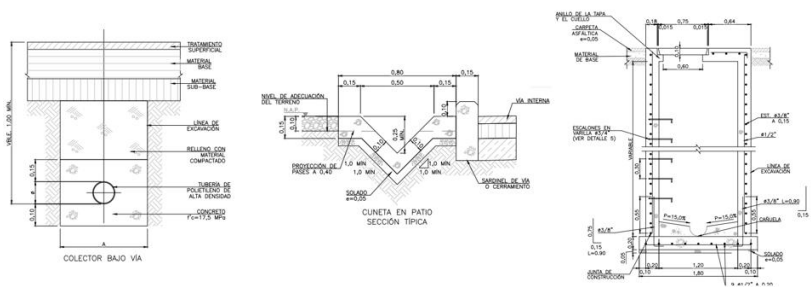
*Red de drenaje en patio de 500 kV SE Yaros.*



*Nota:* Adaptado de plano PE-YANA-13Z01-S-04-K2402, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú)

**Figura 33**

*Sección de colector y buzón bajo vías de la SE Yaros.*



*Nota:* Adaptado de plano PE-YANA-13Z01-S-04-K2402, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú)

**Tabla 51**

*Altura de Tuberías Colectoras de la SE Yaros*

| Díámetro de Tubería | Ancho de Zanja (m) | Altura mínima de tubería respecto a la vía (m) |
|---------------------|--------------------|------------------------------------------------|
| φ 6" - 8"           | 0,60               | 1                                              |
| φ 10" - 12"         | 0,70               | 1                                              |

*Nota:* Elaboración propia

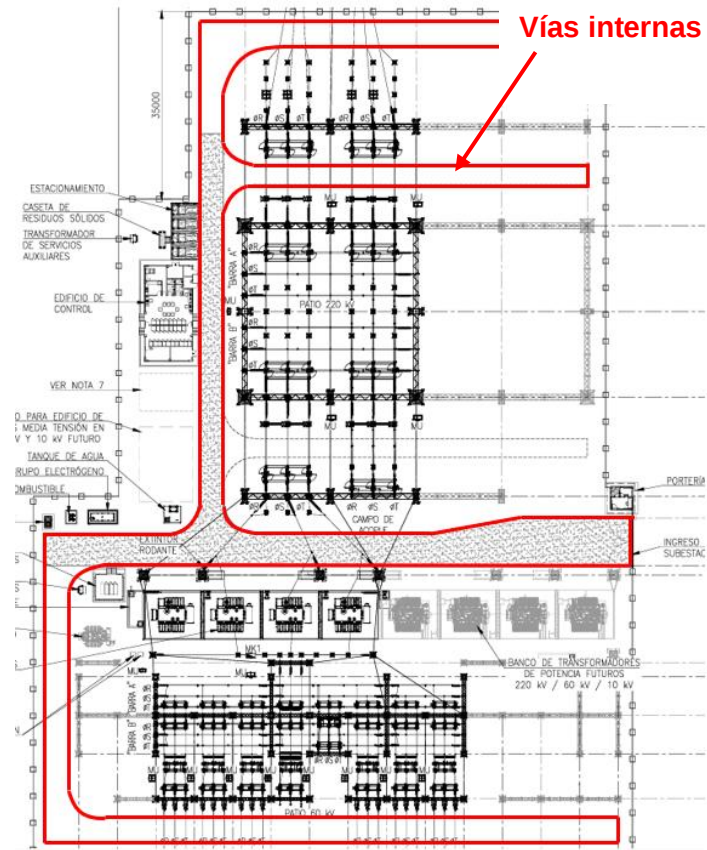
**5.3. Subestación Chinchá 220kV/ 60kV**

La Subestación Chinchá 220 kV / 60 kV forma parte del proyecto denominado " Subestación Chinchá Nueva de 220/60 kV y Subestación Nazca Nueva de 220/60 kV", liderado por el Consorcio Transmantaro S.A. Este proyecto tiene gran relevancia en la infraestructura energética de Perú, (Ministerio de Energía y Minas, 2022)

Dentro del alcance del proyecto para la ejecución de la Subestación Electrica Chinchá 220 kV / 60 kV se debe desarrollar el diseño de pavimentos para las vías internas de la subestación.

**Figura 34**

*Disposición física de la Subestación Chinchá 220 kV/60 kV.*



*Nota:* Adaptado de plano PE-CHIN-DISE1-S-01-K2502, HMV Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú)

### 5.3.1 Diseño pavimento rígido SE Chinchá.

**Cálculo de ejes equivalentes.**

**Tabla 52**

*Cálculo de ejes equivalentes*

| Vehículo | Eje equivalente EE <sub>8,2t</sub> |                           |                            |                            |
|----------|------------------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
|          | Eje delantero                      |                           | Eje posterior              |                            |
|          | Simple                             | Simple rueda dobles       | Tandem                     | Tridem                     |
|          | EE=[P/6,6] <sup>4,1</sup>          | EE=[P/8,2] <sup>4,1</sup> | EE=[P/13,3] <sup>4,1</sup> | EE=[P/17,5] <sup>4,0</sup> |
| PESO(TN) | 7                                  | 11                        | 0                          | 25                         |
| T2S3     | 1,27                               | 3,33                      | 0,00                       | 4,16                       |
| PESO(TN) | 7                                  | 11                        | 0                          | 0                          |
| C2       | 1,27                               | 3,33                      | 0,00                       | 0,00                       |

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 53***Parámetros de vía y Tráfico Vehicular*

| Parámetro             | Valor | Descripción                                                        |
|-----------------------|-------|--------------------------------------------------------------------|
| $IMD_p=$              | 5     | Se proyecta 5 vehículos C2 y T2S3 diarios                          |
| $F_d=$                | 0,5   | Se considera 1 calzada con 2 sentidos, ver Tabla 3                 |
| $F_c=$                | 1     | Se considera un tránsito homogéneo en ambos sentidos, ver Tabla 3, |
| $F_{vp} (EE_{8,2t})=$ | 13,38 | Vehículo C2 y T2S3                                                 |
| $F_p=$                | 1     | El 90% de la presión en los neumáticos es 80 PSI*                  |

Nota: Elaboración propia

Con los datos indicados en Tabla 22 y Tabla 23 se calcula los ejes equivalentes por cada tipo de vehículo  $EE_{día-carril}$ .

$$EE_{día-carril}: IMD_{pi}, F_d, F_c, F_{vpi}, F_{pi}=33,4506$$

El factor de crecimiento acumulado por tipo de vehículo  $F_{ca}$  se calcula considerando lo indicado en los criterios de diseño del proyecto Nueva Yanango correspondiente a la subestación Chinchá.

$$F_{ca} : \frac{(1+r)^n - 1}{r}$$

Donde,

$r$ : 2% Tasa anual de crecimiento  
 $n$ : 25 años Periodo de diseño

$$F_{ca} = 32,03$$

Por lo tanto, el número de ejes equivalentes simples  $W_{18}$  es el siguiente:

$$W_{18} = \sum [ EE_{día-carril}, F_{ca}, 365 ] = 391073,31$$

**Módulo de rotura (MR)**

De acuerdo con la Tabla 18, para un  $W_{18} = 391073,31$  de debería considerar un Módulo de Ruptura  $MR = 40 \text{ kg/cm}^2$  y una resistencia a la compresión de  $F'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$ .

**Módulo de elasticidad (e)**

Se considera una resistencia de la compresión del concreto de 31 Mpa.

$$E(psi) = 57000[F'_c]^{0,5}$$

$$E = 25044,53 \text{ Mpa}$$

### **Coeficiente desviación estándar normal $Z_R$**

De acuerdo con la Tabla 15, para un  $W_{18} = 391073,31$  se considera un nivel de tráfico TP2 con un nivel de confiabilidad  $R=75\%$  que le corresponde una desviación estándar normal de -0,674.

### **Desviación estándar combinada $s_0$**

Se considera un valor de 0,35 a la desviación estándar combinada, según lo recomendado en el manual de carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección: Suelo y Pavimentos (MTC, 2014).

### **Variación de servicialidad ( $\Delta PSI$ )**

De acuerdo con la Tabla 16, para un  $W_{18} = 391073,31$  se considera una variación de servicialidad igual a 2,10.

### **Índice de serviciabilidad o servicio final (pt)**

De acuerdo con la Tabla 16, para un  $W_{18} = 391073,31$  se considera una servicialidad final igual a 2,00.

### **Transferencia de carga (J)**

De acuerdo con la Tabla 21 y dadas las condiciones de concepción del diseño; es decir, losas en concreto con varillas pasa-losas en juntas transversales y juntas de dilatación; y además la confinación de las losas y las capas granulares con cunetas perimetrales, se adopta un valor de  $J= 2,8$ .

### **Drenaje ( $C_d$ )**

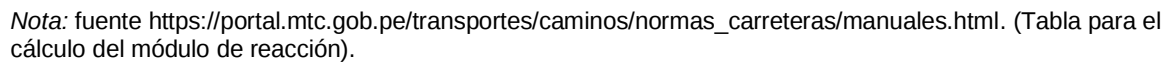
Para las condiciones de la subestación se adopta un valor de  $C_d = 1,0$ .

### **Módulo de reacción combinado ( $K_C$ )**

Según el estudio de suelo realizado en la subestación Chíncha, se tiene los siguientes valores de CBR.

- Para un CBR del 40 % (Sub base)
- Para un CBR del 10 % (sub rasante)

*Correlación CBR y Módulo de reacción de la sub-rasante.*



Donde:

$h(cm)$ : 15 (Espesor de la subbase granular),

72

**Tabla 54**

*Parámetros de diseño Pavimento Rígido*

|                              |              |          |
|------------------------------|--------------|----------|
| Módulo de rotura             | $M_R$ , Mpa  | 3,92     |
| Nivel de confiabilidad       | $R$          | 75%      |
| Desviación Normal            | $Z_R$        | -0,674   |
| Desviación Estándar          | $S_o$        | 35%      |
| Variación Serviciabilidad    | $\Delta PSI$ | 2,1      |
| Serviciabilidad final        | $P_t$        | 2        |
| Espesor de concreto          | $D$ , mm     | 150      |
| Transferencia de carga       | $J$          | 2,8      |
| Drenaje                      | $C_d$        | 1        |
| Módulo de Elasticidad        | $E_c$ , Mpa  | 25044,53 |
| Módulo de reacción combinado | $K_C$ , Mpa  | 60,62    |

Nota: Elaboración propia

Con los parámetros calculados se procede a verificar que el espesor del concreto cumpla la ecuación propuesta por la metodología AASTHO 93.

$$\log_{10}(W_{18}) \leq Z_R S_o + 7,35 \log_{10}(D + 25,4) - 10,39 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,5 - 1,5}\right)}{1 + \frac{1,25 \times 10^{19}}{(D + 25,4)^{8,46}}} + (4,22 - 0,32 P_t) \log_{10} \left( \frac{M_R C_d (0,09 D^{0,75} - 1,132)}{1,51 x J (0,09 D^{0,75} - \frac{7,38}{(\frac{E_c}{k})^{0,25}})} \right)$$

$$5,592 \leq 6,001$$

Se verifica que para una subbase granular de 15cm y un concreto de 15 cm de espesor, se obtiene un factor de 6,001 que es mayor a 5,592.

### 5.3.2 Diseño pavimento flexible SE Chincha

#### Cálculo de ejes equivalentes.

**Tabla 55**

*Cálculo de ejes equivalentes*

| Vehículo | Eje equivalente $EE_{8,2t}$ |                     |                 |                   |
|----------|-----------------------------|---------------------|-----------------|-------------------|
|          | Eje delantero               | Eje posterior       |                 |                   |
|          | Simple                      | Simple rueda dobles | Tandem          | Tridem            |
|          | $EE=[P/6,6]^4$              | $EE=[P/8,2]^4$      | $EE=[P/15,1]^4$ | $EE=[P/21,8]^3,9$ |
| PESO(TN) | 7                           | 11                  | 0               | 25                |
| T2S3     | 1,27                        | 3,24                | 0,00            | 1,71              |
| PESO(TN) | 7                           | 11                  | 0               | 0                 |
| C2       | 1,27                        | 3,24                | 0,00            | 0,00              |

Nota: Elaboración propia

**Tabla 56****Parámetros de vía y Tráfico Vehicular**

| Parámetro             | Valor | Descripción                                                        |
|-----------------------|-------|--------------------------------------------------------------------|
| $IMD_p=$              | 5     | Se proyecta 5 vehículos C2 diarios                                 |
| $F_d=$                | 0,5   | Se considera 1 calzada con 2 sentidos, ver Tabla 3                 |
| $F_c=$                | 1     | Se considera un tránsito homogéneo en ambos sentidos, ver Tabla 3, |
| $F_{vp} (EE_{8,2t})=$ | 10,71 | Vehículo C2 y T2S3                                                 |
| $F_p=$                | 1     | El 90% de la presión en los neumáticos es 80 PSI*                  |

Nota: Elaboración propia

Con los datos indicados en Tabla 22 y Tabla 23 se calcula los ejes equivalentes por cada tipo de vehículo  $EE_{día-carril}$ .

$$EE_{día-carril}: IMD_{pi}, F_d, F_c, F_{vpi}, F_{pi}=26,78$$

El factor de crecimiento acumulado por tipo de vehículo  $F_{ca}$  se calcula considerando lo indicado en los criterios de diseño del proyecto correspondiente a la SE Chinchá 220 kV/ 60kV.

$$F_{ca} : \frac{(1 + r)^n - 1}{r}$$

Donde,

|               |                           |
|---------------|---------------------------|
| $r$ : 2%      | Tasa anual de crecimiento |
| $n$ : 25 años | Periodo de diseño         |

$$F_{ca} = 32,03$$

Por lo tanto, el número de ejes equivalentes simples  $W_{18}$  es el siguiente:

$$W_{18} = \sum [ EE_{día-carril}, F_{ca}, 365 ] = 313125,55$$

**Módulo de resiliencia ( $M_R$ ).**

Para el cálculo del módulo de resiliencia se hace uso del valor de CBR según la siguiente ecuación.

$$M_R(Psi) = 2555 * CBR^{0,64}$$

**Tabla 57****Módulo de Resiliencia según CBR**

|                    | <b>CBR (%)</b> | <b>Mr (Psi)</b> |
|--------------------|----------------|-----------------|
| <i>Sub rasante</i> | 10             | 11152,98        |
| <i>Sub base</i>    | 40             | 27083,78        |
| <i>Base</i>        | 80             | 42205,45        |

Nota: Elaboración propia

**Coefficiente desviación estándar normal  $Z_R$ .**

De acuerdo con la Tabla 15, para un  $W_{18} = 313125,55$  se considera un nivel de tráfico TP2 con un nivel de confiabilidad  $R=75\%$  que le corresponde una desviación estándar normal de -0,674.

**Desviación estándar combinada  $s_0$ .**

Se considera un valor de 0,45 a la desviación estándar combinada, según lo recomendado en el manual de carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección: Suelo y Pavimentos (MTC, 2014).

**Variación de servicialidad ( $\Delta PSI$ ).**

De acuerdo con la Tabla 8, para un  $W_{18} = 313125,55$  se considera una variación de servicialidad igual a 1,8.

**Índice de serviciabilidad o servicio final (pt).**

De acuerdo con la Tabla 8, para un  $W_{18} = 313125,55$  se considera una servicialidad final igual a 2,0.

**Drenaje ( $C_d$ ).**

Para las condiciones de la subestación se adopta un valor de  $C_d = 1,0$ .

**Coefficiente estructural ( $a_i$ ).**

Para calcular el número estructural, se toman en cuenta los valores descritos en la Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12.

**Tabla 58***Coefficiente estructural SE Chinchá*

| <b>Coefficiente Estructural</b> |                                                         |       |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------|-------|
| $a_1/cm$                        | Tratamiento Superficial Bicapa,                         | 0     |
| $a_2/cm$                        | Base Granular CBR 80%, compactada al 100% de la MDS     | 0,052 |
| $a_3/cm$                        | Sub Base Granular CBR 40%, compactada al 100% de la MDS | 0,047 |

Nota: Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

**Coefficiente de drenaje ( $m_i$ ).**

Los coeficientes de drenaje para la base y la subbase, respectivamente, se han considerado iguales a 1,00, dado que el pavimento de la subestación eléctrica cuenta con un sistema de drenaje eficiente.

**Tabla 59***Coefficiente de drenaje SE Chinchá*

| <b>Coefficiente Drenaje</b> |   |
|-----------------------------|---|
| $m_2$                       | 1 |
| $m_3$                       | 1 |

Nota: Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

**Cálculo de número estructural (SN).**

Iterando la ecuación siguiente, se establece el valor del número estructural necesario para el diseño del pavimento flexible.

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R S_o + 9.36 \log_{10}(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + \underbrace{2.32 \log_{10}(M_R) - 8.07}_{* \log_{10}(W_{18})}$$

**Tabla 60***Número Estructural SE Chinchá*

| <b>Sub Rasante</b> |              |
|--------------------|--------------|
| <b>W18</b>         | 313125,55    |
| <b>LOG(W18)</b>    | 5,496        |
| <b>*LOG(W18)</b>   | 5,496        |
| <b>SN</b>          | <b>2,208</b> |

Nota: Elaboración propia

$$SN = a_1 \times d_1 + a_2 \times d_2 \times m_2 + a_3 \times d_3 \times m_3$$

|                 |                                                                                             |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| $a_1, a_2, a_3$ | coeficientes estructurales de las capas: Superficial, base y sub base, de forma respectiva, |
| $d_1, d_2, d_3$ | espesores (en centímetro) de las capas: Superficial, base y sub base, de forma respectiva,  |
| $m_2, m_3$      | coeficientes de drenaje para las capas de base y sub base, de forma respectiva,             |

### 5.3.2.1 Cálculo de espesores (SN) Tratamiento superficial bicapa.

**Tabla 61**

*Cálculo SN SE Chincha tratamiento superficial bicapa*

| Coeficiente Estructural |       | Coeficiente Drenaje |   | SN   |       |
|-------------------------|-------|---------------------|---|------|-------|
| $a_1/cm$                | 0     |                     |   | /SN1 | 0,00  |
| $a_2/cm$                | 0,052 | $m_2$               | 1 | /SN2 | 1,55  |
| $a_3/cm$                | 0,047 | $m_3$               | 1 | /SN3 | 0,658 |

Nota: Elaboración propia

**Tabla 62**

*Cálculo SN Suministrado SE Chincha tratamiento superficial bicapa*

| Espesor suministrado   |           | SN Suministrado      |              |
|------------------------|-----------|----------------------|--------------|
| <b>Carpeta h1(cm)</b>  | <b>0</b>  | <b>*SN1 TSB</b>      | <b>0,000</b> |
| <b>Base h2(cm)</b>     | <b>30</b> | <b>*SN2 Base</b>     | <b>1,56</b>  |
| <b>Sub base h3(cm)</b> | <b>15</b> | <b>*SN3 Sub base</b> | <b>0,705</b> |

Nota: Elaboración propia

$$SN \leq SN \text{ Sumistrado}$$

$$2,208 \leq 2,265$$

Se verifica que para una base granular de 30cm y una subbase de 15 cm de espesor, se obtiene un numero estructural SN de 2,265 que es mayor a 2,208.

### 5.3.2.2 Cálculo de espesores (SN) Carpeta asfáltica en caliente.

**Tabla 63**

*Cálculo SN SE Chincha carpeta asfáltica en caliente.*

| Coeficiente Estructural |       | Coeficiente Drenaje |   | SN   |       |
|-------------------------|-------|---------------------|---|------|-------|
| $a_1/cm$                | 0,170 |                     |   | /SN1 | 1,279 |
| $a_2/cm$                | 0,052 | $m_2$               | 1 | /SN2 | 0,270 |
| $a_3/cm$                | 0,047 | $m_3$               | 1 | /SN3 | 0,658 |

Nota: Elaboración propia

**Tabla 64**

*Cálculo SN Suministrado SE Chincha carpeta asfáltica en caliente*

| Espesor suministrado |       | SN Suministrado      |              |
|----------------------|-------|----------------------|--------------|
| Carpeta h1(cm)       | 8,00  | <b>*SN1 CAC</b>      | <b>1,360</b> |
| Base h2(cm)          | 20,00 | <b>*SN2 Base</b>     | <b>1,040</b> |
| Sub base h3(cm)      | 0,00  | <b>*SN3 Sub base</b> | <b>2,400</b> |

Nota: Elaboración propia

$$SN \leq SN \text{ Sumistrado}$$

$$2,208 \leq 2,400$$

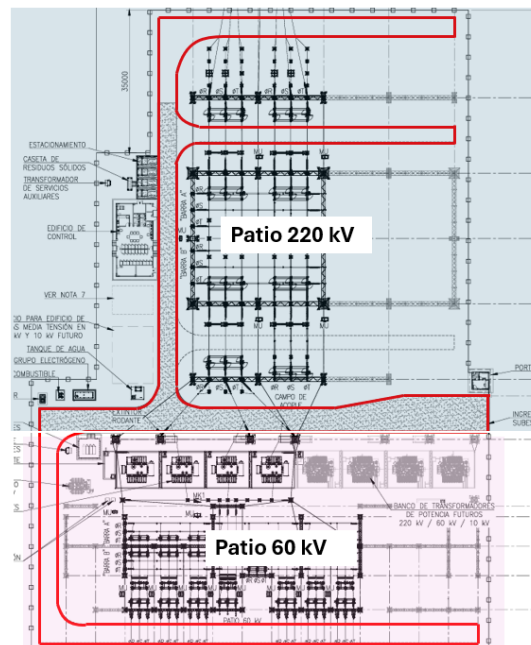
Se verifica que para una base granular de 20cm y una carpeta asfáltica en caliente de 8 cm de espesor, se obtiene un numero estructural SN de 2.400 que es mayor a 2,208.

### 5.3.3 Interferencias potenciales y su influencia en los pavimentos de la SE Chincha 220kV/60kV

La Subestación Chincha está conformada por dos patios de operación, uno de 220 kV y otro de 60 kV, En su interior, cuenta con un sistema de banco de ductos eléctricos diseñado para recopilar información de todo el equipamiento, la cual es dirigida hacia las casetas y el edificio de control, Asimismo, dispone de un sistema de drenaje compuesto por filtros, colectores, cunetas, cajas de inspección y buzones, garantizando un adecuado manejo de aguas pluviales.

**Figura 36**

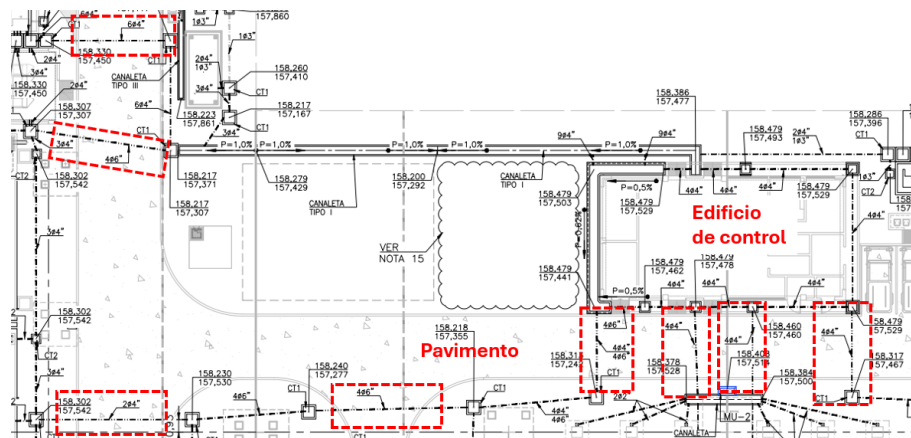
*Disposición de patio en 220/60 kV de la SE Chincha.*



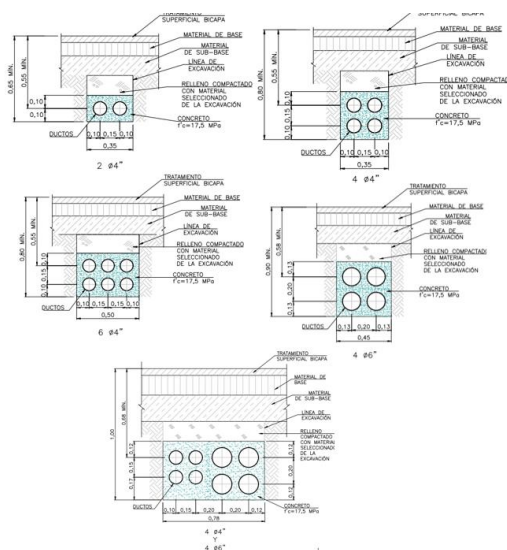
Nota: Adaptado de plano PE-CHIN-DISE1-S-01-K2502, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú)

En el patio de 220 kV de la Subestación Chinchá, los ductos que atraviesan las vías internas tienen diámetros de 4" y 6", Estos ductos están organizados en bancos conformados por combinaciones de 2, 4 y 6 ductos, lo que permite una distribución eficiente de los cables eléctricos que transportan señales y potencia, La disposición de estos ductos garantiza la protección del cableado contra condiciones ambientales adversas y facilita las labores de inspección y mantenimiento, Además, su diseño asegura un flujo ordenado de las conexiones entre los diferentes equipos del sistema, contribuyendo al óptimo funcionamiento de la subestación.

*Banco de ductos en patio 220kV SE Chincha.*

**Figura 38**

*Sección de Ductos bajo vía en patio 220kV SE Chíncha.*



79

**Tabla 65**

*Altura de Banco de ductos de la SE Chinchá*

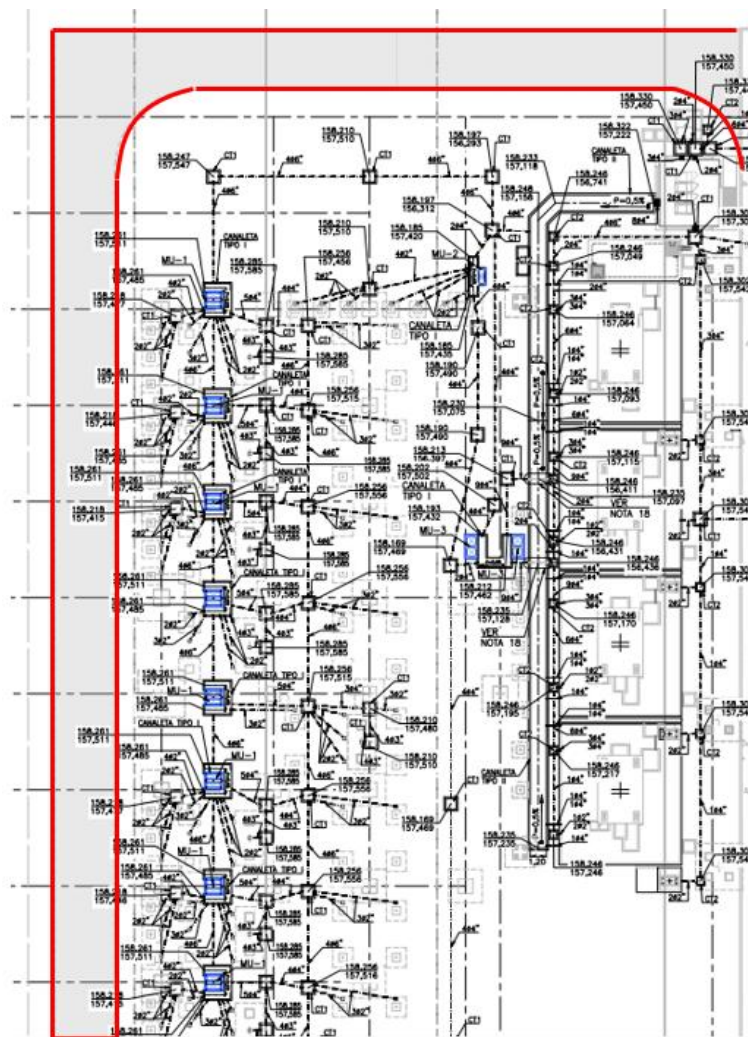
| Banco de Ductos           | Ancho de Zanja (m) | Altura mínima de banco de ductos respecto a la vía (m) |
|---------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------|
| 2 $\phi$ 4"               | 0,35               | 0,65                                                   |
| 4 $\phi$ 4"               | 0,35               | 0,80                                                   |
| 6 $\phi$ 4"               | 0,5                | 0,80                                                   |
| 4 $\phi$ 6"               | 0,45               | 0,90                                                   |
| 4 $\phi$ 4" y 4 $\phi$ 6" | 0,78               | 1,00                                                   |

*Nota:* Elaboración propia

En el patio de 60 kV de la Subestación Chinchá, los ductos están ubicados de manera que no atraviesan las vías internas de la subestación, Por consiguiente, no generan ningún impacto directo sobre dichas vías.

**Figura 39**

*Banco de ductos en patio 60kV SE Chinchá.*



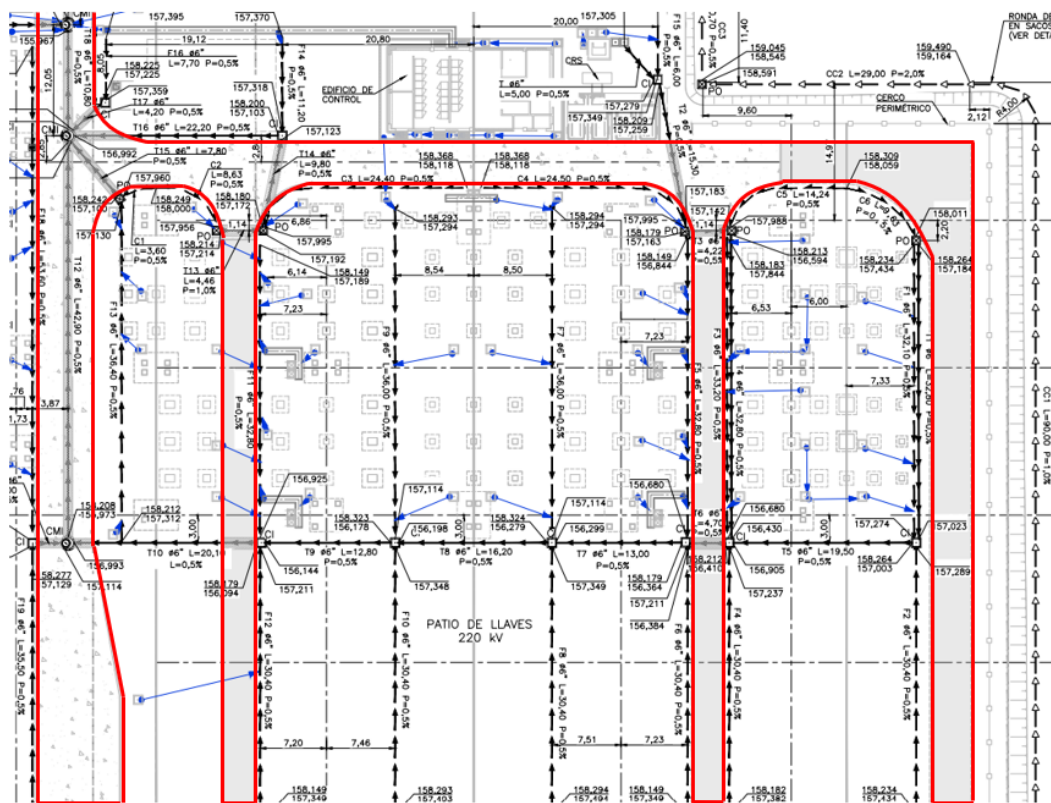
*Nota:* Adaptado de plano PE-CHIN-DISE1-S-01-K2502, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú)

**d) Sistema de drenaje.**

En el patio de 220 kV y 60kV de la Subestación Chinchá, la red de drenaje está compuesta por cunetas diseñadas para captar las aguas provenientes de las vías, de acuerdo con el sistema de bombeo implementado, Además, cuenta con filtros y colectores ubicados estratégicamente en los perímetros del patio, Dentro de las vías internas, se encuentran buzones y tuberías colectoras embebidas en concreto, Los buzones están alineados al nivel de las vías para evitar interferencias y desniveles que puedan afectar la circulación de los vehículos, Asimismo, las tuberías colectoras están enterradas a una profundidad adecuada, garantizando que no comprometan la integridad estructural de las vías.

### Figura 40

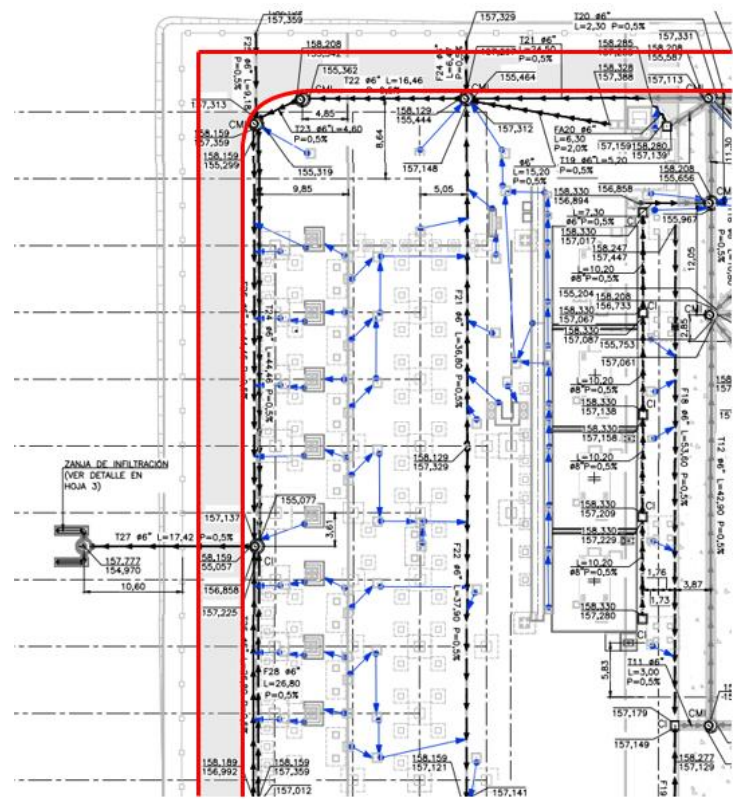
*Red de drenaje en patio de 220 kV SE Chincha.*



*Nota:* Adaptado de plano PE-CHIN-DISE1-S-01-K2502, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú)

Figura 41

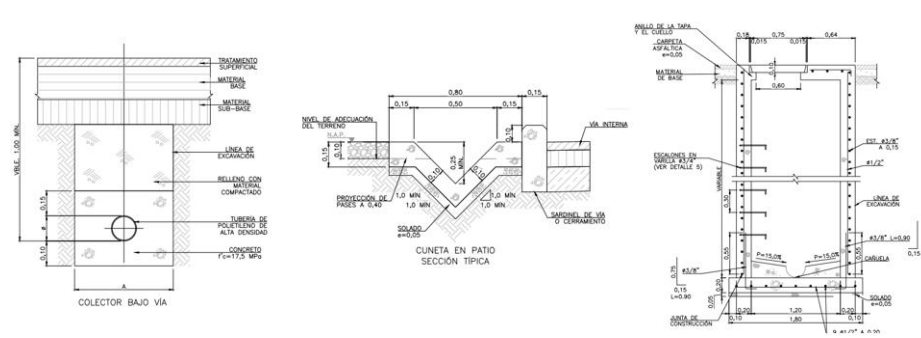
Red de drenaje en patio de 60 kV SE Chinch.



Nota: Adaptado de plano PE-CHIN-DISE1-S-01-K2502, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú)

Figura 42

Sección de colector y buzón bajo vías de la SE Chinch.



Nota: Adaptado de plano PE-CHIN-DISE1-S-01-K2502, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú)

Tabla 66

Altura de Tuberías Colectoras de la SE Chinch

| Diámetro de Tubería | Ancho de Zanja (m) | Altura mínima de tubería respecto a la vía (m) |
|---------------------|--------------------|------------------------------------------------|
| φ 6" - 8"           | 0,60               | 1                                              |
| φ 10" - 12"         | 0,70               | 1                                              |

Nota: Elaboración propia

## Capítulo VI. Validación del diseño de pavimentos rígidos y flexibles en una subestación eléctrica.

En este capítulo se valida los diseños de pavimentos rígidos y flexibles planteados para una subestación eléctrica, siguiendo los parámetros y criterios técnicos establecidos en el Manual de Diseño de Pavimentos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2014). La evaluación considera los espesores propuestos en dicho manual, con el objetivo de verificar el diseño a las condiciones específicas de la subestación.

**Tabla 67**

*Número estructural mínimo según MTC pavimento flexible TSB*

|                          | 6% ≤ CBR ≤ 10% | 10% ≤ CBR ≤ 20% | 20% ≤ CBR ≤ 30% |
|--------------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 75000 ≤ Rep EE ≤ 150000  | 2.146          | 2.005           | 1.641           |
| 150000 ≤ Rep EE ≤ 300000 | 2.500          | 2.240           | 1.839           |
| 300000 ≤ Rep EE ≤ 500000 | 2.735          | 2.381           | 2.005           |

*Nota:* Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

**Tabla 68**

*Número estructural mínimo según MTC pavimento flexible CAC*

|                          | 6% ≤ CBR ≤ 10% | 10% ≤ CBR ≤ 20% | 20% ≤ CBR ≤ 30% |
|--------------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 75000 ≤ Rep EE ≤ 150000  | 2.15           | 1.890           | 1.630           |
| 150000 ≤ Rep EE ≤ 300000 | 2.476          | 2.216           | 1.852           |
| 300000 ≤ Rep EE ≤ 500000 | 2.765          | 2.372           | 2.008           |

*Nota:* Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

**Tabla 69**

*Espesor mínimo de losa de concreto según MTC pavimento rígido*

|                          | 6% ≤ CBR ≤ 10% | 10% ≤ CBR ≤ 20% | 20% ≤ CBR ≤ 30% |
|--------------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 75000 ≤ Rep EE ≤ 150000  | 15 cm          | 15 cm           | 15 cm           |
| 150000 ≤ Rep EE ≤ 300000 | 15 cm          | 15 cm           | 15 cm           |
| 300000 ≤ Rep EE ≤ 500000 | 15 cm          | 15 cm           | 15 cm           |

*Nota:* Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

**Tabla 70**

*Espesor mínimo de subbase según MTC pavimento rígido*

|                          | 6% ≤ CBR ≤ 10% | 10% ≤ CBR ≤ 20% | 20% ≤ CBR ≤ 30% |
|--------------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 75000 ≤ Rep EE ≤ 150000  | 15 cm          | 15 cm           | 15 cm           |
| 150000 ≤ Rep EE ≤ 300000 | 15 cm          | 15 cm           | 15 cm           |
| 300000 ≤ Rep EE ≤ 500000 | 15 cm          | 15 cm           | 15 cm           |

*Nota:* Adaptado de (Manual de Geología Geotécnica Suelos y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

## 6.1 SE Moquegua verificación de diseño.

### 6.1.1 Pavimento flexible

**Tabla 71**

*Validación número estructural pavimento flexible TSB SE Moquegua*

| SN (SE Moquegua) | SN (MTC)                         |
|------------------|----------------------------------|
| CBR=15.8%        | $10\% \leq \text{CBR} \leq 20\%$ |
| 1.61             | 2.005                            |

Nota: Elaboración propia

**Tabla 72**

*Validación número estructural pavimento flexible CAC SE Moquegua*

| SN (SE Moquegua) | SN (MTC)                         |
|------------------|----------------------------------|
| CBR=15.8%        | $10\% \leq \text{CBR} \leq 20\%$ |
| 1.61             | 1.890                            |

Nota: Elaboración propia

Según lo mostrado en la Tabla 71 y Tabla 72, el número estructural (SN) calculado para la Subestación Eléctrica Moquegua es 1.61, valor que resulta inferior al SN recomendado por el Manual de Diseño de Pavimentos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), el cual es 2.005 para pavimentos con tratamiento superficial bicapa y 1.890 para carpetas asfálticas en caliente.

### 6.1.2 Pavimento rígido

**Tabla 73**

*Validación Espesor pavimento rígido SE Moquegua*

|                | SE Moquegua | MTC                              |
|----------------|-------------|----------------------------------|
|                | CBR=15.8%   | $10\% \leq \text{CBR} \leq 20\%$ |
| E. Losa(cm)    | 15          | 15                               |
| E. Subbase(cm) | 15          | 15                               |

Nota: Elaboración propia

Según lo mostrado en la Tabla 73, el espesor de la losa y de la subbase para la Subestación Eléctrica Moquegua es de 15cm. El cual resulta ser el espesor mínimo recomendado en el Manual de Diseño de Pavimentos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC).

## 6.2 SE Yaros verificación de diseño.

### 6.2.1 Pavimento flexible

**Tabla 74**

*Validación número estructural pavimento flexible TSB SE Yaros*

| SN (SE Yaros) | SN (MTC)                        |
|---------------|---------------------------------|
| CBR=10%       | $6\% \leq \text{CBR} \leq 10\%$ |
| 2.208         | 2.735                           |

Nota: Elaboración propia

**Tabla 75*****Validación número estructural pavimento flexible CAC SE Yaros***

| SN (SE Yaros) | SN (MTC)                        |
|---------------|---------------------------------|
| CBR=10%       | $6\% \leq \text{CBR} \leq 10\%$ |
| 2.208         | 2.765                           |

*Nota:* Elaboración propia

Según lo mostrado en la Tabla 74 y Tabla 75, el número estructural (SN) calculado para la Subestación Eléctrica Yaros es 2.08, valor que resulta inferior al SN recomendado por el Manual de Diseño de Pavimentos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), el cual es 2.735 para pavimentos con tratamiento superficial bicapa y 2.765 para carpetas asfálticas en caliente.

**6.2.2 Pavimento rígido****Tabla 76*****Validación Espesor pavimento rígido SE Yaros***

|                | SE Yaros | MTC                             |
|----------------|----------|---------------------------------|
|                | CBR=10%  | $6\% \leq \text{CBR} \leq 10\%$ |
| E. Losa(cm)    | 15       | 15                              |
| E. Subbase(cm) | 15       | 15                              |

*Nota:* Elaboración propia

Según lo mostrado en la Tabla 76, el espesor de la losa y de la subbase para la Subestación Eléctrica Moquegua es de 15cm. El cual resulta ser el espesor mínimo recomendado en el Manual de Diseño de Pavimentos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC).

**6.3 SE Chincha verificación de diseño.****6.3.1 Pavimento flexible****Tabla 77*****Validación número estructural pavimento flexible TSB SE Chincha***

| SN (SE Chincha) | SN (MTC)                        |
|-----------------|---------------------------------|
| CBR=10%         | $6\% \leq \text{CBR} \leq 10\%$ |
| 2.208           | 2.735                           |

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 78*****Validación número estructural pavimento flexible CAC SE Chincha***

| SN (SE Chincha) | SN (MTC)                        |
|-----------------|---------------------------------|
| CBR=10%         | $6\% \leq \text{CBR} \leq 10\%$ |
| 2.208           | 2.765                           |

*Nota:* Elaboración propia

Según lo mostrado en la Tabla 77 y Tabla 78, el número estructural (SN) calculado para la Subestación Eléctrica Chincha es 2.08, valor que resulta inferior al SN recomendado por el Manual de Diseño de Pavimentos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), el cual es 2.735 para pavimentos con tratamiento superficial bicapa y 2.765 para carpetas asfálticas en caliente

### 6.3.2 Pavimento rígido

**Tabla 79**

*Validación Espesor pavimento rígido SE Chincha*

|                | SE Chincha | MTC                             |
|----------------|------------|---------------------------------|
|                | CBR=10%    | $6\% \leq \text{CBR} \leq 10\%$ |
| E. Losa(cm)    | 15         | 15                              |
| E. Subbase(cm) | 15         | 15                              |

*Nota:* Elaboración propia

Según lo mostrado en la Tabla 79 Tabla 76, el espesor de la losa y de la subbase para la Subestación Eléctrica Moquegua es de 15cm. El cual resulta ser el espesor mínimo recomendado en el Manual de Diseño de Pavimentos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC).

## Capítulo VII. Propuesta de diseño de pavimentos en el entorno de una subestación eléctrica.

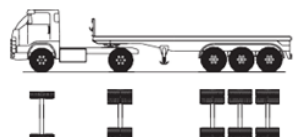
El objetivo de este capítulo es proponer los espesores óptimos de pavimentos rígidos y flexibles (carpeta asfáltica en caliente y tratamiento superficial bicapa) para las vías internas de una Subestación eléctrica, considerando los valores de Capacidad de Soporte del Suelo (CBR) y el numero acumulado de ejes equivalentes W18. La propuesta se fundamenta en la metodología AASHTO 93, así como en las recomendaciones y metodologías establecidas en el Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Sección Suelos y Pavimentos (MTC, 2014). El análisis se realizará considerando periodos de diseño de 10 y 25 años, y se evaluarán diferentes valores del CBR (California Bearing Ratio) del suelo de fundación. Se han considerado como vehículos de diseño los tipos C2 y T2S3, dado que estos son los que previsiblemente circularán con mayor frecuencia, principalmente para tareas de mantenimiento y rehabilitación de los componentes de la subestación.

### 7.1 Vehículo de diseño

Se considera vehículos tipo C2, empleados comúnmente para tareas rutinarias de operación y mantenimiento, y vehículos T2S3, necesarios para el traslado de equipos de gran envergadura, como transformadores de potencia. La selección de estos vehículos se fundamenta en los criterios de diseño adoptados por concesionarias líderes en el sector eléctrico, como ISA, SIEMENS y ACCIONA, quienes incorporan estos vehículos en sus consideraciones de diseño de pavimentos. En el presente estudio, el análisis de las cargas se basa en los límites de pesos y dimensiones vehiculares definidos en el Compendio Normativo de Pesos y Medidas (MTC, 2021).

**Figura 43**

*Peso de vehículo C2 y T2S3.*

| TABLA DE PESOS Y MEDIDAS |                   |            |                                                                                     |                |            |                              |     |     |     |
|--------------------------|-------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------|------------|------------------------------|-----|-----|-----|
| N°                       | Config. vehicular | N° de ejes | Descripción gráfica de los vehículos                                                | Long. Máx. (m) | Eje Delant | Peso máximo (t)              |     |     |     |
|                          |                   |            |                                                                                     |                |            | Conjunto de ejes posteriores |     |     |     |
|                          |                   |            |                                                                                     |                |            | 1°                           | 2°  | 3°  | 4°  |
| 1                        | C2                | 2          |  | 12.30          | 7          | 11                           | --- | --- | --- |
| 8                        | T2S3              | 5          |  | 20.50          | 7          | 11                           | 25  | --- | --- |

*Nota:* fuente <https://www.gob.pe/institucion/sutran/informes-publicaciones/1787397-compendio-normativo-sobre-pesos-y-medidas> (Peso segun eje de los vehículos C2 y T2S3)

El presente análisis considera a los vehículos tipo C2 y T2S3 en el diseño del pavimento. El factor vehículo pesado (Fvp) para cada tipo de vehículo se presenta en la Tabla 80 para el pavimento flexible y para pavimento rígido según la Tabla 82.

**Tabla 80**

*Cálculo de FVP Pavimento Flexible*

| Cálculo de FVP Pavimento Flexible |                                    |                         |                          |                            |                         |
|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Tipo de Vehículo                  | Eje equivalente EE <sub>8,2t</sub> |                         |                          |                            | Total<br><br><i>Fvp</i> |
|                                   | Eje delantero                      | Eje posterior           |                          |                            |                         |
|                                   | Simple                             | Simple rueda dobles     | Tandem                   | Tridem                     |                         |
|                                   | EE=[P/6,6] <sup>4</sup>            | EE=[P/8,2] <sup>4</sup> | EE=[P/15.1] <sup>4</sup> | EE=[P/21.8] <sup>3.9</sup> |                         |
| PESO(TN)                          | 7                                  | 11                      | 0                        | 25                         |                         |
| T2S3                              | 1.27                               | 3.24                    | 0.00                     | 1.71                       | 6.21                    |
| PESO(TN)                          | 7                                  | 11                      | 0                        | 0                          |                         |
| C2                                | 1.27                               | 3.24                    | 0.00                     | 0.00                       | 4.50                    |

Nota: Elaboración propia

**Tabla 81**

*Resumen Fvp Según tipo de vehículo Para pavimento flexible*

|              |       |                    |
|--------------|-------|--------------------|
| <i>Fvp</i> = | 4.50  | Vehículo C2        |
| <i>Fvp</i> = | 6.21  | Vehículo T2S3      |
| <i>Fvp</i> = | 10.71 | Vehículo T2S3 y C2 |

Nota: Elaboración propia

**Tabla 82**

*Cálculo de FVP Pavimento Rígido*

| Cálculo de Fvp Pavimento Rígido |                                    |                           |                            |                            |                  |
|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------|
| Tipo de Vehículo                | Eje equivalente EE <sub>8,2t</sub> |                           |                            |                            | Total<br><br>Fvp |
|                                 | Eje delantero                      |                           | Eje posterior              |                            |                  |
|                                 | Simple                             | Simple rueda dobles       | Tandem                     | Tridem                     |                  |
|                                 | EE=[P/6,6] <sup>4.1</sup>          | EE=[P/8,2] <sup>4.1</sup> | EE=[P/13.3] <sup>4.1</sup> | EE=[P/17.5] <sup>4.0</sup> |                  |
| PESO(TN)                        | 7                                  | 11                        | 0                          | 25                         |                  |
| T2S3                            | 1.27                               | 3.33                      | 0.00                       | 4.16                       | 8.77             |
| PESO(TN)                        | 7                                  | 11                        | 0                          | 0                          |                  |
| C2                              | 1.27                               | 3.33                      | 0.00                       | 0.00                       | 4.61             |

Nota: Elaboración propia

**Tabla 83**

*Resumen Fvp Según tipo de vehículo Para pavimento rígido*

|              |       |                    |
|--------------|-------|--------------------|
| <i>Fvp</i> = | 4.61  | Vehículo C2        |
| <i>Fvp</i> = | 8.77  | Vehículo T2S3      |
| <i>Fvp</i> = | 13.38 | Vehículo T2S3 y C2 |

Nota: Elaboración propia

Para el diseño de los pavimentos flexibles y pavimentos rígidos en una subestación eléctrica se consideran los siguientes valores de CBR para la base y subbase según las recomendaciones Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Sección Suelos y Pavimentos (MTC, 2014).

**Tabla 84**

*CBR y Mr para pavimento flexibles*

|          | CBR (%) | Mr (Psi) |
|----------|---------|----------|
| Sub base | 40      | 27083.78 |
| Base     | 80      | 42205.45 |

Nota: Elaboración propia

## 7.2 Pavimentos flexible con tratamiento superficial bicapa

### 7.2.1 Subestación eléctrica de maniobra

Par las condiciones típicas de una subestación eléctrica de maniobras donde solo circularan vehículos del tipo C2 para su mantenimiento y operación. Se consideran los siguientes parámetros para el cálculo del número de ejes equivalentes

**Tabla 85**

*Parámetros para el cálculo de W18*

| Parámetro | Valor | Descripción                                           |
|-----------|-------|-------------------------------------------------------|
| IMDA      | 5     | Se proyecta 5 vehículos C2 diarios                    |
| Fd=       | 0.5   | Se considera 1 calzada con 2 sentidos                 |
| Fc=       | 1     | Se considera un tránsito homogéneo en ambos sentidos. |
| Fp=       | 1     | El 90% de la presión en los neumáticos es 80 PSI*     |
| r         | 2%    | tasa anual de crecimiento                             |

Nota: Elaboración propia

#### 7.2.1.1 Periodo de diseño de 10 años.

Para un periodo de diseño de 10 años, se ha calculado un número acumulado de ejes equivalentes de 44998.80 como máximo.

$$W_{18} = \sum [EE_{\text{día-carril}}, Fca, 365] = 44998.80$$

**Tabla 86**

*Espesores de pavimento con periodo de diseño de 10 años*

| CBR (%)      | 6     | 10    | 15    | 20    | 25    | 40    |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SN calculado | 1.717 | 1.5   | 1.341 | 1.235 | 1.157 | 1.000 |
| Base (cm)    | 19.24 | 19.24 | 19.24 | 19.24 | 19.24 | 19.24 |
| Subbase (cm) | 15.24 | 10.62 | 7.25  | 5     | 3.32  | 0     |
| Base* (cm)   | 20    | 20    | 20    | 25    | 25    | 20    |

|                  |       |       |       |     |     |      |
|------------------|-------|-------|-------|-----|-----|------|
| CBR (%)          | 6     | 10    | 15    | 20  | 25  | 40   |
| Subbase*(cm)     | 15    | 15    | 15    | 0   | 0   | 0    |
| SN* Suministrado | 1.745 | 1.745 | 1.745 | 1.3 | 1.3 | 1.04 |

Nota: Elaboración propia

(\*) Valor suministrado

Según lo indicado en la Tabla 87 se propone los siguientes espesores, Según el valor de CBR:

**Tabla 87**

*Espesor de pavimento flexible según CBR*

|              | 6≤CBR<20 | 20≤CBR<40 | 40≤CBR |
|--------------|----------|-----------|--------|
| Base* (cm)   | 20       | 25        | 20     |
| Subbase*(cm) | 15       | 0         | 0      |

Nota: Elaboración propia

### 7.2.1.2 Periodo de diseño de 25 años.

Para un periodo de diseño de 25 años, se ha calculado un número acumulado de ejes equivalentes de 131631.21 como máximo.

$$W_{18} = \sum [ EE_{\text{día-carril}} \cdot Fca \cdot 365 ] = 131631.21$$

**Tabla 88**

*Espesores de pavimento con periodo de diseño de 25 años*

|                  |       |       |       |       |       |       |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CBR (%)          | 6     | 10    | 15    | 20    | 25    | 40    |
| SN Calculado     | 2.063 | 1.813 | 1.632 | 1.512 | 1.423 | 1.246 |
| Base (cm)        | 23.96 | 23.96 | 23.96 | 23.96 | 23.96 | 23.96 |
| Subbase (cm)     | 17.37 | 12.07 | 8.22  | 5.66  | 3.76  | 0     |
| Base* (cm)       | 25    | 25    | 25    | 30    | 30    | 25    |
| Subbase*(cm)     | 20    | 15    | 15    | 0     | 0     | 0     |
| SN* Suministrado | 2.24  | 2.005 | 2.005 | 2.005 | 1.56  | 1.3   |

Nota: Elaboración propia

(\*) Valor suministrado

**Tabla 89**

*Espesor de pavimento flexible según CBR*

|              | 6≤CBR<10 | 10≤CBR<20 | 20≤CBR<40 | 40≤CBR |
|--------------|----------|-----------|-----------|--------|
| Base* (cm)   | 25       | 25        | 30        | 25     |
| Subbase*(cm) | 20       | 15        | 0         | 0      |

Nota: Elaboración propia

### 7.2.2 Subestación eléctrica de transformación

Para las condiciones habituales de una subestación eléctrica de transformación, se requiere la circulación de vehículos tipo T2S3, destinados al transporte de equipos de gran envergadura, como transformadores de potencia. Asimismo, los vehículos tipo C2 también son necesarios para llevar a cabo actividades relacionadas con la operación y el mantenimiento. En el presente estudio, se consideran los parámetros correspondientes para el cálculo del número de ejes equivalentes.

**Tabla 90**

*Parámetros para el cálculo de  $W_{18}$*

| Parámetro | Valor | Descripción                                           |
|-----------|-------|-------------------------------------------------------|
| $IMDA$    | 5     | Se proyecta 5 vehículos C2 y T2S3 diarios             |
| $Fd=$     | 0.5   | Se considera 1 calzada con 2 sentidos                 |
| $Fc=$     | 1     | Se considera un tránsito homogéneo en ambos sentidos. |
| $Fp=$     | 1     | El 90% de la presión en los neumáticos es 80 PSI*     |
| $r$       | 2%    | tasa anual de crecimiento                             |

*Nota:* Elaboración propia

#### 7.2.2.1 Periodo de diseño de 10 años.

Para un periodo de diseño de 10 años, se ha calculado un número acumulado de ejes equivalentes de 107043.56 como máximo.

$$W_{18} = \sum [ EE_{\text{día-carril}} , Fca , 365 ] = 107043.56$$

**Tabla 91**

*Espesores de pavimento flexible con periodo de diseño de 10 años*

| CBR (%)          | 6     | 10    | 15    | 20    | 30    | 35    |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SN Calculado     | 1.993 | 1.75  | 1.574 | 1.456 | 1.301 | 1.245 |
| Base (cm)        | 23    | 23    | 23    | 23    | 23    | 23    |
| Subbase (cm)     | 16.94 | 11.78 | 8.03  | 5.53  | 2.22  | 1.03  |
| Base* (cm)       | 25    | 25    | 25    | 30    | 30    | 25    |
| Subbase*(cm)     | 15    | 15    | 15    | 0     | 0     | 0     |
| SN* Suministrado | 2.005 | 2.005 | 2.005 | 1.56  | 1.56  | 1.3   |

*Nota:* Elaboración propia

(\*) Valor suministrado

Según lo indicado en la Tabla 92 se propone los siguientes espesores, Según el valor de CBR:

**Tabla 92***Espesor de pavimento flexible según CBR*

|              | 6≤CBR<20 | 20≤CBR<35 | 35≤CBR |
|--------------|----------|-----------|--------|
| Base* (cm)   | 20       | 30        | 25     |
| Subbase*(cm) | 15       | 0         | 0      |

Nota: Elaboración propia

**7.2.2.2 Periodo de diseño de 25 años.**

Para un periodo de diseño de 25 años, se ha calculado un número acumulado de ejes equivalentes de 313125.55 como máximo.

$$W_{18} = \sum [ EE_{\text{día-carril}} , Fca , 365 ] = 313125.55$$

**Tabla 93***Espesores de pavimento con periodo de diseño de 25 años*

| CBR (%)          | 6     | 10    | 15    | 20    | 25    | 40    |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SN calculado     | 2.502 | 2.208 | 1.997 | 1.857 | 1.745 | 1.55  |
| Base (cm)        | 29.81 | 29.81 | 29.81 | 29.81 | 29.81 | 29.81 |
| Subbase (cm)     | 20.26 | 14    | 9.51  | 6.53  | 4.33  | 0     |
| Base* (cm)       | 30    | 30    | 30    | 30    | 35    | 30    |
| Subbase*(cm)     | 25    | 15    | 15    | 15    | 0     | 0     |
| SN* Suministrado | 2.735 | 2.265 | 2.265 | 2.265 | 1.82  | 1.56  |

Nota: Elaboración propia

(\*) Valor suministrado

**Tabla 94***Espesor de pavimento flexible según CBR*

|              | 6≤CBR<10 | 10≤CBR<25 | 25≤CBR<40 | 40≤CBR |
|--------------|----------|-----------|-----------|--------|
| Base* (cm)   | 30       | 30        | 35        | 30     |
| Subbase*(cm) | 25       | 15        | 0         | 0      |

Nota: Elaboración propia

**7.3 Pavimentos rígido.****7.3.1 Subestación eléctrica de maniobra**

Par las condiciones típicas de una subestación eléctrica de maniobras donde solo circularan vehículos del tipo C2 para su mantenimiento y operación. Se consideran los siguientes parámetros para el cálculo del número de ejes equivalentes.

**Tabla 95***Parámetros para el cálculo de W18*

| Parámetro | Valor | Descripción                                           |
|-----------|-------|-------------------------------------------------------|
| IMDA      | 5     | Se proyecta 5 vehículos C2 diarios                    |
| Fd=       | 0.5   | Se considera 1 calzada con 2 sentidos                 |
| Fc=       | 1     | Se considera un tránsito homogéneo en ambos sentidos. |
| Fp=       | 1     | El 90% de la presión en los neumáticos es 80 PSI*     |
| r         | 2%    | tasa anual de crecimiento                             |

Nota: Elaboración propia

**7.3.1.1 Periodo de diseño de 25 años.**

Para un periodo de diseño de 25 años, se ha calculado un número acumulado de ejes equivalentes de 134671.08 como máximo.

$$W_{18} = \sum [ EE_{\text{día-carril}} , Fca , 365 ] = 134671.08$$

Aplicando la ecuación indicada por la metodología AASTHO 93, se calcula el espesor de la losa, las cuales se muestran en la Tabla 96

**Tabla 96***Espesores de pavimento con periodo de diseño de 25 años*

| CBR (%)      | 6     | 10    | 15    | 20    | 25    | 40     |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Kc (Mpa/m)   | 49.50 | 61.74 | 1.341 | 81.88 | 92.66 | 124.93 |
| Subbase (cm) | 15    | 15    | 15    | 15    | 15    | 15     |
| Losa (cm)    | 15    | 15    | 15    | 15    | 15    | 15     |

Nota: Elaboración propia

Para cualquier valor de CBR mayor a 6% y defino el máximo número acumulado de ejes equivalentes  $W_{18} = 134671.08$ , El espesor de la losa y de la subbase debe ser de 15cm.

**Tabla 97***Espesor de pavimento rígido según CBR.*

| 6≤CBR        |    |
|--------------|----|
| Subbase (cm) | 15 |
| Losa(cm)     | 15 |

Nota: Elaboración propia.

## Capítulo VIII. Análisis de resultados.

### 8.1 Capacidad estructural de pavimento flexible.

De acuerdo con lo establecido en el Capítulo VII, se establecen los espesores correspondientes para la base y subbase de un pavimento flexible con tratamiento superficial bicapa, considerando un periodo de diseño de 10 y 25 años. Para el entorno de una Subestación eléctrica de maniobra y una Subestación eléctrica de transformación.

**Tabla 98**

*Espesor de pavimento flexible, según su capacidad estructural  $W_{18}=44998.80$*

| SE de maniobra, n=10 años; $W_{18}=44998.80$ |                          |                           |                      |
|----------------------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------|
|                                              | $6 \leq \text{CBR} < 20$ | $20 \leq \text{CBR} < 40$ | $40 \leq \text{CBR}$ |
| Base (cm)                                    | 20                       | 25                        | 20                   |
| Subbase(cm)                                  | 15                       | 0                         | 0                    |
| SN suministrado                              | 1.745                    | 1.30                      | 1.04                 |

Nota: Elaboración propia

**Tabla 99**

*Espesor de pavimento flexible, según su capacidad estructural  $W_{18}=131631.21$*

| SE de maniobra; n=25 años; $W_{18}=131631.21$ |                          |                           |                           |                      |
|-----------------------------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|
|                                               | $6 \leq \text{CBR} < 10$ | $10 \leq \text{CBR} < 20$ | $20 \leq \text{CBR} < 40$ | $40 \leq \text{CBR}$ |
| Base (cm)                                     | 25                       | 25                        | 30                        | 25                   |
| Subbase*(cm)                                  | 20                       | 15                        | 0                         | 0                    |
| SN suministrado                               | 2.24                     | 2.005                     | 2.005                     | 1.3                  |

Nota: Elaboración propia

**Tabla 100**

*Espesor de pavimento flexible, según su capacidad estructural  $W_{18}=107043.56$*

| SE de transformación; n=10 años; $W_{18}=107043.56$ |                          |                           |                      |
|-----------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------|
|                                                     | $6 \leq \text{CBR} < 20$ | $20 \leq \text{CBR} < 35$ | $35 \leq \text{CBR}$ |
| Base (cm)                                           | 20                       | 30                        | 25                   |
| Subbase (cm)                                        | 15                       | 0                         | 0                    |
| SN suministrado                                     | 2.005                    | 1.56                      | 1.30                 |

Nota: Elaboración propia

**Tabla 101.**

*Espesor de pavimento flexible, según su capacidad estructural  $W_{18}=313125.55$*

| SE de transformación; n=25 años; $W_{18}=313125.55$ |                          |                           |                           |                      |
|-----------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|
|                                                     | $6 \leq \text{CBR} < 10$ | $10 \leq \text{CBR} < 25$ | $25 \leq \text{CBR} < 40$ | $40 \leq \text{CBR}$ |
| Base (cm)                                           | 30                       | 30                        | 35                        | 30                   |
| Subbase (cm)                                        | 25                       | 15                        | 0                         | 0                    |
| SN suministrado                                     | 2.735                    | 2.265                     | 1.82                      | 1.56                 |

Nota: Elaboración propia

## 8.2 Capacidad estructural de pavimento rígido.

Conforme a lo establecido en el Capítulo VII, se determina un espesor de 15 cm para la losa de concreto y la subbase, aplicable a un periodo de diseño de hasta 25 años, para el entorno de una Subestación Eléctrica de Maniobra y de transformación.

**Tabla 102.**

*Espesor de pavimento rígido, para una SE de maniobra y una SE de transformación*

|              | 6≤CBR |
|--------------|-------|
| Subbase (cm) | 15    |
| Losa(cm)     | 15    |

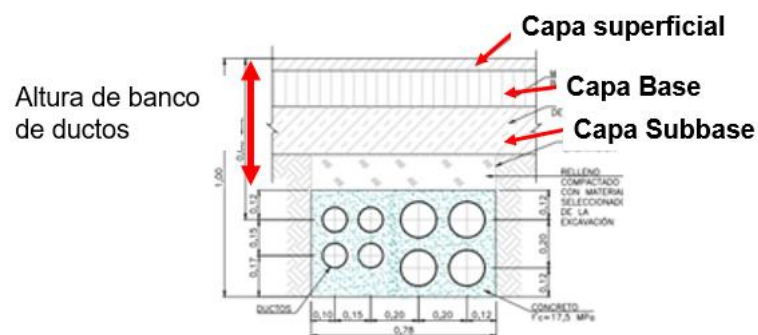
*Nota:* Elaboración propia

## 8.3 Interferencias Potenciales.

Una de las principales interferencias que afectan a los pavimentos en las subestaciones eléctricas es la presencia de ductos eléctricos que atraviesan las vías internas. A continuación, se detallan las alturas requeridas para los bancos de ductos, según las especificaciones del área electromecánica, que deberán ubicarse bajo la vía de la subestación eléctrica, conforme al cálculo y configuración establecidos en la disposición física (DF).

**Figura 44**

*Altura de banco de ductos bajo la vía de una SE.*



*Nota:* Adaptado de plano PE-CHIN-DISE1-S-01-K2502, HVM Ingenieros Ltda. (Sucursal Perú)

**Tabla 103**

*Altura de banco de ductos de la SE Moquegua*

| SE Moquegua     |                    |                                                        |
|-----------------|--------------------|--------------------------------------------------------|
| Banco de Ductos | Ancho de Zanja (m) | Altura mínima de banco de ductos respecto a la vía (m) |
| 6 $\phi$ 4"     | 0,50               | 0,80                                                   |
| 9 $\phi$ 4"     | 0,50               | 0,80                                                   |

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 104*****Altura de banco de ductos de la SE Yaros***

| SE Yaros        |                    |                                                        |
|-----------------|--------------------|--------------------------------------------------------|
| Banco de Ductos | Ancho de Zanja (m) | Altura mínima de banco de ductos respecto a la vía (m) |
| 5 $\phi$ 2"     | 0,40               | 0,575                                                  |
| 12 $\phi$ 4"    | 0,65               | 0,90                                                   |
| 15 $\phi$ 4"    | 0,80               | 0,90                                                   |
| 4 $\phi$ 8"     | 1,00               | 2,40                                                   |

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 105*****Altura de banco de ductos de la SE Chincha***

| SE Chincha                |                    |                                                        |
|---------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------|
| Banco de Ductos           | Ancho de Zanja (m) | Altura mínima de banco de ductos respecto a la vía (m) |
| 2 $\phi$ 4"               | 0,35               | 0,65                                                   |
| 4 $\phi$ 4"               | 0,35               | 0,80                                                   |
| 6 $\phi$ 4"               | 0,5                | 0,80                                                   |
| 4 $\phi$ 6"               | 0,45               | 0,90                                                   |
| 4 $\phi$ 4" y 4 $\phi$ 6" | 0,78               | 1,00                                                   |

*Nota:* Elaboración propia

Debido a la variedad en los diámetros y la cantidad de ductos eléctricos, no es posible establecer una altura típica que permita evaluar de manera precisa el espesor total necesario del pavimento para evitar interferencias. No obstante, es factible estimar los espesores de los pavimentos para las condiciones de una SE, lo que a su vez permitirá determinar la altura mínima a la cual deben ubicarse estos ductos por debajo de la vía.

**8.3.1 Subestación eléctrica de maniobra****Tabla 106*****Altura mínima de banco de ductos para  $W_{18}=44998.80$ .***

| n=10 años; $W_{18}=44998.80$   |                 |                  |               |
|--------------------------------|-----------------|------------------|---------------|
|                                | 6 $\leq$ CBR<20 | 20 $\leq$ CBR<40 | 40 $\leq$ CBR |
| Espesor de pavimento (cm)      | 35              | 25               | 20            |
| Altura de banco de ductos (cm) | 45              | 35               | 30            |

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 107***Altura mínima de banco de ductos para  $W_{18}=131631.21$* 

| n=25 años; $W_{18}=131631.21$  |          |           |           |        |
|--------------------------------|----------|-----------|-----------|--------|
|                                | 6≤CBR<10 | 10≤CBR<20 | 20≤CBR<40 | 40≤CBR |
| Espesor de pavimento (cm)      | 45       | 40        | 30        | 25     |
| Altura de banco de ductos (cm) | 55       | 50        | 40        | 35     |

*Nota:* Elaboración propia**8.3.2 Subestación eléctrica de transformación.****Tabla 108***Altura mínima de banco de ductos para  $W_{18}=107043.56$* 

| n=10 años; $W_{18}=107043.56$  |          |           |        |
|--------------------------------|----------|-----------|--------|
|                                | 6≤CBR<20 | 20≤CBR<40 | 40≤CBR |
| Espesor de pavimento (cm)      | 35       | 25        | 20     |
| Altura de banco de ductos (cm) | 45       | 35        | 30     |

*Nota:* Elaboración propia**Tabla 109***Altura mínima de banco de ductos para  $W_{18}=313125.55$* 

| n=25 años; $W_{18}=313125.55$  |          |           |           |        |
|--------------------------------|----------|-----------|-----------|--------|
|                                | 6≤CBR<10 | 10≤CBR<25 | 25≤CBR<40 | 40≤CBR |
| Espesor de pavimento (cm)      | 55       | 45        | 35        | 30     |
| Altura de banco de ductos (cm) | 65       | 55        | 40        | 35     |

*Nota:* Elaboración propia**8.4 Análisis de costo económico.**

En esta sección, vamos a hacer un análisis general de los costos asociados a la construcción de las diferentes estructuras de pavimento que hemos evaluado en este estudio. Estas incluyen pavimento flexible con concreto asfáltico en caliente, pavimento flexible con tratamiento superficial bicapa (TSB) y pavimento rígido de concreto hidráulico. Nos enfocaremos en estimar los costos unitarios directos de los principales componentes de cada opción, sin entrar en detalles técnicos o en particularidades específicas del diseño. Con esta revisión, podremos tener una idea clara de cuánto dinero se necesita aproximadamente para construir cada tipo de pavimento en condiciones similares, ayudando así a comparar las alternativas de forma sencilla.

También es importante tener en cuenta el costo de mantenimiento periódico durante toda la vida útil del pavimento, considerando un mantenimiento periódico cada 10

años para los pavimentos flexibles con concreto asfáltico en caliente y de 3 años para los pavimentos flexibles con tratamiento superficial bicapa.

Proyecto : "Enlace 500kv Nueva Yanango-Nueva Huánuco y Subestaciones Asociadas"

Ubicación : Dpto: Huánuco. Prov: Huánuco. Dist: Amarilis

Propietario : ISA Transmataro

Fecha de proyecto : 02/08/2019

#### **8.4.1 Costo pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente**

##### **Sub base granular**

|                                                           |                |                  |                 |                   |                    |
|-----------------------------------------------------------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| Rendimiento m3/DIA                                        | MO             | 466.0000         | EQ              | 466               |                    |
| <b>Mano de obra</b>                                       | <b>Unidad</b>  | <b>Cuadrilla</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio S/.</b> | <b>Parcial S/.</b> |
| Peón                                                      | hh             | 4.0000           | 0.0687          | 14.69             | 1.01               |
| Capataz "A"                                               | hh             | 1.0000           | 0.0172          | 25.71             | 0.44               |
|                                                           |                |                  |                 |                   | <b>1.45</b>        |
| <b>Equipos</b>                                            |                |                  |                 |                   |                    |
| Herramientas manuales                                     | %MO            |                  | 3.0000          | 1.45              | 0.04               |
| Rodillo Liso Vibratorio Autopropulsado 101-135 HP 10-12tn | hm             | 1.0000           | 0.0172          | 146.88            | 2.53               |
| Motoniveladora de 145-150 HP                              | hm             | 1.0000           | 0.0172          | 201.89            | 3.47               |
|                                                           |                |                  |                 |                   | <b>6.04</b>        |
| <b>Subpartidas</b>                                        |                |                  |                 |                   |                    |
| Agua para la obra                                         | m <sup>3</sup> |                  | 0.1200          | 28.52             | 3.42               |
| Material de Sub-Base                                      | m <sup>3</sup> |                  | 1.2000          | 32.28             | 38.74              |
|                                                           |                |                  |                 |                   | <b>42.16</b>       |

Costo unitario directo de la sub base granular por m3 es de S/ 49.65.

##### **Base granular**

|                                                           |               |                  |                 |                   |                    |
|-----------------------------------------------------------|---------------|------------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| Rendimiento m3/DIA                                        | MO            | 325.0000         | EQ              | 325.0000          |                    |
| <b>Mano de obra</b>                                       | <b>Unidad</b> | <b>Cuadrilla</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio S/.</b> | <b>Parcial S/.</b> |
| Peón                                                      | hh            | 4.0000           | 0.0985          | 14.69             | 1.45               |
| Capataz "A"                                               | hh            | 1.0000           | 0.0245          | 25.71             | 0.63               |
|                                                           |               |                  |                 |                   | <b>2.08</b>        |
| <b>Equipos</b>                                            |               |                  |                 |                   |                    |
| Herramientas manuales                                     | %MO           |                  | 3.0000          | 2.08              | 0.06               |
| Rodillo Liso Vibratorio Autopropulsado 101-135 HP 10-12tn | hm            | 1.0000           | 0.0246          | 146.88            | 3.61               |
| Motoniveladora de 145-150 HP                              | hm            | 1.0000           | 0.0246          | 201.89            | 4.97               |

|                      |                |  |        |       |              |
|----------------------|----------------|--|--------|-------|--------------|
|                      |                |  |        |       | <b>8.64</b>  |
| <b>Subpartidas</b>   |                |  |        |       |              |
| Agua para la obra    | m <sup>3</sup> |  | 0.1200 | 28.52 | 3.42         |
| Material de Sub-Base | m <sup>3</sup> |  | 1.2000 | 32.28 | 38.74        |
|                      |                |  |        |       | <b>42.16</b> |

Costo unitario directo de la base granular por m3 es de S/ 52.88.

### **Imprimación asfáltica**

|                                           |                |                  |                 |                   |                    |
|-------------------------------------------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| Rendimiento m2/DIA                        | MO             | 4500.0000        | EQ              | 4500.0000         |                    |
|                                           |                |                  |                 |                   |                    |
| <b>Mano de obra</b>                       | <b>Unidad</b>  | <b>Cuadrilla</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio S/.</b> | <b>Parcial S/.</b> |
| Peón                                      | hh             | 6.0000           | 0.0107          | 14.69             | 0.16               |
| Capataz "A"                               | hh             | 1.0000           | 0.0018          | 25.71             | 0.05               |
|                                           |                |                  |                 |                   | <b>0.21</b>        |
| <b>Equipos</b>                            |                |                  |                 |                   |                    |
| Herramientas manuales                     | %MO            |                  | 5.0000          | 0.21              | 0.01               |
| Camión imprimador<br>210 HP de 2000 GLN   | hm             | 1.0000           | 0.0018          | 118.41            | 0.21               |
| Compresora neumática<br>87 HP 250-330 PCM | hm             | 1.0000           | 0.0018          | 73.18             | 0.13               |
| Minicargador 70 HP                        | hm             | 1.0000           | 0.0018          | 65.26             | 0.12               |
|                                           |                |                  |                 |                   | <b>0.47</b>        |
| <b>Subpartidas</b>                        |                |                  |                 |                   |                    |
| Arena                                     | m <sup>3</sup> |                  | 0.0057          | 40.19             | 0.23               |
| Asfalto diluido MC-30                     | l              |                  | 1               | 2.79              | 2.79               |
|                                           |                |                  |                 |                   | <b>3.02</b>        |

Costo unitario directo de la imprimación asfáltica por m3 es de S/ 3.70.

### **Concreto asfáltico en caliente**

|                                                                  |               |                  |                 |                   |                    |
|------------------------------------------------------------------|---------------|------------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| Rendimiento m3/DIA                                               | MO            | 242.0000         | EQ              | 242.0000          |                    |
|                                                                  |               |                  |                 |                   |                    |
| <b>Mano de obra</b>                                              | <b>Unidad</b> | <b>Cuadrilla</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio S/.</b> | <b>Parcial S/.</b> |
| Peón (AT)                                                        | hh            | 6.0000           | 0.1983          | 15.13             | 3.00               |
| Operario (AT)                                                    | hh            | 1.0000           | 0.0331          | 20.22             | 0.67               |
| Capataz "A" (AT)                                                 | hh            | 1.0000           | 0.0331          | 26.29             | 0.87               |
|                                                                  |               |                  |                 |                   | <b>4.54</b>        |
| <b>Equipos</b>                                                   |               |                  |                 |                   |                    |
| Herramientas manuales                                            | %MO           |                  | 5.0000          | 4.54              | 0.23               |
| Rodillo neumático<br>autopropulsado 135 HP<br>9.26 ton           | hm            | 1.0000           | 0.0331          | 133.96            | 4.43               |
| Rodillo Tándem vibratorio<br>autopropulsado 111-130HP<br>9-11ton | hm            | 1.0000           | 0.0331          | 192.47            | 6.37               |

|                                          |    |        |        |        |              |
|------------------------------------------|----|--------|--------|--------|--------------|
| Pavimentadora sobre orugas 105 HP 10-16´ | hm | 1.0000 | 0.0331 | 132.90 | 4.40         |
|                                          |    |        |        |        | <b>15.43</b> |

#### **Subpartidas**

|                              |     |  |        |        |               |
|------------------------------|-----|--|--------|--------|---------------|
| Cemento asfáltico 85/100     | gln |  | 36     | 12.31  | 443.16        |
| Mezcla asfáltica en caliente | m³  |  | 1.3000 | 199.92 | 259.90        |
|                              |     |  |        |        | <b>259.90</b> |

Costo unitario directo de concreto asfáltico en caliente por m3 es de S/ 723.03.

El costo por metro cubico de pavimento flexible en caliente según los precios unitarios presentados es de S/ 829.26.

### **8.4.2 Costo pavimento Flexible con TSB**

#### **Sub base granular**

|                                                           |               |                  |                 |                   |                    |
|-----------------------------------------------------------|---------------|------------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| Rendimiento m3/DIA                                        | MO            | 466.0000         | EQ              | 466               |                    |
| <b>Mano de obra</b>                                       | <b>Unidad</b> | <b>Cuadrilla</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio S/.</b> | <b>Parcial S/.</b> |
| Peón                                                      | hh            | 4.0000           | 0.0687          | 14.69             | 1.01               |
| Capataz "A"                                               | hh            | 1.0000           | 0.0172          | 25.71             | 0.44               |
|                                                           |               |                  |                 |                   | <b>1.45</b>        |
| <b>Equipos</b>                                            |               |                  |                 |                   |                    |
| Herramientas manuales                                     | %MO           |                  | 3.0000          | 1.45              | 0.04               |
| Rodillo Liso Vibratorio Autopropulsado 101-135 HP 10-12tn | hm            | 1.0000           | 0.0172          | 146.88            | 2.53               |
| Motoniveladora de 145-150 HP                              | hm            | 1.0000           | 0.0172          | 201.89            | 3.47               |
|                                                           |               |                  |                 |                   | <b>6.04</b>        |
| <b>Subpartidas</b>                                        |               |                  |                 |                   |                    |
| Agua para la obra                                         | m³            |                  | 0.1200          | 28.52             | 3.42               |
| Material de Sub-Base                                      | m³            |                  | 1.2000          | 32.28             | 38.74              |
|                                                           |               |                  |                 |                   | <b>42.16</b>       |

Costo unitario directo de la sub base granular por m3 es de S/ 49.65.

#### **Base granular**

|                       |               |                  |                 |                   |                    |
|-----------------------|---------------|------------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| Rendimiento m3/DIA    | MO            | 325.0000         | EQ              | 325.0000          |                    |
| <b>Mano de obra</b>   | <b>Unidad</b> | <b>Cuadrilla</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio S/.</b> | <b>Parcial S/.</b> |
| Peón                  | hh            | 4.0000           | 0.0985          | 14.69             | 1.45               |
| Capataz "A"           | hh            | 1.0000           | 0.0245          | 25.71             | 0.63               |
|                       |               |                  |                 |                   | <b>2.08</b>        |
| <b>Equipos</b>        |               |                  |                 |                   |                    |
| Herramientas manuales | %MO           |                  | 3.0000          | 2.08              | 0.06               |

|                                                           |                |        |        |        |              |
|-----------------------------------------------------------|----------------|--------|--------|--------|--------------|
| Rodillo Liso Vibratorio Autopropulsado 101-135 HP 10-12tn | hm             | 1.0000 | 0.0246 | 146.88 | 3.61         |
| Motoniveladora de 145-150 HP                              | hm             | 1.0000 | 0.0246 | 201.89 | 4.97         |
|                                                           |                |        |        |        | <b>8.64</b>  |
| <b>Subpartidas</b>                                        |                |        |        |        |              |
| Agua para la obra                                         | m <sup>3</sup> |        | 0.1200 | 28.52  | 3.42         |
| Material de Sub-Base                                      | m <sup>3</sup> |        | 1.2000 | 32.28  | 38.74        |
|                                                           |                |        |        |        | <b>42.16</b> |

Costo unitario directo de la base granular por m3 es de S/ 52.88.

#### **Tratamiento superficial bicapa 1era capa**

|                                                        |                |                  |                 |                   |                    |
|--------------------------------------------------------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| Rendimiento m2/DIA                                     | MO             | 3000.0000        | EQ              | 3000.0000         |                    |
| <b>Mano de obra</b>                                    | <b>Unidad</b>  | <b>Cuadrilla</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio S/.</b> | <b>Parcial S/.</b> |
| Capataz "A"                                            | hh             | 0.5000           | 0.0013          | 21.96             | 0.03               |
| Oficial                                                | hh             | 1.0000           | 0.0027          | 14.35             | 0.04               |
| Peón                                                   | hh             | 3.0000           | 0.0080          | 12.95             | 0.10               |
|                                                        |                |                  |                 |                   | <b>0.17</b>        |
| <b>Equipos</b>                                         |                |                  |                 |                   |                    |
| Herramientas manuales                                  | %MO            |                  | 5.0000          | 0.17              | 0.01               |
| Compresora neumática 87 HP 250-300 PCM                 | hm             | 1.0000           | 0.0027          | 81.33             | 0.22               |
| Minicargador 70HP                                      | hm             | 1.0000           | 0.0027          | 88.89             | 0.24               |
| Camión Imprimador 210 HP de 2000 gln                   | hm             | 1.0000           | 0.0027          | 112.64            | 0.30               |
| Rodillo neumático autopropulsado 135 HP 9.26 ton       | hm             | 1.0000           | 0.0027          | 137.78            | 0.37               |
|                                                        |                |                  |                 |                   | <b>1.14</b>        |
| <b>Subpartidas</b>                                     |                |                  |                 |                   |                    |
| Transporte de agregados para TSB                       | m <sup>3</sup> |                  | 0.0140          | 26.73             | 0.37               |
| Gravilla P/Tratamiento superficial                     | m <sup>3</sup> |                  | 0.0140          | 75.45             | 1.06               |
| Esparcimiento de agregados (manual)                    | m <sup>2</sup> |                  | 1.0000          | 1.09              | 1.09               |
| Emulsión asfáltica para imprimación                    |                |                  | 1.0000          | 3.7               | 3.70               |
| Emulsión asfáltica (CRS-1) para riego de liga 1ra capa |                |                  | 1.0000          | 2.70              | 2.70               |
|                                                        |                |                  |                 |                   | <b>8.92</b>        |

Costo unitario directo del tratamiento superficial bicapa 1ra capa por m3 es de S/ 10.23.

### **Tratamiento superficial bicapa 2da capa**

|                                                              |                |                  |                 |                   |                    |
|--------------------------------------------------------------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| Rendimiento m2/DIA                                           | MO             | 3400.0000        | EQ              | 3400.0000         |                    |
| <b>Mano de obra</b>                                          | <b>Unidad</b>  | <b>Cuadrilla</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio S/.</b> | <b>Parcial S/.</b> |
| Oficial                                                      | hh             | 1.0000           | 0.0024          | 14.35             | 0.03               |
| Capataz "A"                                                  | hh             | 0.5000           | 0.0012          | 21.96             | 0.03               |
| Peón                                                         | hh             | 3.0000           | 0.0071          | 12.95             | 0.09               |
|                                                              |                |                  |                 |                   | <b>0.15</b>        |
| <b>Equipos</b>                                               |                |                  |                 |                   |                    |
| Herramientas manuales                                        | %MO            |                  | 5.0000          | 0.15              | 0.01               |
| Compresora neumática<br>87 HP 250-300 PCM                    | hm             | 1.0000           | 0.0024          | 81.33             | 0.20               |
| Minicargador 70HP                                            | hm             | 1.0000           | 0.0024          | 88.89             | 0.21               |
| Camión Imprimador<br>210 HP de 2000 gln                      | hm             | 1.0000           | 0.0024          | 112.64            | 0.27               |
| Rodillo neumático<br>autopropulsado 135 HP<br>9.26 ton       | hm             | 1.0000           | 0.0024          | 137.78            | 0.33               |
|                                                              |                |                  |                 |                   | <b>1.02</b>        |
| <b>Subpartidas</b>                                           |                |                  |                 |                   |                    |
| Transporte de<br>agregados para TSB                          | m <sup>3</sup> |                  | 0.0120          | 26.73             | 0.32               |
| Gravilla P/Tratamiento<br>superficial                        | m <sup>3</sup> |                  | 0.0120          | 75.45             | 0.91               |
| Esparcimiento de<br>agregados (manual)                       | m <sup>2</sup> |                  | 1.0000          | 1.09              | 1.09               |
| Emulsión asfáltica<br>(CRS-1) para riego de<br>liga 2da capa |                |                  | 1.0000          | 2.70              | 2.70               |
|                                                              |                |                  |                 |                   | <b>5.02</b>        |

Costo unitario directo del tratamiento superficial bicapa 2da capa por m3 es de S/ 6.19.

El costo por metro cubico de pavimento flexible con tratamiento superficial bicapa según los precios unitarios presentados es de S/ 118.95.

### **8.4.3 Costo pavimento rígido de concreto**

#### **Base granular**

|                     |               |                  |                 |                   |                    |
|---------------------|---------------|------------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| Rendimiento m3/DIA  | MO            | 325.0000         | EQ              | 325.0000          |                    |
| <b>Mano de obra</b> | <b>Unidad</b> | <b>Cuadrilla</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio S/.</b> | <b>Parcial S/.</b> |

|             |    |        |        |       |             |
|-------------|----|--------|--------|-------|-------------|
| Peón        | hh | 4.0000 | 0.0985 | 14.69 | 1.45        |
| Capataz "A" | hh | 1.0000 | 0.0245 | 25.71 | 0.63        |
|             |    |        |        |       | <b>2.08</b> |

#### **Equipos**

|                                                           |     |        |        |        |      |
|-----------------------------------------------------------|-----|--------|--------|--------|------|
| Herramientas manuales                                     | %MO |        | 3.0000 | 2.08   | 0.06 |
| Rodillo Liso Vibratorio Autopropulsado 101-135 HP 10-12tn | hm  | 1.0000 | 0.0246 | 146.88 | 3.61 |
| Motoniveladora de 145-150 HP                              | hm  | 1.0000 | 0.0246 | 201.89 | 4.97 |

**8.64**

#### **Subpartidas**

|                      |                |  |        |       |              |
|----------------------|----------------|--|--------|-------|--------------|
| Agua para la obra    | m <sup>3</sup> |  | 0.1200 | 28.52 | 3.42         |
| Material de Sub-Base | m <sup>3</sup> |  | 1.2000 | 32.28 | 38.74        |
|                      |                |  |        |       | <b>42.16</b> |

Costo unitario directo de la base granular por m3 es de S/ 52.88

#### **Losa de concreto hidráulico**

|                                   |                |                  |                 |                   |                    |
|-----------------------------------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| Rendimiento m3/DIA                | MO             | 75.0000          | EQ              | 75.0000           |                    |
| <b>Mano de obra</b>               | <b>Unidad</b>  | <b>Cuadrilla</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio S/.</b> | <b>Parcial S/.</b> |
| Operario                          | hh             | 4.0000           | 0.4267          | 16.89             | 7.21               |
| Oficial                           | hh             | 8.0000           | 0.8533          | 14.35             | 12.24              |
| Peón                              | hh             | 4.0000           | 0.4267          | 12.95             | 5.53               |
| Capataz "A"                       | hh             | 0.1000           | 0.0107          | 21.96             | 0.23               |
|                                   |                |                  |                 |                   | <b>25.21</b>       |
| <b>Equipos</b>                    |                |                  |                 |                   |                    |
| Herramientas manuales             | %MO            |                  | 5.0000          | 25.21             | 1.26               |
|                                   |                |                  |                 |                   | <b>1.26</b>        |
| <b>Subpartidas</b>                |                |                  |                 |                   |                    |
| Concreto Clase D (f'c=210 kg/cm2) | m <sup>3</sup> |                  | 1.0000          | 391.83            | 391.83             |
| Encofrado y desencofrado          | m <sup>2</sup> |                  | 0.8000          | 22.13             | 17.70              |
|                                   |                |                  |                 |                   | <b>409.53</b>      |

Costo unitario directo de la losa de concreto hidráulico por m3 es de S/ 436.

El costo por metro cubico de pavimento rígido según los precios unitarios presentados es de S/ 488.88.

#### **8.4.4 Comparación de costos por tipo de pavimento.**

A continuación, se presenta de manera general el costo por metro cuadrado de los distintos tipos de pavimento previstos para las subestaciones eléctricas Moquegua, Yaros

y Chíncha. proporcionando así una visión integral del presupuesto requerido para cada alternativa constructiva:

- Pavimento flexible con tratamiento superficial bicapa (TSB)
- Pavimento flexible con concreto asfáltico en caliente (CAC)
- Pavimento rígido

**Tabla 110**

*Costo de pavimento flexible TSB*

|            |                      | TSB          |              |              |
|------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|
|            |                      | SE. Moquegua | SE Yaros     | SE Chíncha   |
|            | Sub base             | 15.00        | 15.00        | 15.00        |
|            | Base                 | 25.00        | 30.00        | 30.00        |
|            | Imprimación          | 0.00         | 0.00         | 0.00         |
| Estructura | T.S.B                | 2.54         | 2.54         | 2.54         |
| h(cm)      | CAC                  | 0.00         | 0.00         | 0.00         |
|            | LOSA                 | 0.00         | 0.00         | 0.00         |
|            | Sub base (m3)        | 49.65        | 49.65        | 49.65        |
|            | Base (m3)            | 52.88        | 52.88        | 52.88        |
| Costo      | Imprimación (m2)     | 0.00         | 0.00         | 0.00         |
|            | T.S.B (m2)           | 13.63        | 13.63        | 13.63        |
|            | CAC (m3)             | 0.00         | 0.00         | 0.00         |
|            | LOSA (m3)            | 0.00         | 0.00         | 0.00         |
|            | Sub base (m2)        | 7.45         | 7.45         | 7.45         |
|            | Base (m2)            | 13.22        | 15.86        | 15.86        |
|            | Imprimación (m2)     | 0.00         | 0.00         | 0.00         |
| Costo/m2   | T.S.B (m2)           | 16.42        | 16.42        | 16.42        |
|            | CAC (m2)             | 0.00         | 0.00         | 0.00         |
|            | LOSA (m2)            | 0.00         | 0.00         | 0.00         |
|            | <b>TOTAL: \$/ m2</b> | <b>37.09</b> | <b>39.73</b> | <b>39.73</b> |

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 111**

*Costo de pavimento flexible CAC*

|            |                  | CAC          |          |            |
|------------|------------------|--------------|----------|------------|
|            |                  | SE. Moquegua | SE Yaros | SE Chíncha |
|            | Sub base         | 0            | 0        | 0          |
|            | Base             | 15.00        | 20.00    | 20.00      |
|            | Imprimación      | 0.00         | 0.00     | 0.00       |
| Estructura | T.S.B            | 0.00         | 0.00     | 0.00       |
| h(cm)      | CAC              | 6.00         | 8.00     | 8.00       |
|            | LOSA             | 0.00         | 0.00     | 0.00       |
|            | Sub base (m3)    | 0.00         | 0.00     | 0.00       |
|            | Base (m3)        | 52.88        | 52.88    | 52.88      |
| Costo      | Imprimación (m2) | 0.91         | 0.91     | 0.91       |

|          |                      |              |              |              |
|----------|----------------------|--------------|--------------|--------------|
|          | T.S.B (m2)           | 0.00         | 0.00         | 0.00         |
|          | CAC (m3)             | 723.03       | 723.03       | 723.03       |
|          | LOSA (m3)            | 0.00         | 0.00         | 0.00         |
|          | Sub base (m2)        | 0            | 0            | 0            |
|          | Base (m2)            | 7.93         | 10.58        | 10.58        |
|          | Imprimación (m2)     | 0            | 0            | 0            |
| Costo/m2 | T.S.B (m2)           | 0            | 0            | 0            |
|          | CAC (m2)             | 43.38        | 57.84        | 57.84        |
|          | LOSA (m2)            | 0.00         | 0.00         | 0.00         |
|          | <b>TOTAL: \$/ m2</b> | <b>51.31</b> | <b>68.42</b> | <b>68.42</b> |

Nota: Elaboración propia

**Tabla 112**

*Costo de pavimento Rígido*

|                      |                  | Pavimento Rígido |              |              |
|----------------------|------------------|------------------|--------------|--------------|
|                      |                  | SE.Moquegua      | SE Yaros     | SE Chincha   |
| Costo                | Sub base         | 0                | 0            | 0            |
|                      | Base             | 15.00            | 15.00        | 15.00        |
|                      | LOSA             | 15.00            | 15.00        | 15.00        |
|                      | Sub base (m3)    | 0.00             | 0.00         | 0.00         |
|                      | Base (m3)        | 52.88            | 52.88        | 52.88        |
|                      | Imprimación (m2) | 0.00             | 0.00         | 0.00         |
|                      | T.S.B (m2)       | 0.00             | 0.00         | 0.00         |
|                      | CAC (m3)         | 0.00             | 0.00         | 0.00         |
|                      | LOSA (m3)        | 436.00           | 436.00       | 436.00       |
|                      | Sub base (m2)    | 0                | 0            | 0            |
|                      | Base (m2)        | 7.93             | 7.93         | 7.93         |
|                      | LOSA (m2)        | 65.40            | 65.40        | 65.40        |
| <b>TOTAL: \$/ m2</b> |                  | <b>73.33</b>     | <b>73.33</b> | <b>73.33</b> |

Nota: Elaboración propia

**Tabla 113**

*Comparación de costos por tipo de pavimento SE Moquegua*

| SE Moquegua. Costo \$/ por m <sup>2</sup> de pavimento |                            |                  |
|--------------------------------------------------------|----------------------------|------------------|
| Pavimento flexible en caliente (CAC)                   | Pavimento flexible con TSB | Pavimento rígido |
| 51.31                                                  | 37.09                      | 73.33            |

Nota: Elaboración propia

**Tabla 114*****Comparación de costos por tipo de pavimento SE Yaros***

| SE Yaros. Costo S/ por m <sup>2</sup> de pavimento |                            |                  |
|----------------------------------------------------|----------------------------|------------------|
| Pavimento flexible en caliente (CAC)               | Pavimento flexible con TSB | Pavimento rígido |
| 68.42                                              | 39.73                      | 73.33            |

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 115*****Comparación de costos por tipo de pavimento SE Chincha***

| SE Chincha. Costo S/ por m <sup>2</sup> de pavimento |                            |                  |
|------------------------------------------------------|----------------------------|------------------|
| Pavimento flexible en caliente (CAC)                 | Pavimento flexible con TSB | Pavimento rígido |
| 68.42                                                | 39.73                      | 73.33            |

*Nota:* Elaboración propia

Asimismo, se considera los costos por mantenimiento periódico para un periodo de diseño de hasta 25 años.

**Tabla 116*****Costos de mantenimiento en S/ por m<sup>2</sup> tipo de pavimento***

| Costo de mantenimiento en S/ por m <sup>2</sup> de pavimento |                            |                  |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------|
| Pavimento flexible en caliente                               | Pavimento flexible con TSB | Pavimento rígido |
| 36.04                                                        | 21.19                      | -                |

*Nota:* Adaptado de (Aguilar Mestas & Salas Chávez, 2012)

**Tabla 117*****Costos de mantenimiento en S/ por m<sup>2</sup> por periodo de diseño***

| Pavimento flexible en caliente |           | Pavimento flexible con TSB |           |
|--------------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| n=10 años                      | n=25 años | n=10 años                  | n=25 años |
| 0                              | 72.08     | 63.57                      | 169.52    |

*Nota:* Elaboración propia

## Conclusiones

- La comparación entre pavimentos rígidos y flexibles aplicados a las vías internas de subestaciones eléctricas, bajo las condiciones geotécnicas peruanas, evidencia que ambos tipos de pavimento pueden cumplir con los requerimientos estructurales cuando se diseñan correctamente siguiendo la metodología AASHTO 93. Sin embargo, los pavimentos flexibles ofrecen una mayor adaptabilidad en la variación de espesores de la base y la subbase, lo que resulta ventajoso en el contexto particular de una subestación eléctrica.
- La evaluación con la metodología AASHTO 93 muestra que los pavimentos flexibles en subestaciones de maniobra alcanzan números estructurales de 1.04 a 1.745 para un periodo de diseño 10 años y de 1.30 a 2.24 para un periodo de diseño de 25 años, mientras que en subestaciones de transformación varían entre 1.30 y 2.005 para un periodo de diseño de 10 años y de 1.56 a 2.735 para un periodo de diseño de 25 años, evidenciando su adaptabilidad mediante ajustes en base y subbase. En pavimentos rígidos, la capacidad estructural se asegura con una sección mínima de 15 cm de subbase y 15 cm de losa de concreto hidráulico, conforme al Manual del MTC, garantizando uniformidad y desempeño adecuado. La evaluación confirma que tanto los pavimentos flexibles como los rígidos cumplen con los requerimientos estructurales exigidos, validando la aplicabilidad de la metodología AASHTO 93 en el diseño de vías internas para subestaciones eléctricas en el Perú.
- Las principales interferencias en las vías internas de las subestaciones eléctricas corresponden a los ductos eléctricos o de drenaje, cuya ubicación debe definirse en función de los espesores del pavimento, las cargas de diseño (W18), así como de la cantidad y diámetro de los ductos. Para preservar la integridad mecánica de las tuberías (PVC o HDPE), en subestaciones de maniobra se recomienda considerar alturas mínimas de 30 cm a 45 cm, mientras que en subestaciones de transformación los valores mínimos pueden oscilar entre 35 cm y 55 cm. Este análisis pone de manifiesto la necesidad de una coordinación estrecha entre el diseño civil y electromecánico, de modo que se garantice tanto la capacidad estructural del pavimento como la correcta instalación y protección de los ductos. No obstante, debido a la variabilidad de configuraciones y demandas en cada proyecto, no es posible establecer una altura única o estándar, resultando indispensable un análisis particular para cada subestación que asegure el cumplimiento de los requisitos técnicos y de seguridad.

- La gestión de las interferencias potenciales en las subestaciones revela que, si bien los pavimentos rígidos proporcionan una solución estructural sólida con espesores uniformes, los pavimentos flexibles ofrecen ventajas en términos de adaptabilidad y facilidad para futuras modificaciones o rehabilitaciones, especialmente en presencia de complejas redes de ductos y drenajes subterráneos. Por lo tanto, la selección del tipo de pavimento debe considerar no solo la capacidad estructural, sino también la logística y el mantenimiento a largo plazo.
- Se observó que el pavimento flexible con tratamiento superficial bicapa (TSB) permite un manejo más eficiente de las interferencias previsibles en una subestación eléctrica, como canalizaciones, anclajes o modificaciones operativas menores. Además, presenta el costo inicial por metro cuadrado más bajo entre las alternativas evaluadas (S/ 37.09/m<sup>2</sup> para la SE Moquegua y S/ 39.73/m<sup>2</sup> para la SE Yaros y Chíncha), en comparación con el pavimento flexible en caliente (S/ 51.31/m<sup>2</sup> para la SE Moquegua y S/ 68.42/m<sup>2</sup> para la SE Yaros y Chíncha) y el pavimento rígido (S/ 73.33/m<sup>2</sup> para la SE Moquegua, SE Yaros y SE Chíncha). Esta diferencia significativa respalda la viabilidad del TSB como una opción económica y funcional para áreas de bajo tránsito vehicular, como los accesos y zonas interiores de una subestación eléctrica.
- Como conclusión adicional se observó que los costos de mantenimiento acumulados a lo largo del periodo de diseño muestran que, aunque el pavimento flexible con tratamiento superficial bicapa (TSB) tiene un menor costo por intervención individual (S/ 21.19/m<sup>2</sup>), su mayor frecuencia de mantenimiento genera un incremento significativo en el costo acumulado a largo plazo. En un periodo de 25 años, el TSB alcanza un costo de mantenimiento de S/ 169.52/m<sup>2</sup>, mientras que el pavimento flexible en caliente se mantiene en S/ 63.57/m<sup>2</sup>. No obstante, considerando el costo global de construcción y mantenimiento, el TSB continúa siendo la alternativa más económica durante toda la vida útil del pavimento, lo que la posiciona como una opción viable y eficiente para vías de bajo tránsito, como las que se encuentran en subestaciones eléctricas.

## Recomendaciones

- Se recomienda la implementación de pavimento flexible con tratamiento superficial bicapa (TSB) en subestaciones eléctricas del tipo transformación y maniobra, debido a que representa una solución técnicamente viable y económicamente eficiente frente al pavimento rígido. Su menor costo de ejecución inicial y su adaptabilidad a interferencias propias de este tipo de instalaciones lo convierten en una alternativa adecuada para zonas de bajo tránsito y mantenimiento accesible.
- Se recomienda que el diseño de las vías internas en subestaciones eléctricas se realice de manera coordinada entre los equipos de ingeniería civil y electromecánica, asegurando que la ubicación y protección de los ductos eléctricos subterráneos se consideren desde las etapas iniciales del proyecto, para evitar interferencias estructurales y facilitar el mantenimiento.
- Es fundamental realizar estudios geotécnicos detallados y basar el diseño estructural del pavimento flexible o rígido en valores precisos de CBR y características del suelo para optimizar los espesores de la base, subbase y losa, garantizando durabilidad y resistencia frente a las cargas de tráfico esperadas.
- Los ductos eléctricos y las canalizaciones de drenaje deben estar embebidos en concreto u otro material protector que asegure su integridad frente a cargas vehiculares y posibles movimientos del terreno. Además, se deben respetar las alturas mínimas establecidas para evitar daños durante el tráfico de vehículos pesados.
- Dado que las subestaciones eléctricas pueden requerir adaptaciones o expansiones, se sugiere optar por pavimentos flexibles cuando sea posible, que faciliten reparaciones y modificaciones sin generar grandes interrupciones, mientras se mantiene la integridad estructural.
- Se recomienda respetar rigurosamente las distancias de seguridad estipuladas en normativas como la IEC 61936, las especificaciones del Manual de Diseño de Pavimentos del MTC y otros estándares aplicables, para garantizar un entorno seguro tanto para el personal como para la infraestructura.
- Para maximizar la vida útil de los pavimentos y garantizar la funcionalidad de los ductos, es aconsejable establecer planes de inspección y mantenimiento periódicos que detecten de manera temprana posibles daños o interferencias, permitiendo su corrección oportuna.

## Referencias Bibliográficas

- AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (6th ed.)*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials. Obtenido de <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/aashto.cfm>
- Acosta Puerto, O. E. (2020). *INSTRUCTIVO PARA PRUEBAS A RELES DE SOBRECORRIENTE EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS SOPORTADO EN PLATAFORMA VIRTUAL*. Tesis de Pregrado, Universidad Antonio Nariño. Obtenido de <https://repositorio.uan.edu.co/items/507102ad-173f-47ba-a93f-12d3ae0c75be>
- Aguilar Mestas, N., & Salas Cháves, G. C. (2012). *Comparación entre tratamiento superficial bicapa y asfalto en caliente, en la rehabilitación de la carretera Chacachaca-Yunguyo-Kasani*. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA, Arequipa, Perú. Obtenido de <https://repositorio.ucsm.edu.pe/bitstream/20.500.12920/4186/1/45.0084.IC.pdf>
- Alcántar Bazúa , L. P. (2015). *APUNTES DE LA ASIGNATURA: SUBESTACIONES ELÉCTRICAS*. Tecnológico Nacional de Mexico. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/303543292\\_Estructuras\\_y\\_equipos\\_de\\_Subestaciones\\_Electricas](https://www.researchgate.net/publication/303543292_Estructuras_y_equipos_de_Subestaciones_Electricas)
- Anglo American. (s.f). *Quellaveco: conoce nuestra unidad minera en Moquegua*. Obtenido de <https://peru.angloamerican.com/quellaveco/el-proyecto.aspx?form=MG0AV3>
- ANSI/IEEE Std C2. (2017). *National Electrical Safety Code*. IEEE. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7526279>
- Billinton, R., & Allan, R. (1996). *Reliability Evaluation of Power Systems*. doi:<https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1860-4>
- Brown, R. (2009). *Electric Power Distribution Reliability*. doi:<https://doi.org/10.1201/9780849375682>
- Christopoulos, C. (2012). *Electrical Power Systems: Design and Analysis*. John Wiley & Sons.
- COES. (2024). *Información sobre demanda energética*. Obtenido de <https://www.coes.org.pe/portal>
- ELECTRICA. (2019). *SUBESTACIONES ELÉCTRICAS: Transformando y distribuyendo energía*. Obtenido de <https://electrica.mx/wp-content/uploads/2019/02/Electrica34.pdf>
- Elgerd, O. I. (1982). *Electric Energy Systems Theory: An Introduction*. McGraw-Hill. Obtenido de <https://books.google.com.pe/books?id=AKTi3UxfhlG>
- Espinoza Barrientos, M. (2020). *Diseño de pavimento flexible usando tratamiento superficial bicapa, para el mejoramiento de la transitabilidad de la trocha carrozable del tramo de paucarbamba - centro poblado de huanchos, Churcampa, Huancavelica*. [Tesis de Pregrado, Universidad Peruana Del Centro]. Obtenido de <http://repositorio.upecen.edu.pe/handle/20.500.14127/248>

- Gonen, T. (2014). *Electrical Power Transmission System Engineering* (Tercera Edición. 3ª ed.). Prensa CRC. doi:<https://doi.org/10.1201/b17055>
- Guerra Chayña, P. R., & Guerra Ramos, C. E. (2020). Diseño de un pavimento rígido permeable como sistema urbano de drenaje sostenible. *FIDES ET RATIO*, 20(20), Pág. 121-140. Obtenido de <https://fidesetratio.ulasalle.edu.bo/index.php/fidesetratio/article/view/76>
- Huang, Y. (2004). *Pavement analysis and design*. Obtenido de <https://archive.org/details/pavementanalysis0000huan>
- IEEE Std 484. (2019). *IEEE Recommended Practice for Installation of Vented Lead-Acid Batteries for Stationary Applications*. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/9141541>
- International Electrotechnical Commission. (2021). *IEC 61936-1: Power installations exceeding 1 kV AC and 1.5 kV DC – Part 1: General requirements*. Ginebra, Suiza. Obtenido de <https://webstore.iec.ch/en/publication/64490?form=MG0AV3>
- Londoño Naranjo, C., & Alvarez Pabón, J. A. (2008). *Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito*. Instituto Colombiano de Productores de Cemento.
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2015). *Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de carreteras*. (RD N° 003-2015-EF/63.01). Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/mef/normas-legales/232247-003-2015-ef-63-01>
- Ministerio de Energía y Minas. (2015). *Resolución Ministerial N.º 225-2015-MEM/DM: Encargo a PROINVERSIÓN para la licitación de proyectos vinculados al Plan de Transmisión 2015-2024. Diario Oficial El Peruano*. Obtenido de <https://www.investinperu.pe/>
- Ministerio de Energía y Minas. (2020). *Resolución Ministerial N.º 109-2020-MINEM-DM. Gobierno del Perú*. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/minem/normas-legales/478086-109-2020-minem-dm>
- Ministerio de Energía y Minas. (2022). *Resolución Ministerial N.º 392-2022-MINEM-DM. El Peruano*. Obtenido de <https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/2122382-1>
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2018). *Manual de carreteras: Diseño geométrico DG-2018*. Obtenido de [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/manuales.html](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html)
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2021). *Compendio Normativo de Pesos y Medidas*. Lima, Perú. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/sutran/informes-publicaciones/1787397-compendio-normativo-sobre-pesos-y-medidas>

- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). *Manual de carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos. Sección suelos y pavimentos R.D. N°10-2014-MTC/14*. Lima, Perú. Obtenido de <https://www.mtc.gob.pe/>
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2018). *CÓDIGO DE NORMAS Y ESPECIFICACIONES*. Gobierno de Chile. Obtenido de <https://infoinvi.uchilefau.cl/codigo-de-normas-y-especificaciones-tecnicas-de-obras-de-pavimentacion-2018/>
- Oliveira, R., Santana, J., Almeida, T., & Santos, L. (2019). *Substation Design: A Review of Key Considerations and Future Trends*. Electric Power Systems Research. doi:10.1016/j.epsr.2019.105876
- Pabla, A. S. (2005). *Electric power distribution*. McGraw-Hill. Obtenido de <https://archive.org/details/electricpowerdis0000pabl>
- Revista Energía. (2024). *Proyecto Yana-Coya: Mejorando la infraestructura eléctrica en el centro del Perú*. Obtenido de <https://revistaenergia.pe/isa-rep-linea-de-transmision-electrica-del-proyecto-yana-coya-presenta-un-avance-del-80/>
- Rodríguez Guerrero, F. E. (2022). *Evaluación de la condición global en vías de bajo volumen de tránsito y propuesta de intervención*. [Tesis de Pregrado, Universidad de Piura]. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11042/5527>
- Ruiz Roldán, K. J., & Mimbela Jiménez, M. A. (2021). *Análisis del sector de energía eléctrica en el Perú*. [Tesis de Maestría, Universidad de Piura]. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11042/5092>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2021). *Teorías para calcular esfuerzos, deformaciones y deflexiones en pavimentos flexibles: un enfoque mecanicista*. Ciudad de México, México. Obtenido de <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/DocumentoTecnico/dt72.pdf>
- Silva, M., Romero, R., Martins, A., & Ribeiro, P. (2020). *Substation Modernization Project in Brazil: A Case Study*. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/8948923>
- Sotomayor Alejandro, F. (2017). *Sensibilización de los parámetros utilizados en el diseño de pavimentos rígidos por la guía empírico-mecanicista de diseño de pavimentos GEMDP AASHTO 2008*. [Tesis de Pregrado, Universidad técnica federico santa maria departamento de obras civiles Valparaiso-Chile]. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11673/22662>
- Stevenson, W. D. (1994). *Power system analysis*. McGraw-Hill. Obtenido de <https://archive.org/details/powersystemanaly0000grai/mode/2up>
- Trashorras Montecelos, J. (2016). *Sistemas eléctricos en centrales. España: Ediciones Paraninfo, S.A*. Obtenido de <https://www.paraninfo.es/autor/trashorras-montecelos--jesus-109>

Universidad Tecnológica de Puebla. (2004). *Subestaciones eléctricas: Manual de asignatura. Carrera Electricidad y Electrónica Industrial, Programa 2004*. Obtenido de [https://www.academia.edu/10933597/Subestaciones\\_electricas##](https://www.academia.edu/10933597/Subestaciones_electricas##)