



P-TERAX-125185-GMM

Cartagena de Indias, marzo de 2026

Señor

JAIR FERNANDEZ

Representante Legal

CONSORCIO GRAN MALECÓN DEL MAR

Cartagena de Indias, Colombia

Referencia: Optimización de estructuras de pavimento en el proyecto Gran Malecón del Mar — Avenida Santander, Cartagena de Indias.

Respetado Ingeniero Fernandez,

En respuesta a los requerimientos técnicos del proyecto, TERAX COLOMBIA SAS presenta el siguiente **Informe de Optimización de Estructuras de Pavimento** para el proyecto Gran Malecón del Mar, localizado sobre la Avenida Santander en el Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias.

El presente análisis se fundamenta en el informe técnico de referencia elaborado por CARINSA — *“Elaboración de estudios y diseños para la adecuación de los perfiles viales en la Avenida Santander”* —, el cual fue revisado y contrastado con las condiciones geotécnicas reales verificadas en campo, las especificaciones de los materiales disponibles en obra, los volúmenes y composición del tránsito de diseño, y los criterios establecidos en las normas técnicas nacionales e internacionales vigentes.

El objetivo central de la optimización es mejorar el desempeño estructural de las secciones de pavimento, reducir los riesgos constructivos asociados a las condiciones del suelo de soporte, y generar ahorros en tiempo y costos de ejecución, sin comprometer la vida útil del proyecto ni el cumplimiento de los parámetros normativos exigibles.

1. Generalidades del Proyecto

El proyecto Gran Malecón del Mar comprende la adecuación integral de los perfiles viales sobre la Avenida Santander, en una extensión distribuida en **cinco (5) tramos funcionales**, cada uno de los cuales presenta condiciones particulares en cuanto a geometría vial, intensidad de tránsito y usos previstos del suelo. Para efectos del diseño estructural de pavimentos, cada tramo fue analizado de forma independiente con el fin de ajustar las soluciones técnicas a sus características específicas.

Los tramos definidos en el proyecto son los siguientes:

- Tramo 1 — Playa Azul
- Tramo 2 — Marbella
- Tramo 3 — El Boquetillo
- Tramo 4 — Las Tenazas
- Tramo 5 — Parque de la Marina

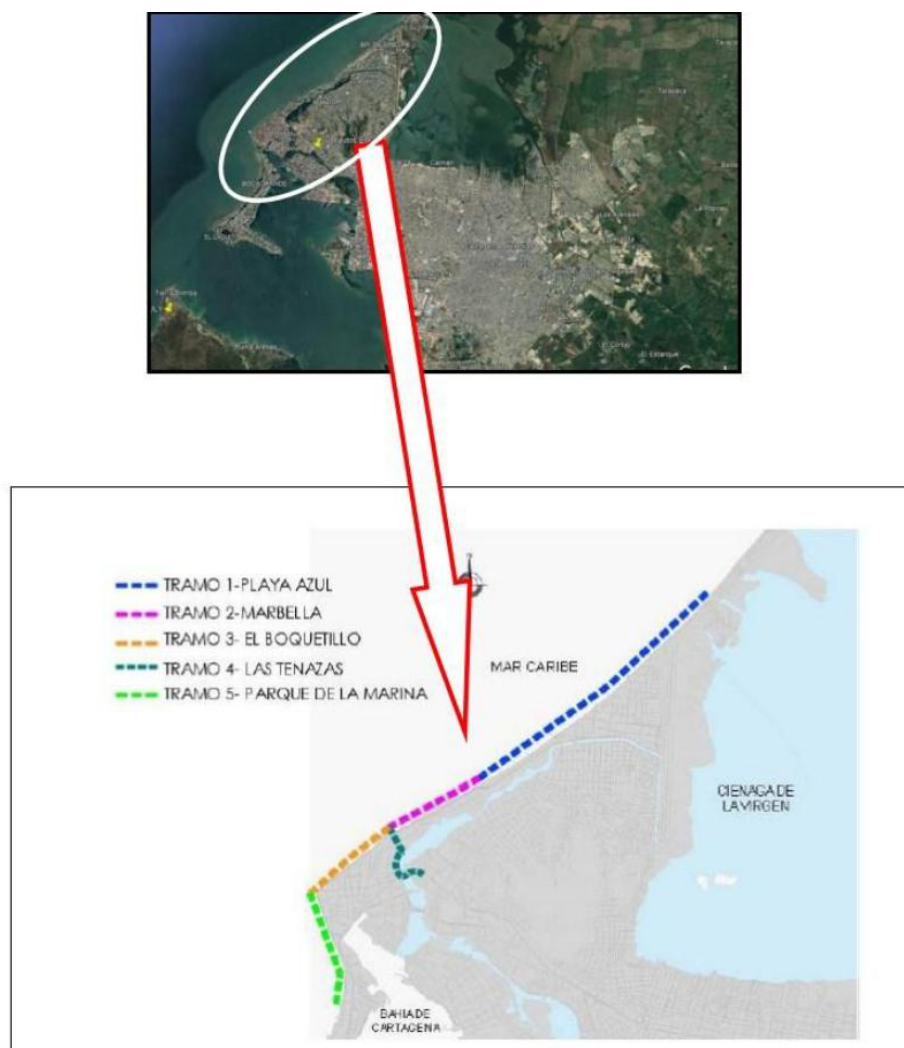


Figura 1. Localización general del proyecto Gran Malecón del Mar — Avenida Santander, Cartagena de Indias.
Fuente: Informe CARINSA.

De acuerdo con la exploración geotécnica realizada por el CARINSA, el **perfil estratigráfico** de la zona está conformado, en su parte superior, por rellenos de arena fina y zahorra de color amarillo con un espesor aproximado de 1,0 m, subyacidos por un estrato de arenas limosas de color gris que se extiende hasta los 6,0 m de profundidad. Esta condición geotécnica define las premisas fundamentales para el diseño de las estructuras de soporte de los pavimentos.

2. Parámetros de Diseño

2.1 Estrato de Desplante de las Estructuras de Pavimento

El informe de referencia establece que las estructuras de pavimento deberán desplantarse sobre un **relleno seleccionado** con un **CBR mínimo del 20%**. Este valor corresponde a un módulo resiliente aproximado de **119,72 MPa**, adoptado como parámetro de diseño de la subrasante para el dimensionamiento de las estructuras de pavimento.

2.2 Tránsito de Diseño

El proyecto contempla cuatro (4) zonas de parqueadero con diferentes composiciones vehiculares y volúmenes de tránsito. A continuación, se describen las características de cada zona:

Zona de Parqueadero	Tipo de Vehículo	Espacios	Camiones Diarios (est.)
El Cabrero	Camiones C2P y Automóviles	112 automóviles	12
Marbella	Camiones C2P, Buses y Automóviles	48 autos / 9 buses	18
Plataforma Central	Camiones C2P y Automóviles	125 automóviles	60
Playa Azul	Camiones C2P y Automóviles	182 automóviles	30

Tabla 1. Composición vehicular de las zonas de parqueadero del proyecto.

Para efectos del diseño estructural, el informe de referencia adopta como tránsito representativo el correspondiente a la **Zona de Marbella**, por ser esta la que presenta la mayor exigencia en términos de carga por eje equivalente (ejes equivalentes de 8,2 toneladas). Los resultados del cómputo de tránsito de diseño para todas las zonas se presentan a continuación:

INFORMACIÓN DE TRÁNSITO				
	EL CABRERO	MARBELLA	PLATAFORMA	PLAYA AZUL
EJE EQUIVALENTES 8.2 TON	35,148	194,364	176,000	88,001

Figura 2. Resumen del tránsito de diseño por zonas de parqueadero — ejes equivalentes de 8,2 toneladas en un período de diseño de 20 años. Fuente: Informe CARINSA.

3. Condiciones Reales de Obra: Rellenos con Arenas de Playa

Durante la ejecución de las obras se ha confirmado el uso de **arenas finas de playa como material de relleno**, condición que hace necesario reevaluar los parámetros de resistencia mecánica

inicialmente considerados en el diseño. De acuerdo con la exploración geotécnica reportada y con la literatura técnica especializada, este tipo de materiales puede presentar valores de CBR del orden de hasta el 10%.

Sin embargo, dada la incertidumbre asociada al grado de contaminación con finos de comportamiento plástico y la variabilidad inherente a los materiales de origen costero, se adopta para efectos de la verificación estructural un valor conservador de **CBR = 7,0%**, considerado representativo de las condiciones reales de obra y coherente con un factor de seguridad de 1,4 sobre la capacidad de soporte de la subrasante.

Table 13.9 Typical values of subgrade CBR.

Soil type	USC symbol	Description	Drainage	CBR % (standard)
Competent broken rock, Gravel sizes	GW, GP	eg Sandstone, granite, greywacke Well graded, poorly graded	All	20
Competent broken rock – some fines formed during construction Gravel sizes, sands	GM, GC SW, SP	eg Phyllites, siltstones Silty, Clayey, well graded, Poorly graded	All	15
Weathered Rock likely to weather or degrade during construction	ALL	eg Shales, mudstones	All	Treat as soil below
Sands	SM, SC	Silty, clayey	Good	10
Sands	SM, SC	Silty, clayey	Poor	7
Inorganic silts	ML	Low plasticity	Good	
Inorganic silts	ML	Low plasticity	Poor	5
Inorganic clays	CL	Low plasticity	Good	
Inorganic clays	CH	High plasticity	Good	
Inorganic silts	MH	High plasticity	Good	3
Inorganic clays	CL	Low plasticity	Poor	
Inorganic silts	MH	High plasticity	Poor	<3
Inorganic clays	CH	High plasticity	Poor	

Figura 3. Valores típicos de CBR para diferentes tipos de suelo según la clasificación USCS/AASHTO. La fila resaltada corresponde a las arenas de playa utilizadas en el proyecto. Fuente: Handbook of Geotechnical Investigations.

3.1 Determinación del Módulo de Reacción de la Capa de Apoyo (K)

Con base en el CBR = 7,0% adoptado para el material de relleno y empleando las **correlaciones de la Portland Cement Association (PCA)**, se estima un módulo de reacción de la subrasante (K subrasante) de aproximadamente **50 MPa/m**. Para el mejoramiento de las condiciones de apoyo, se

considera una **subbase granular (SBG) de 300 mm de espesor**, reforzada con un geotextil no tejido de referencia 3000 dispuesto en la interfaz entre el relleno de arena y el material granular, con el fin de prevenir la migración de finos y garantizar el desempeño a largo plazo de la capa de apoyo.

VALOR DE K PARA LA SUBRASANTE		VALOR DE K PARA LA SUBBASE					
		150 mm		225 mm		300 mm	
MPa/m	lb/pulg ³	MPa/m	lb/pulg ³	MPa/m	lb/pulg ³	MPa/m	lb/pulg ³
20	73	26	96	32	117	38	140
40	~~147~~	~~49~~	~~180~~	~~57~~	~~210~~	66	245
60	~~220~~	~~66~~	~~245~~	~~76~~	~~280~~	90	330
80	295	90	330	100	370	117	430

Figura 4. Tabla de valores del módulo de reacción (K) en función del tipo de subrasante y el espesor de la subbase granular. Fuente: Portland Cement Association — PCA EB209P, 1984.

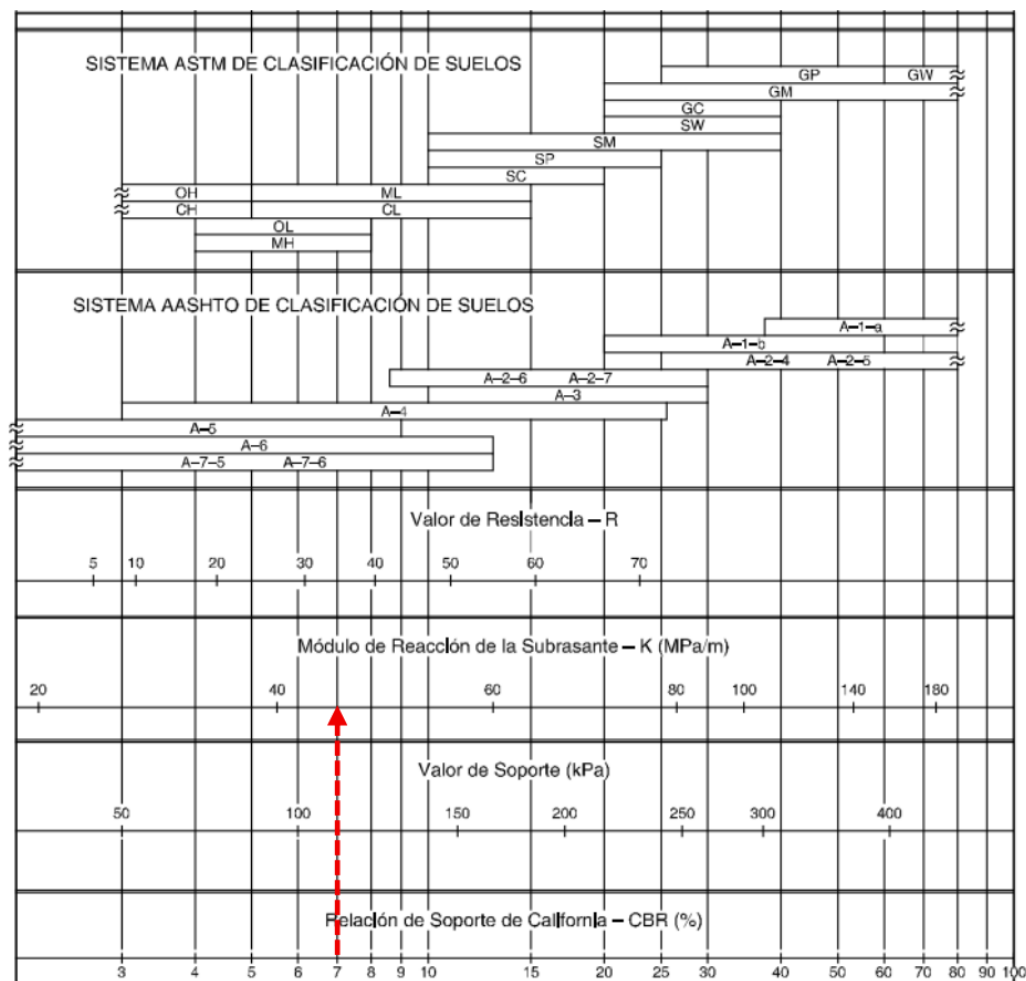


Figura 5. Correlación entre CBR, Valor R y módulo de reacción de la subrasante K (MPa/m). Fuente: Portland Cement Association — PCA Soil Primer, Illinois, 1992.

Para la condición de K subrasante = 50 MPa/m y un espesor de 300 mm de material SBG, se realiza la interpolación en la tabla de la PCA entre los valores de 66 MPa/m y 90 MPa/m, obteniéndose un **módulo de reacción compuesto de la capa de apoyo $K = 78$ MPa/m**. Este es el valor adoptado como parámetro de entrada para el diseño de las losas de concreto en parqueaderos y ciclorutas.

El control de la rigidez del sistema de soporte resulta fundamental para las losas de concreto, ya que estos elementos son particularmente sensibles a gradientes en la rigidez de apoyo. La variación brusca del módulo K puede inducir concentraciones de esfuerzos en las juntas, fisuración prematura y pérdida de soporte diferencial, con consecuencias adversas sobre la vida útil del pavimento.

4. Diseño Estructural de Parqueaderos — Pavimento Rígido Estampado

4.1 Cómputo de Tránsito de Diseño

Para el diseño de las estructuras de los parqueaderos, se adoptan los volúmenes de tránsito vehicular por tipo de eje, calculados para el período de diseño de 20 años. Los valores resultantes se presentan en la siguiente tabla:

Cálculo de K de la capa de apoyo.

Vehículos	TPD	#pasadas 20 Años	Simple 6Ton	Tándem 11
Autos	48	350400	350400	350400
Bus	9	65700	65700	65700
C2P	18	131400	131400	131400
			547500	547500

Figura 6. Cómputo de tránsito de diseño por tipo de vehículo y eje para la zona de parqueaderos. Período de diseño: 20 años.

4.2 Verificación Estructural — Software BS-PCA - Parqueaderos

El dimensionamiento de la losa de concreto para los parqueaderos se realiza empleando el **método de diseño de la Portland Cement Association (PCA)** para pavimentos rígidos. Los parámetros de entrada adoptados para el análisis son:

Parámetro	Valor Adoptado
Módulo de reacción de la capa de apoyo (K)	78 MPa/m
Espesor de la losa	200 mm

Parámetro	Valor Adoptado
Módulo de rotura del concreto (MR)	4,2 MPa (MR 42)
Factor de seguridad de carga	1,1
Factor de mayoración de repeticiones	1,1
Tipo de tránsito	Eje sencillo y eje tandem

Tabla 2. Parámetros de entrada para el diseño de pavimento rígido en parqueaderos — Método PCA.

Figura 7. Resultados de la verificación estructural en el software BS-PCA para parqueaderos. Total consumo por esfuerzo: 0%; Total consumo por erosión: 5,27%. Ambos indicadores se encuentran por debajo del 100%, lo que confirma la aptitud estructural del diseño.

Los índices de consumo por esfuerzo (0%) y por erosión (5,27%) resultantes del análisis se encuentran ampliamente por debajo del límite admisible del 100%, confirmando que el espesor de losa de 200 mm cumple satisfactoriamente con los criterios de desempeño estructural adoptados.

4.3 Recomendaciones para Pasadores de Carga - Parqueaderos

Con base en el espesor de losa definido (200 mm) y el Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto del Ministerio de Transporte — ICPC, se adoptan las siguientes especificaciones para los pasadores de carga en las juntas transversales:

ESPESOR DE LA LOSA, (mm)	DIÁMETRO DEL PASADOR		LONGITUD TOTAL, (mm)	SEPARACIÓN ENTRE CENTROS, (mm)
	mm	pulgadas		
0 – 100	13	½	250	300
110 – 130	16	5/8	300	300
140 – 150	19	¾	350	300
160 – 180	22	7/8	350	300
190 – 200	25	1	350	300
210 – 230	29	1 1/8	400	300
240 – 250	32	1 ¼	450	300
260 – 280	35	1 3/8	450	300
290 – 300	38	1 ½	500	300

Figura 8. Tabla de recomendación de pasadores de carga según el espesor de la losa de concreto. La fila resaltada corresponde al espesor de 200 mm adoptado. Fuente: Ministerio de Transporte — ICPC, Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías, Bogotá D.C., 2008.

Para una losa de $e = 200$ mm, se recomienda implementar pasadores de carga de **diámetro 1 pulgada (25 mm)**, con longitud total de **350 mm** y separados entre centros cada **300 mm**. Estos elementos garantizan la transferencia de cargas entre losas adyacentes, minimizan el escalonamiento en las juntas y contribuyen al comportamiento monolítico del pavimento.

5. Diseño Estructural de Ciclorutas

Para el diseño de las ciclorutas, se adopta un tránsito de diseño equivalente a **25.000 pasadas de vehículos tipo C2P** con cargas máximas por eje de hasta 6 toneladas. Con base en este nivel de solicitud y empleando el método PCA, el módulo de rotura del concreto se determina a partir de la resistencia a la compresión especificada ($f'_c = 3.500$ PSI), según la siguiente expresión:

$$MR = 0,62 \times \sqrt{f'_c} = 0,62 \times \sqrt{3.500} = 3,3 \text{ MPa}$$

BS-PCA - DISEÑO PAVIMENTOS RIGIDOS PCA

Opciones Sensibilidad Terminar

Resistencia K del Apoyo: 78 Mpa/m

Espesor de la Losa: 150 mm

Módulo de Rotura Losa: 3.3 Mpa

☐ Con Bermas

☐ Con Pasadores

TRANSITO

Tn

Factor de Seguridad Carga: 1.1

Factor de Mayoración de Repeticiones: 1.1

Ejes Sencillos Ejes Tandem Ejes Tridem

Total Consumo Esfuerzo (%): 89.4347

Total Consumo Erosión (%): 3.2345

Cargar Guardar Calcular Imprimir Salir

Figura 9. Resultados de la verificación estructural en el software BS-PCA para ciclorutas. Total consumo por esfuerzo: 89,43%; Total consumo por erosión: 3,23%. Ambos indicadores se encuentran por debajo del 100%, confirmando la idoneidad del diseño.

El análisis estructural confirma que un **espesor de losa de concreto de 150 mm** resulta adecuado para garantizar el desempeño estructural y la vida útil del elemento bajo las condiciones de carga y soporte consideradas. Los índices de consumo por esfuerzo (89,43%) y por erosión (3,23%) se ubican dentro de los límites admisibles del método PCA.

6. Diseño Estructural del Paseo Peatonal — Adoquín en Concreto

Para las estructuras de adoquín en el paseo peatonal, la verificación se realiza considerando un tránsito de diseño equivalente a **25.000 pasadas** de ejes equivalentes. A partir de este valor, la metodología AASHTO 93 determina el **Número Estructural requerido (SN = 1,50)**, que debe ser aportado íntegramente por las capas granulares de soporte.

Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento
☒ Pavimento flexible ☐ Pavimento rígido

Confiability (R) y Desviación estándar (So)
 95 % $Z_r = -1.645$ So 0.35

Serviciabilidad inicial y final
 PSI inicial 4.2 PSI final 2.2

Módulo resiliente de la subrasante
 Mr 13000 psi

Información adicional para pavimentos rígidos

Módulo de elasticidad del concreto - E_c (psi) 2788555 Coeficiente de transmisión de carga - (J) 4.2
 Módulo de rotura del concreto - S_c (psi) 491 Coeficiente de drenaje - (Cd) 1

Tipo de Análisis
☒ Calcular SN **W18 =** 25000 ☐ Calcular W18

Número Estructural
SN = 1.50

Calcular Salir

Figura 10. Cálculo del Número Estructural (SN) mediante el software AASHTO 93. W18 = 25.000 ejes equivalentes; SN resultante = 1,50.

6.1 Determinación del Coeficiente Estructural de la Subbase Granular

Con base en las propiedades mecánicas de la **arena parda utilizada como material de relleno del muro de suelo reforzado (MSE)** — la cual presenta un CBR del orden del 20% — se adopta un **coeficiente estructural $a_i = 0,095$ (pulgada⁻¹)** para la capa granular, conforme a las correlaciones establecidas en la guía AASHTO.

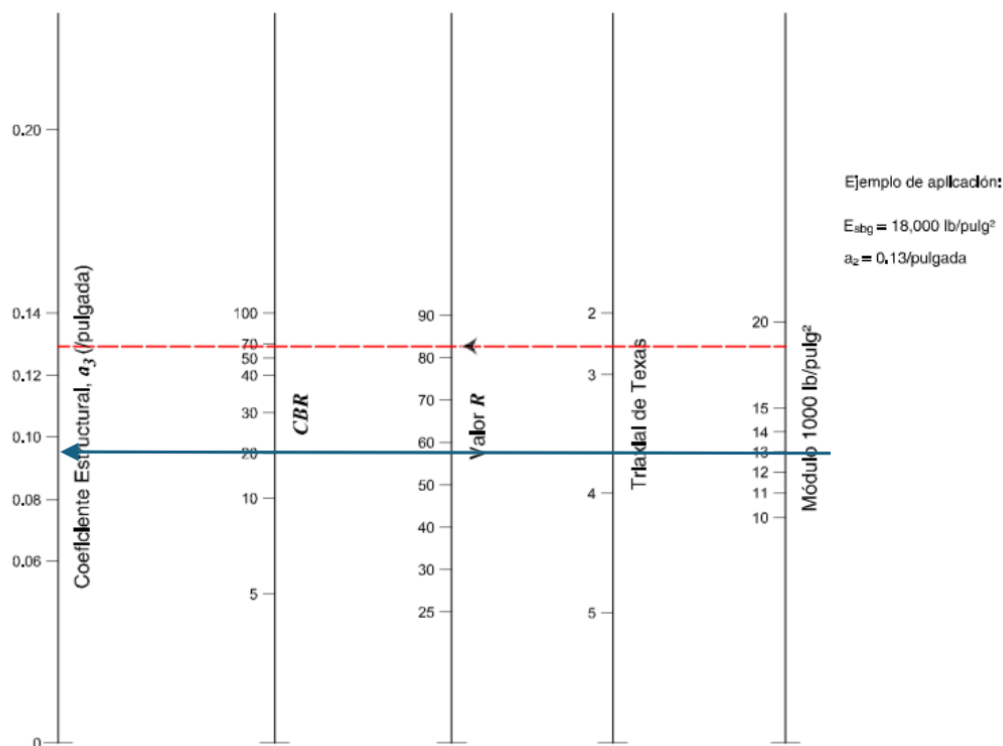


Figura 11. Variación del coeficiente estructural a_3 con diferentes parámetros de resistencia de la subbase granular.
Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. Washington D.C., 1993.

Parámetro	Subbase Granular
Módulo Resiliente (PSI)	13018
Coeficiente de aporte	0.095
Coeficiente de drenaje	1.00
H (cm)	40
SN eff	1.50

Figura 12. Resumen de parámetros de la subbase granular adoptada para el diseño de la estructura de adoquín.

La verificación estructural confirma que, con una capa de soporte de arena de playa (CBR 7%) y 400 mm de material tipo SBG (CBR 20%), el sistema alcanza el número estructural efectivo requerido (SN = 1,50), habilitando el uso de adoquines de concreto como superficie de rodadura del paseo peatonal.

Nota técnica: El uso de materiales granulares equivalentes será posible siempre y cuando los materiales cumplan con los requerimientos establecidos en las normas INVIAS vigentes y sean verificados mediante ensayos de laboratorio en obra.

7. Conclusiones y Estructuras de Pavimento Recomendadas

Como resultado del análisis integral de las variables geotécnicas, de tránsito y de materiales disponibles en obra, se adoptan las siguientes estructuras definitivas de pavimento para cada uno de los usos funcionales evaluados en el proyecto Gran Malecón del Mar:

7.1 Parqueaderos — Pavimento Rígido Estampado

La solución estructural adoptada para las zonas de parqueadero consiste en una **losa de hormigón MR 42 de 200 mm de espesor**, sustentada sobre una subbase granular (triturado) de 300 mm, con separación de la capa de arena de playa mediante un geotextil no tejido de referencia 3000. Los pasadores de carga serán de 25 mm de diámetro, 350 mm de longitud, separados cada 300 mm en las juntas transversales.

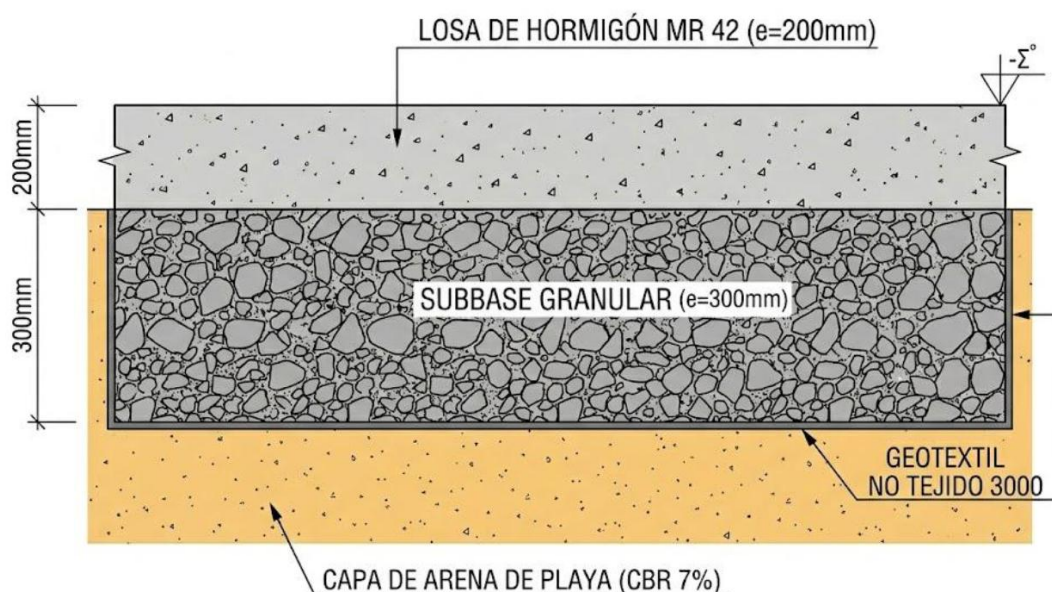


Figura 13. Estructura de pavimento rígido estampado para zonas de parqueadero. Sección típica adoptada: losa de hormigón MR 42 (e = 200 mm) + subbase granular (triturado) e = 300 mm + geotextil no tejido 3000 + capa de arena de playa (CBR 7%).

Capa	Especificación
Superficie de rodadura	Losa de hormigón estampado MR 42 — espesor 200 mm
Subbase granular (SBG)	Material granular CBR $\geq 20\%$ — espesor 300 mm
Elemento de separación	Geotextil no tejido referencia 3000
Subrasante (relleno)	Arena de playa — CBR de diseño 7%
Pasadores de carga	Ø 25 mm (1 pulgada), longitud 350 mm, separación 300 mm

Tabla 3. Resumen de la estructura de pavimento rígido para parqueaderos.

7.2 Ciclorutas — Pavimento Rígido

Para las ciclorutas se adopta una **losa de hormigón MR 33 ($f'c = 3.500$ PSI) de 150 mm de espesor**, sobre una subbase granular de 300 mm, con la misma configuración de separación y soporte descrita para los parqueaderos.

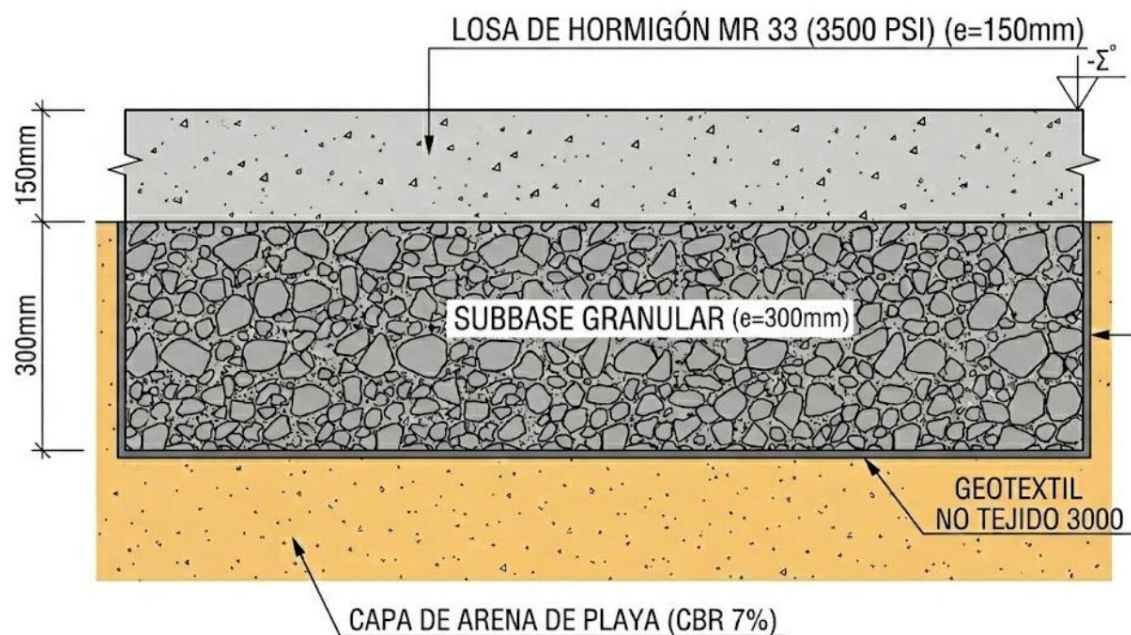


Figura 14. Estructura de pavimento rígido para ciclorutas. Sección típica adoptada: losa de hormigón MR 33 ($e = 150$ mm) + subbase granular ($e = 300$ mm) + geotextil no tejido 3000 + capa de arena de playa (CBR 7%).

7.3 Paseo Peatonal — Adoquín en Concreto

Para el paseo peatonal se adopta una estructura con **adoquines de concreto de 60 mm de espesor**, asentados sobre una capa de nivelación en arena de 40 mm y sustentados por una subbase granular de 400 mm, con geotextil no tejido de referencia 3000 en la interfaz con el material de relleno.

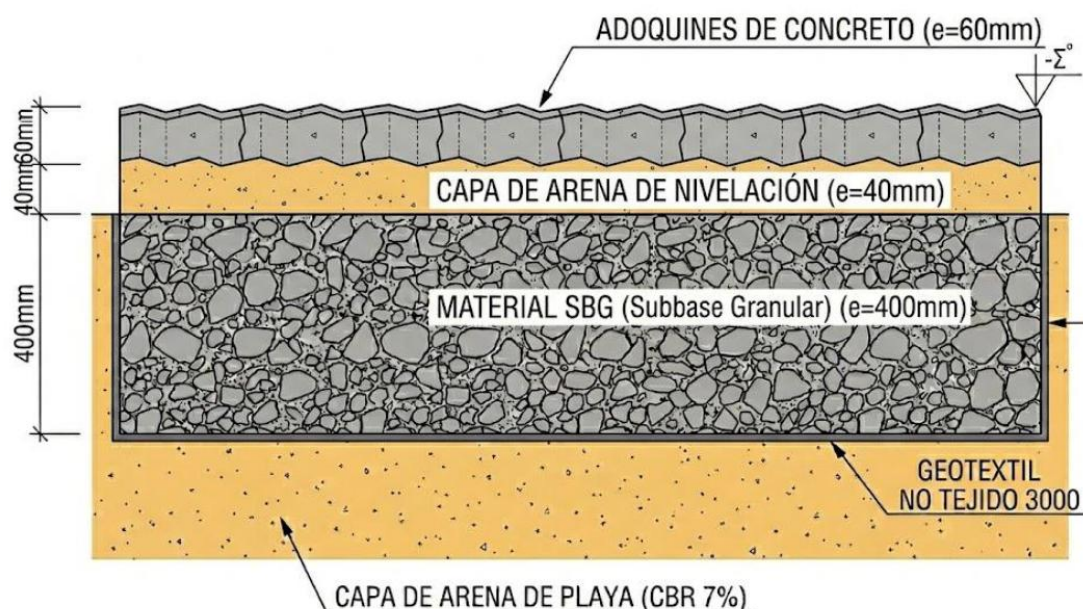


Figura 15. Estructura de paseo peatonal en adoquín de concreto. Sección típica adoptada: adoquines de concreto (e = 60 mm) + capa de arena de nivelación (e = 40 mm) + subbase granular SBG Arena Parda (e = 400 mm) + geotextil no tejido 3000 + capa de arena de playa (CBR 7%).

Uso / Zona	Superficie	Subbase Granular	Notas de Diseño
Parqueaderos	Hormigón MR 42 — 200 mm	300 mm Triturado (CBR ≥ 20%)	Pasadores Ø 25 mm / 350 mm L / e=300 mm. Geotextil NT-3000 o T2400
Ciclorutas	Hormigón MR 33 — 150 mm	300 mm (CBR ≥ 20%)	Sin pasadores de carga. Geotextil NT-3000 o T2400. Se recomienda acero de refuerzo en caso de no ser uniforme Malla 8mm c 15cm
Paseo Peatonal	Adoquín concreto — 60 mm	400 mm Arena Parda (CBR ≥ 20%)	Arena nivelación 40 mm. Geotextil NT-3000 o T2400

Tabla 4. Cuadro resumen de estructuras de pavimento recomendadas para el proyecto Gran Malecón del Mar.

8. Consideraciones Finales y Recomendaciones de Control de Calidad

El presente análisis ha sido desarrollado bajo estrictos criterios de ingeniería de pavimentos, incorporando las condiciones geotécnicas reales verificadas en campo y los materiales efectivamente disponibles en la obra. Las estructuras propuestas cumplen con los lineamientos de las normas técnicas nacionales del INVIAS y los estándares de diseño internacionales de la AASHTO y la PCA.

Para garantizar el desempeño esperado de las estructuras de pavimento durante su vida útil, se recomienda implementar el siguiente plan mínimo de control de calidad durante la construcción:

- Verificar el CBR del material de subrasante (arena de playa) mediante ensayos de laboratorio en campo. Si el CBR resultante es inferior al 7% adoptado en el diseño, deberá evaluarse el ajuste de espesores o el mejoramiento del material.
- Controlar la densificación de la subbase granular mediante ensayos de densidad en campo (prueba de cono y arena), garantizando alcanzar el 95% de la Densidad Proctor Modificada como mínimo.
- Verificar la resistencia del concreto para las losas mediante ensayos de módulo de rotura en vigas (ASTM C78 / NTC 2871), con una frecuencia mínima de una muestra por cada 50 m³ de concreto colocado.
- Controlar el espesor de la losa de concreto mediante testigos extraídos en campo, con una frecuencia mínima de un testigo por cada 1.000 m² de pavimento.
- Supervisar la instalación del geotextil no tejido de referencia 3000, verificando su correcta colocación, los traslapes mínimos (300 mm) y la ausencia de daños mecánicos durante el proceso constructivo.

Quedamos atentos a cualquier inquietud, observación o requerimiento adicional relacionado con el diseño propuesto, el cual ha sido desarrollado bajo el marco normativo nacional vigente.

Atentamente,

WILLIAM QUINTERO

Especialista en Geotecnia Vial y Pavimentos

Director Técnico

TERAX COLOMBIA S.A.S.

wquintero@teraxcolombia.com